

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica

Concepto Aeropuerto Verde. Medidas de reducción de emisiones en aeropuertos y aplicación al Aeropuerto de Sevilla.

Autor: Alejandro Núñez Baladrón

Tutor: Javier Niño Orti

Dep. de Ingeniería de la Construcción y
Proyectos de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2015



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Aeronáutica

**Concepto Aeropuerto Verde. Medidas de reducción
de emisiones en aeropuertos y aplicación al
Aeropuerto de Sevilla.**

Autor:

Alejandro Núñez Baladrón

Tutor:

Javier Niño Orti

Profesor asociado

Dep. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Proyecto Fin de Carrera: Concepto Aeropuerto Verde. Medidas de reducción de emisiones en aeropuertos y aplicación al Aeropuerto de Sevilla.

Autor: Alejandro Núñez Baladrón

Tutor: Javier Niño Orti

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mis padres, por su paciencia y apoyo. También a Javier, mi tutor, por darle un empujón al proyecto cuando más lo necesitaba.

El objeto del presente Proyecto Fin de Carrera puede dividirse en dos secciones bien diferenciadas: la primera consistirá en la realización de un estudio teórico exhaustivo, en el que se recopilarán y explicarán un conjunto general de medidas que puedan ser de implantación en aeropuertos ya existentes, y que nos permitan, directa o indirectamente, disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) generadas; en la segunda sección, poniendo en práctica parte del contenido teórico del primer bloque, se estudiará la implantación de varias medidas de reducción de emisiones en el Aeropuerto de Sevilla, analizando su la viabilidad económica y técnica. Una descripción en más detalle de ambas secciones es ofrecida a continuación:

- **Primera sección.-** En primer lugar, y a modo de introducción, se presentarán algunas consideraciones generales relacionadas con el objetivo del proyecto. Posteriormente se procederá al estudio de las distintas medidas, que, en última instancia, nos permitirán reducir el nivel de emisiones. Estas medidas se agruparán en distintos campos o actividades, cada uno correspondiente a un capítulo, que o bien están directamente implicados con la gestión energética en el aeropuerto (Operaciones y Mantenimiento), conllevan un consumo energético significativo (climatización, iluminación y autogeneración eléctrica), o bien constituyen importantes fuentes de emisiones directas de GEI: GSE (Equipos de Asistencia en Tierra a las Aeronaves), aeronaves y accesos al aeropuerto.

Es preciso señalar que algunos campos importantes dentro de la actividad aeroportuaria, como la gestión de residuos o el suministro de agua no han sido tratados en este Proyecto, ya que si bien constituyen procesos de relevancia en lo que a sostenibilidad se refiere, son campos secundarios en cuanto a emisiones de GEI generadas.

- **Segunda sección.-** En esta parte se comenzará realizando una descripción resumida del aeropuerto objetivo, para a continuación identificar aquellas medidas, de entre aquellas que se consideraron más ventajosas y viables en la primera parte, que mayores beneficios puedan proporcionar en el Aeropuerto de Sevilla. Posteriormente se realizará un análisis para cada una de ellas, sin entrar en un grado de detalle elevado, que nos permita conocer su viabilidad económica y la cantidad de emisiones que podremos ahorrar con cada una.

NOTA: Acciones, prácticas, medidas, estrategias o mejoras serán todos términos a menudo similares y por tanto intercambiables, sirviendo todos ellos para describir procesos físicos o procedimentales en relación al uso de la energía o la gestión de emisiones.

Prefacio

Aeropuerto Verde es aquel que en su gestión y operaciones prioriza la sostenibilidad con el uso de nuevas tecnologías y procedimientos enfocados a optimizar el uso de la energía y a reducir las emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero (GEI).

- Aena Aeropuertos. Proyecto Aeropuerto Verde -

El propósito de hacer las cosas de una manera más sostenible va cobrando cada vez más importancia a todos los niveles en nuestra sociedad, en la que cada vez se pone más esfuerzo en reducir el impacto sobre el medioambiente, un impacto entendido siempre como un perjuicio sobre éste, causado por la actividad humana. Ha sido a partir de la Segunda Revolución Industrial, y especialmente a partir de la revolución energética de principios del siglo XX, con la utilización a gran escala del petróleo y el gas como combustibles, cuando este deterioro ambiental se ha hecho más severo: contaminación de las grandes ciudades, deforestación, vertidos de crudo, agujeros en la capa de ozono, pérdida de biodiversidad, contaminación de las aguas, etc., lo que también ha traído consigo una toma de conciencia social en cuanto a las consecuencias ambientales de nuestras acciones, las cuales se producen no solo a nivel regional, sino también global, como es el caso del cambio climático, el cual constituye la principal razón de ser de este Proyecto.

La actividad aeroportuaria no será una excepción para lo anteriormente expuesto, por el contrario, el desarrollo de esta actividad usualmente causa perjuicios importantes al medio ambiente. Esto es debido a que, entre otras cosas, se trata de una actividad que necesita de elevadas extensiones de terreno, produce gran cantidad de residuos, y es muy intensiva energéticamente. Esto último provoca que los aeropuertos sean también una fuente importante de GEI, contribuyendo así al agravamiento del cambio climático.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Prefacio	xi
Índice	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
ÍNDICE DE IMÁGENES	xix
Índice de Gráficos.....	xxi
1 Consideraciones generales.....	1
1.1 <i>El Cambio Climático como principal motivación</i>	1
1.1.1 Contexto actual del problema y legislación	1
1.1.2 Aclaración de conceptos	3
1.1.3 El valor de las emisiones para su inclusión en un análisis de costo-beneficio	6
1.1.4 Motivaciones adicionales	6
1.1.5 Otros impactos ocasionados por la actividad aeroportuaria	7
1.2 <i>Las emisiones en el transporte aéreo y los aeropuertos en particular. Clasificación de emisiones.</i>	9
1.3 <i>El consumo energético en los aeropuertos</i>	11
1.4 <i>La eficiencia energética en los aeropuertos</i>	12
1.5 <i>Compromisos voluntarios</i>	15
1.5.1 Normas ISO	15
1.5.2 Airport Carbon Accreditation y otros proyectos de reducción de emisiones en aeropuertos	16
2 Reducción de emisiones en la gestión de Operaciones y Mantenimiento en aeropuertos	17
2.1 <i>Sistemas de control</i>	17
2.1.1 Sistemas de Automatización de Edificios (BAS).....	17
2.1.2 Control de motores	18
2.2 <i>Tareas de Operaciones y Mantenimiento (O&M)</i>	18
2.2.1 Evaluaciones Sistemáticas.....	19
2.2.2 Programas especiales y medidas operacionales	22
2.2.3 Personal/Factores humanos	23
2.2.4 Medición del consumo energético.....	23
3 Reducción de emisiones en climatización	25
3.1 <i>Legislación básica sobre climatización</i>	25
3.2 <i>Conceptos básicos y estado del arte de las instalaciones de climatización</i>	26
3.2.1 Confort higrotérmico y otros principios de climatización.	26
3.2.2 Instalaciones de climatización	27
3.3 <i>Medidas de eficiencia energética en climatización</i>	45
3.3.1 Medidas generales	45
3.3.2 Medidas para calefacción	50
3.3.3 Medidas para refrigeración.....	52
3.3.4 Climatización mediante energías renovables.....	57

4	Reducción de emisiones en iluminación y otras cargas eléctricas	63
4.1	<i>Legislación básica sobre iluminación</i>	63
4.2	<i>Conceptos básicos y estado del arte de los dispositivos de iluminación.....</i>	64
4.2.1	Lámparas incandescentes	64
4.2.2	Lámparas halógenas	65
4.2.3	Lámparas de vapor de sodio	65
4.2.4	Lámparas fluorescentes	65
4.2.5	Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)	65
4.2.6	Dispositivos LED	66
4.2.7	Resumen de la comparativa	66
4.3	<i>Ahorro en iluminación de interior.....</i>	67
4.3.1	Empleo de lámparas fluorescentes	68
4.3.2	Empleo de lámparas HID.....	68
4.3.3	Empleo de dispositivos LED	68
4.3.4	Control inteligente.....	69
4.4	<i>Ahorro en iluminación exterior.....</i>	69
4.5	<i>Ahorro en iluminación en el aeródromo</i>	70
4.5.1	Ahorro en luces de superficie y ayudas visuales	70
4.5.2	Ahorro en la iluminación de las plataformas.....	73
4.6	<i>Otras cargas eléctricas</i>	73
5	Reducción de emisiones en la generación eléctrica	75
5.1	<i>Consideraciones generales, legislación y emisiones.....</i>	75
5.2	<i>Instalaciones para energía solar.....</i>	76
5.2.1	Paneles solares fotovoltaicos.....	76
5.2.2	Colectores solares para la generación de electricidad.....	80
5.3	<i>Instalaciones para energía eólica</i>	81
5.3.1	Aerogeneradores convencionales	82
5.3.2	Micro-turbinas eólicas.....	84
5.4	<i>Instalaciones para energía de biomasa</i>	85
5.4.1	La biomasa: definición, clasificación y propiedades.....	85
5.4.2	Sistemas de generación eléctrica mediante biomasa.....	86
6	Reducción de emisiones en equipos de asistencia en tierra a las aeronaves	89
6.1	<i>Los Equipos de Asistencia en Tierra a las Aeronaves.</i>	89
6.2	<i>Reducción de emisiones de los GSE</i>	94
6.2.1	Medidas relacionadas con el equipamiento.....	94
6.2.2	Medidas relacionadas con la operación y el mantenimiento de los GSE	96
6.2.3	Medidas relativas al combustible	96
7	Reducción de emisiones en los accesos al aeropuerto	107
7.1	<i>Emisiones ocasionadas por los pasajeros</i>	107
7.2	<i>Emisiones ocasionadas por los empleados.....</i>	109
8	Reducción de las emisiones debidas a las aeronaves	115
8.1	<i>Combustibles alternativos.....</i>	115
8.2	<i>Operaciones</i>	117
8.2.1	Disminución de las emisiones mediante uso de CDA	117
8.2.2	Disminución de las emisiones de GEI en la fase de taxi.....	118
8.2.3	Disminución de las emisiones de la APU	119
9	Conclusiones y resumen de las medidas más importantes	121
10	Aeropuerto Objetivo	129
10.1	<i>Características generales</i>	129
10.1.1	Información General.....	129
10.1.2	Estadísticas de Tráfico Aéreo	130

10.1.3	Instalaciones.....	132
10.2	<i>Emisiones</i>	136
10.2.1	Emisiones por el consumo eléctrico en la Terminal.....	136
10.2.2	Emisiones de los Grupos Electrógenos	138
10.2.3	Política en materia de emisiones.....	138
11	Medidas para reducir las emisiones en el aeropuerto	141
11.1	<i>Determinación de las medidas de reducción de emisiones para el Aeropuerto de Sevilla</i>	141
11.1.1	Estimación del potencial de ahorro por la sustitución de los generadores de Climatización.....	141
11.1.2	Estimación del potencial de ahorro por la sustitución de luminarias en Iluminación y Señalética	143
11.2	<i>Reducción de emisiones en climatización</i>	144
11.2.1	Descripción de equipos existentes y justificación de la solución a estudiar	144
11.2.2	Sustitución de los generadores de la Central Energética	146
11.3	<i>Reducción de emisiones mediante la generación eléctrica con energías renovables</i>	169
11.3.1	Instalación solar fotovoltaica	169
11.3.2	Instalación eólica	181
11.3.3	Instalación de cogeneración/trigeneración.....	189
	Glosario de Acrónimos	191
	Bibliografía	193
12	Anexos	201
12.1	<i>Anexo 1.- Tabla 27</i>	201
12.2	<i>Anexo 2.- Curvas monótonas de carga</i>	203

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Tabla de propiedades de los GEI más importantes.	5
Tabla 2.- Definición de Alcances por ACI.	10
Tabla 3.- Rango de demandas energéticas de una terminal genérica.	11
Tabla 4.- Comparativa de calderas.	37
Tabla 5.- Comparativa de bombas de calor para calefacción.	38
Tabla 6.- Comparativa de máquinas de frío.	42
Tabla 7.- Requisitos mínimos legales de escalonamiento de potencia.	49
Tabla 8.- Características de los principales sistemas de cogeneración.	59
Tabla 9.- Comparativa de lámparas.	67
Tabla 10.- Comparativa LEDs de distintos colores.	72
Tabla 11.- Tipos de GSE.	93
Tabla 12.- Legislación aplicable a las emisiones de los GSE en España.	93
Tabla 13.- Evaluación de las emisiones de GEI de vehículos pesados.	104
Tabla 14.- Evaluación de las emisiones de GEI de vehículos ligeros.	105
Tabla 15.- Principales medidas analizadas.	126
Tabla 16.- Datos generales del Aeropuerto de Sevilla.	130
Tabla 17.- Distribución del tráfico de pasajeros.	132
Tabla 18.- Principales superficies del Edificio Terminal.	133
Tabla 19.- Clasificación de las principales fuentes de emisiones del aeropuerto.	136
Tabla 20.- Consumo energético por instalaciones en la Edificio Terminal.	137
Tabla 21.- Eficiencia media de los equipos de refrigeración que abastecen al Edificio Terminal.	142
Tabla 22.- Eficiencia media de los equipos de calefacción que abastecen al Edificio Terminal.	142
Tabla 23.- Estimación emisiones ahorradas con nuevos equipos para refrigeración.	143
Tabla 24.- Estimación emisiones ahorradas con nuevos equipos para calefacción.	143
Tabla 25.- Estimación de las emisiones máximas ahorradas en Iluminación.	144
Tabla 26.- Estimación de las emisiones máximas ahorradas en Señalética.	144
Tabla 27.- Características de los equipos propuestos.	148
Tabla 28.- Datos de los equipos CLIMAVENETA.	149
Tabla 29.- Horas equivalentes estimadas para climatización.	151
Tabla 30.- Resultados del cálculo del consumo con las curvas monótonas de carga.	151
Tabla 31.- Estimaciones de la carga térmica de la Terminal de Pasajeros.	151
Tabla 32.- Estimaciones de la demanda térmica anual de la Terminal de Pasajeros.	152

Tabla 33.- Comparativa general de las alternativas de refrigeración.	153
Tabla 34.- Comparativa general de las alternativas de calefacción.	155
Tabla 35.- Costes y emisiones de Instalación geotérmica + Calderas de Gas natural.	157
Tabla 36.- Evolución de los costes sociales marginales de las emisiones.	158
Tabla 37.- Comparativa final de las alternativas para calor y frío.	160
Tabla 38.- Especificaciones técnicas de la enfriadora seleccionada.	165
Tabla 39.- Especificaciones técnicas de la torre de refrigeración seleccionada.	165
Tabla 40.- Principales características de la caldera elegida.	166
Tabla 41.- Resumen de costes de la reforma para climatización.	166
Tabla 42.- Datos de entrada del estudio económico de la reforma para climatización.	167
Tabla 43.- Resultados del análisis económico para la medida propuesta en climatización.	168
Tabla 44.- Comparación de paneles fotovoltaicos.	170
Tabla 45.- Características principales del módulo elegido.	171
Tabla 46.- Características principales del inversor elegido.	172
Tabla 47.- Irradiación mensual para el Aeropuerto de Sevilla.	174
Tabla 48.- Estimación de las pérdidas en la instalación fotovoltaica.	175
Tabla 49.- Precio de soportes.	177
Tabla 50.- Desglose de costes de la instalación fotovoltaica.	178
Tabla 51.- Datos de entrada del estudio económico de la instalación fotovoltaica.	178
Tabla 52.- Resultados del estudio económico de la instalación fotovoltaica.	178
Tabla 53.- Especificaciones técnicas del aerogenerador elegido.	183
Tabla 54.- Precios por componentes del aerogenerador considerado.	184
Tabla 55.- Distribución de la velocidad de vientos en el Aeropuerto de Sevilla según la información suministrada por la Rosa de Vientos.	185
Tabla 56.- Estimación de la energía eléctrica anual generada por cada turbina.	187
Tabla 57.- Datos de entrada del estudio económico de la instalación eólica.	188
Tabla 58.- Resultados del estudio económico de la instalación eólica.	188
Tabla 59.- Datos de entrada del estudio económico para cogeneración.	190
Tabla 60.- Factores de emisiones de CO ₂ .	202
Tabla 61.- Grados-día para el Aeropuerto de Sevilla.	203
Tabla 62.- Temperatura de diseño para el Aeropuerto de Sevilla.	204
Tabla 63.- Valores de los coeficientes F _i para calefacción.	204

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.- Ilustración del balance de radiación solar sobre la superficie terrestre.	4
Imagen 2.- Gases de escape de un avión despegando.	8
Imagen 3.- Etiqueta de Certificación Energética.	13
Imagen 4.- Caldera de gas en la sala de calderas del Aeropuerto de Sumburgh, (Islas Shetland, Escocia).	30
Imagen 5.- Caldera de biomasa para astillas de madera en el Aeropuerto de Stansted, (Londres, UK).	32
Imagen 6.- Esquema del ciclo de la bomba de calor.	33
Imagen 7.- Construcción de la instalación horizontal de captación geotérmica en el Aeropuerto de Juneau (Alaska, EEUU).	35
Imagen 8.- Enfriadora centrífuga de 7000 kW de potencia térmica en el Aeropuerto de Kansai (Japón).	38
Imagen 9.- Equipo de aire acondicionado de tipo Split.	39
Imagen 10.- Bomba de calor de tipo Roof-Top.	39
Imagen 11.- Enfriadoras de agua en sala de máquinas (Beaverton, Oregon).	40
Imagen 12.- Esquema del funcionamiento del ciclo de refrigeración por absorción.	41
Imagen 13.- Enfriadora de absorción.	41
Imagen 14.- Esquema del funcionamiento del ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto.	42
Imagen 15.- Climatizador.	43
Imagen 16.- Tanque de hielo en el Aeropuerto de Kansai (Japón).	56
Imagen 17.- Ventilador en el Aeropuerto Daniel Oduber Quirós (Liberia, Costa Rica)	56
Imagen 18.- Esquema de un sistema de trigeneración.	60
Imagen 19.- Vista de las luces de pista en el Aeropuerto de Zurich (Suiza).	70
Imagen 20.- Luces de Aproximación.	71
Imagen 21.- Sistema PAPI.	71
Imagen 22.- Baliza de señalización de obstáculos con LED y autoabastecimiento solar.	71
Imagen 23.- Letrero retroiluminado.	71
Imagen 24.- Mapa de irradiancia solar media.	76
Imagen 25.- Paneles fotovoltaicos.	77
Imagen 26.- Instalación fotovoltaica en el Aeropuerto de Atenas (Grecia).	79
Imagen 27.- Reflectores Fresnel.	80
Imagen 28.- Colector solar cilíndrico-parabólico.	80
Imagen 29.- Discos Stirling.	80
Imagen 30.- Central solar de torre.	80

Imagen 31.- Ilustración del interior de un aerogenerador.	81
Imagen 32.- Mapamundi de velocidad media del viento.	82
Imagen 33.- Ilustración de las superficies limitadoras de obstáculos.	83
Imagen 34.- Aerogenerador convencional en el Aeropuerto East Midlands (Inglaterra).	84
Imagen 35.- Micro-turbinas eólicas de eje horizontal en el Aeropuerto Boston Logan (Massachusetts, EEUU).	84
Imagen 36.- Micro-turbina eólica de eje vertical sobre tejado.	84
Imagen 37.- Sistema central para electricidad y aire acondicionado.	94
Imagen 38.- Conexión a sistema de abastecimiento de combustible subterráneo con hidrante de combustible.	95
Imagen 39.- Conexiones autoelevables de agua y aire acondicionado para un sistema subterráneo.	95
Imagen 40.- Esquema de tipos de vehículos eléctricos.	99
Imagen 41.- Esquema de la maniobra de CDA.	118
Imagen 42.- Vista del Aeropuerto de Sevilla.	129
Imagen 43.- Situación de la Central Energética y los equipos de climatización CLIMAVENETA.	145
Imagen 44.- Posibles emplazamientos de la instalación geotérmica.	147
Imagen 45.- Diagrama de los circuitos de climatización de calor de la Central Energética.	163
Imagen 46.- Diagrama de los circuitos de climatización de frío de la Central Energética.	163
Imagen 47.- Emplazamiento considerado para la instalación fotovoltaica.	170
Imagen 48.- Cubierta con el número máximo de módulos fotovoltaicos.	172
Imagen 49.- Rosa de Vientos del Aeropuerto de Sevilla.	181
Imagen 50.- Emplazamiento propuesto para la instalación eólica e identificación de obstáculos.	182
Imagen 51.- Resultados del cálculo del emplazamiento óptimo de los aerogeneradores.	185
Gráfico 44.- Emisiones ahorradas por la instalación eólica.	188

Índice de Gráficos

Gráfico 1.- Evolución de la temperatura media global desde 1880.	3
Gráfico 2.- Emisiones asociadas a la electricidad consumida en distintos países.	12
Gráfico 3.- Efecto de un adecuado mantenimiento en la vida útil de una instalación.	21
Gráfico 4.- Ejemplo del climograma de Givoni.	27
Gráfico 5.- Ciclo ideal de compresión de vapor de una sola etapa. Diagrama Ph.	34
Gráfico 6.- Curva Altura-Temperatura para distintos equipos terminales de calefacción.	51
Gráfico 7.- Evolución de la eficiencia para los LEDs blancos.	66
Gráfico 8.- Evolución y prognosis de la capacidad fotovoltaica mundial instalada.	78
Gráfico 9.- Evolución histórica de la potencia eólica global instalada.	82
Gráfico 10.- Emisiones y consumo equivalente por países.	100
Gráfico 11.- Comparativa de la evolución de precios energéticos.	102
Gráfico 12.- Evolución de los precios de los combustibles derivados del petróleo.	102
Gráfico 13.- Comparativa para los precios finales de distintos combustibles de vehículos en EEUU.	103
Gráfico 14.- Evolución del número de pasajeros en el Aeropuerto de Sevilla.	130
Gráfico 16.- Evolución del volumen de mercancías.	131
Gráfico 17.- Distribución del tráfico de pasajeros.	131
Gráfico 18.- Distribución del tipo de tráfico.	131
Gráfico 19.- Estacionalidad del tráfico.	132
Gráfico 20.- Evolución estacional del consumo eléctrico en el Aeropuerto de Sevilla.	136
Gráfico 21.- Distribución del consumo eléctrico en Edificio Terminal.	137
Gráfico 22.- Emisiones generados por los grupos electrógenos.	138
Gráfico 23.- Distribución por equipos de la potencia de refrigeración que abastece el Edificio Terminal.	146
Gráfico 24.- Distribución por equipos de la potencia de calefacción que abastece el Edificio Terminal.	146
Gráfico 25.- Curva monótona de carga de refrigeración estimada para el Aeropuerto de Sevilla.	150
Gráfico 26.- Curva monótona de carga de calefacción estimada para el Aeropuerto de Sevilla.	150
Gráfico 27.- Emisiones generadas por las alternativas de refrigeración.	154
Gráfico 28.- Costes de las alternativas de refrigeración.	154
Gráfico 29.- Emisiones generadas por las alternativas de calefacción.	155
Gráfico 30.- Costes de las alternativas de calefacción.	156
Gráfico 31.- Curva de distribución de calefacción.	156
Gráfico 32.- Costes de las alternativas de calefacción (contemplando Geotermia + Caldera de Gas	

natural).	157
Gráfico 33.- Comparativa de costes para calefacción incluyendo emisiones.	159
Gráfico 34.- Curva de distribución de la demanda de refrigeración.	160
Gráfico 35.- Comparativa final de costes para climatización.	161
Gráfico 36.- Comparativa final de emisiones para climatización.	161
Gráfico 37.- Comparativa final de costes para climatización incluyendo emisiones.	162
Gráfico 38.- Emisiones ahorradas en climatización con la medida propuesta.	168
Gráfico 39.- Comparativa entre la curva de generación fotovoltaica y la curva anual de consumo eléctrico de la Terminal.	176
Gráfico 40.- Emisiones ahorradas con la instalación fotovoltaica.	177
Gráfico 41.- Curva de potencia del aerogenerador elegido.	184
Gráfico 42.- Obtención de la Curva de distribución de Weibull a partir de los datos de la Rosa de Vientos.	186
Gráfico 43.- Obtención de la distribución discreta de la velocidad del viento a partir de la curva de Weibull.	186
Gráfico 45.- Curvas anuales de consumo.	189

Sección Primera

1 CONSIDERACIONES GENERALES

Toda verdad atraviesa tres fases: primero, es ridiculizada; segundo, recibe violenta oposición; tercero, es aceptada como algo evidente.

Arthur Schopenhauer

1.1 El Cambio Climático como principal motivación

1.1.1 Contexto actual del problema y legislación

El cambio climático o calentamiento global, es casi con total seguridad el principal reto a nivel global con el que se ha encontrado la humanidad en toda su historia, ya que, debido a este fenómeno, mediante modelos matemáticos predictivos cada vez más sofisticados y precisos, los científicos vaticinan, aunque podría ser más acertado decir que *aseguran*, consecuencias desastrosas a medio y largo plazo para el ser humano y el resto de habitantes de nuestro planeta.

En primer lugar, conviene dejar claro que el cambio climático, entendido como transformación radical del clima del planeta debida al calentamiento atmosférico, es una realidad más allá de toda duda razonable, habiendo sido este fenómeno ampliamente estudiado por la comunidad científica internacional, a través de infinidad de mediciones y estudios realizados a lo largo de las últimas décadas. Asimismo, el consenso científico sobre el origen antropogénico del mismo es también enorme, de acuerdo con un estudio (Cook, y otros 2013), el 97,1% de los estudios científicos publicados durante los últimos 20 años que analizaban las causas del cambio climático señalaban al hombre como el principal culpable, fundamentalmente a través de las emisiones de GEI ocasionadas por la quema de combustibles fósiles. En este estudio solo un 1,8% de los estudios analizados rechazan esta teoría.

Sin embargo, pese a la abrumadora cantidad de evidencias científicas, aún existen importantes frentes negacionistas que, en muchos casos basados en argumentaciones sin criterio científico o ya rebatidas por la ciencia, se empeñan en negar que dicho fenómeno realmente exista o, al menos, que este causado por el ser humano. Esta opinión, la cual contribuye al freno que, a menudo, reciben ciertas acciones políticas pensadas para luchar contra el cambio climático (como en el caso de los EEUU), tiene su origen, principalmente, en los fuertes intereses económicos que mueven a los lobbies del petróleo, los cuales pretenden que el mundo prosiga el mayor tiempo posible con su voraz consumo de hidrocarburos. Esta polarización de la opinión pública está causada, además, por el hecho de que, *“cuando la gente puede identificar fácilmente un impacto medioambiental negativo, y es capaz de encontrar un origen claro, es más probable que proteste o se oponga a dicha actividad que si estos impactos son difíciles de identificar y explicar, como es el caso del cambio climático”* (Perl, Paeterson y Pérez 1997).

Pese a todo, un cambio en los modelos energéticos (más despacio o más deprisa, más efectivo o inefectivo), resulta inevitable, y un conjunto de medidas y objetivos recogidos en distintos acuerdos o marcos de actuación internacionales ya han sido creados con el objetivo de disminuir la emisión de estos gases. A nivel global el más importante de éstos es el Protocolo de Kyoto:

- **Protocolo de Kyoto:** Creado a partir de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992 y adoptado en Kyoto, Japón, en 1997, es un acuerdo internacional que tiene como objetivo la reducción de las emisiones de GEI. Su objetivo inicial fue una reducción de al menos el 5% en la emisión de estos gases durante el periodo 2008-2012 respecto al nivel de 1990. Este objetivo fue repartido entre los países firmantes de modo que, aquellos que más hubiesen contribuido históricamente al aumento de CO₂ atmosférico, asumían los objetivos más exigentes. En el caso de la UE se acordó una reducción de un 8%, mientras que para España se fijó un máximo en las emisiones de un 15%. Ratificado por la mayoría de las potencias económicas del mundo, destaca la ausencia de EEUU, que aunque sí firmó el acuerdo de forma meramente simbólica, nunca llegó a ratificarlo.

El Protocolo ha sido ampliado hasta 2020 por la conocida como Enmienda de Doha, acordada en la decimotercera Conferencia de las Partes (COP 13), aunque dicha enmienda aún no ha sido ratificada. Por otro lado, un nuevo marco regulatorio debe ser negociado durante la próxima COP de París en diciembre de 2015, aunque se teme la oposición de países como China o India a la hora alcanzar acuerdos vinculantes para la disminución de los GEI como los logrados en Kyoto.

Mientras tanto, a nivel europeo ya existe un importante conjunto de leyes orientadas a frenar el cambio climático. Estas leyes abarcan desde el régimen de comercio de derechos de emisión (ETS-EU), hasta directivas en materia de supervisión y notificación de emisiones, captura y almacenamiento de carbono o medidas en el campo del transporte y los combustibles fósiles. Actualmente, los programas y estrategias europeas más importantes, a medio y largo, en relación con las emisiones de GEI son:

- **Programa Europeo para el Cambio Climático.-** Consta de 2 programas o paquetes de medidas. El primero de ellos fue tomado por la Comisión Europea con el objetivo de facilitar las metas pactadas en el Protocolo de Kyoto. El segundo fue lanzado en 2005, con el propósito de *explorar opciones más rentables para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en sinergia con la Estrategia de Lisboa para incrementar el crecimiento económico y crear empleo*. Entre las medidas tomadas hasta ahora destacan una propuesta para fomentar el uso de biocombustibles y una iniciativa para fomentar el uso de energías renovables para la generación de calor.
- **Plan de Acción Horizonte 2020.-** Marca unos objetivos, conocidos como objetivos 20-20-20, los cuales persiguen:
 - Una reducción del 20% en las emisiones de GEI en la UE respecto a los niveles de 1990.
 - Aumentar el porcentaje de la energía consumida en la UE producida por fuentes de energías renovables hasta un 20%.
 - Mejorar la eficiencia energética en la UE un 20%.

Siguiendo esta línea de acción, los objetivos fijados para 2030 son por el momento 40-27-27, es decir, 40% en reducción de GEI respecto a 1990, renovables en un porcentaje del 27% para el total de energía consumida y aumento de la eficiencia en un 27%. Para 2050 se ha marcado un objetivo de reducción de entre un 80% y un 95% de las emisiones.

Para sacar adelante estos planes se hace hincapié no sólo en los beneficios medioambientales derivados de conseguir estos objetivos, sino en las ventajas en cuanto a independencia energética y puestos de trabajo que podrían crearse. En particular, se estima que para conseguir los objetivos del horizonte 2020 podrían crearse unos 417.000 puestos de trabajo directos para alcanzar el objetivo de impulso a las renovables, y 400.000 para lograr el objetivo de eficiencia. Además, 1.500.000 puestos de trabajo indirectos adicionales podrían crearse si los gobiernos usasen los beneficios obtenidos de los impuestos sobre el CO₂, y de las subastas de los derechos de emisiones, para reducir los costes laborales (European Commission s.f.).

En cuanto a los análisis científicos, el quinto y último informe elaborado por el Panel Intergubernamental de la ONU sobre Cambio Climático (IPCC) resulta el más exhaustivo hasta la fecha y el que usa los datos más actualizados. En él se enumeran una serie de riesgos a los que se asignan distintos valores de probabilidad, y solamente tomando las previsiones con menor nivel de incertidumbre el panorama resulta desolador: aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas, inundaciones, olas de calor y sequías en todo el planeta, que supondrán graves problemas sanitarios y elevados costes económicos derivados de la falta de agua, la pérdida de la productividad de los cultivos, cortes de electricidad, etc. Además, aumentará el nivel de las aguas, lo que tendrá consecuencias catastróficas en muchas zonas costeras altamente pobladas. Finalmente, los daños a la fauna y flora se prevén también incalculables a través del empobrecimiento de los ecosistemas, por ejemplo, la acidificación de los océanos supondrá la sentencia de muerte para los arrecifes de coral y para otras muchas formas de vida marinas (IPCC 2014). Este estudio subraya la importancia de no superar un aumento de 2°C respecto a la temperatura media global de la era preindustrial, objetivo considerado razonablemente realista, y necesario para disminuir en lo posible la probabilidad de sufrir los daños irreversibles más graves.

Es pues evidente que, si no se toman las medidas oportunas para frenarlo, los costes sociales, financieros y ecológicos, que con toda probabilidad derivarán del cambio climático, sobrepasarán todo intento de cálculo o estimación. En estos momentos es imprescindible invertir un gran esfuerzo colectivo para impedir que las peores previsiones lleguen a cumplirse, siendo necesarias acciones políticas efectivas a escala global, ya que los acuerdos internacionales, y las políticas nacionales existentes para reducir las emisiones, se ven a todas luces

insuficientes.

A la espera de un gran pacto internacional que siga los pasos del Protocolo de Kyoto, y de leyes más exigentes o restrictivas, las prácticas voluntarias de reducción de emisiones que adoptemos todos y cada uno de nosotros constituyen un punto clave, tanto para frenar en lo posible el avance del desastre, como para mandar un mensaje de concienciación a las instituciones y al resto del mundo.

En los aeropuertos, por su parte, la concienciación con el cambio climático aún parece ser un factor secundario, si bien emergente, en la toma de decisiones en materia de sostenibilidad. Si bien muchas de estas prácticas existentes, al menos en grandes aeropuertos, están destinadas al aumento de eficiencia energética o la reducción de emisiones, entre los principales motores de estas medidas, actualmente, se encuentran las regulaciones estatales o regionales, o las políticas de reducción de costes, mientras que la lucha contra el cambio climático aún se encuentra en un segundo plano. En un futuro, no obstante, se espera que la concienciación aumente, y que, gracias a ello, la presión de las partes interesadas y accionistas se sitúe como el factor determinante para la implantación de este tipo de medidas, lo que puede suponer un acicate incluso mayor al que puedan ejercer las regulaciones existentes en materia ambiental de forma directa (Berry, Gillhespy y Rogers 2008).

1.1.2 Aclaración de conceptos

Tras esta breve llamada de atención sobre la que será nuestra principal motivación a la hora de llevar a cabo actuaciones de reducción de emisiones en aeropuertos, conviene aclarar varios conceptos sobre la física básica del problema, a los que podremos referirnos más adelante en este proyecto, como son el propio fenómeno del cambio climático y los concernientes a las emisiones que lo provocan, es decir, los GEI expulsados a la atmósfera en el desarrollo de las actividades aeroportuarias, o la llamada Huella de Carbono.

- **Cambio Climático.-** Su definición más general se refiere a la simple modificación del clima producida tanto a nivel global como regional, a muy diversas escalas de tiempo, y debida a causas tanto naturales como antropogénicas. Sin embargo, es hoy día más común emplear este término como sinónimo del fenómeno de calentamiento global, es decir, como el cambio climático provocado por la actividad humana. En este sentido se entiende por Cambio Climático “*un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables*” (UNFCCC 1992). El concepto de cambio climático puede entenderse, además, si bien no como un sinónimo, sí como una ampliación del concepto de calentamiento global, englobando todas sus consecuencias a nivel climático.
- **Calentamiento Global.-** Se refiere al aumento de la temperatura media global de la atmósfera y los océanos registrado a lo largo de las últimas décadas. El gráfico 1, que recoge la evolución de las temperaturas medias globales desde 1880, resulta ilustrativo de este fenómeno:

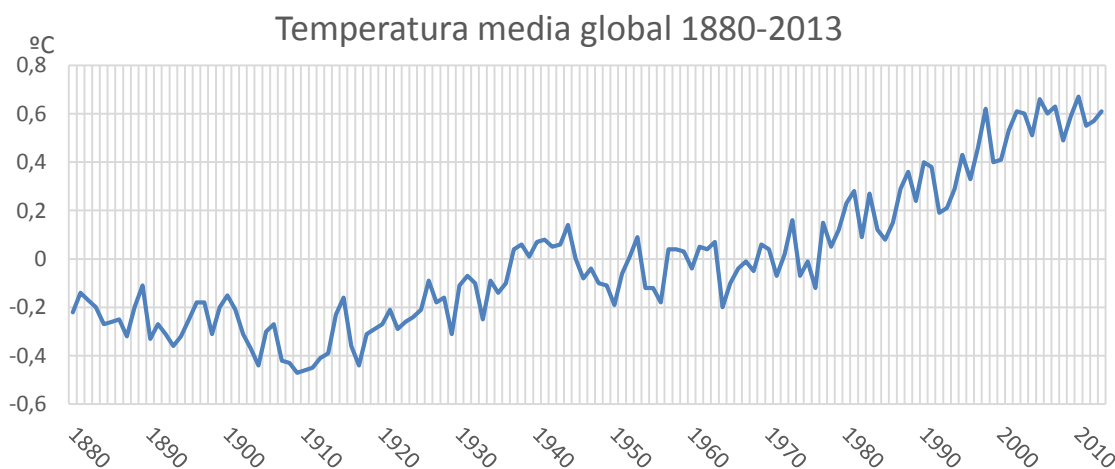


Gráfico 1.- Evolución de la temperatura media global desde 1880¹.

La teoría antropogénica, es decir, aquella que atribuye dicho problema al efecto invernadero producido

¹ Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de NASA, GISS.

por el hombre, es la más aceptada a día de hoy por la comunidad científica, según el IPCC “*la mayoría de los aumentos observados en la temperatura media del globo desde la mitad del siglo XX, son muy probablemente debidos al aumento observado en las concentraciones de gases de efecto invernadero antropogénicas*” (IPCC 2014).

- **Efecto invernadero.**- Efecto producido por la concentración de ciertos gases en la atmósfera planetaria, por el que se retiene parte del calor recibido en forma de radiación solar. En la Tierra este fenómeno se está acentuando por la emisión de gases procedentes de la actividad humana, como el dióxido de carbono o el metano. Un esquema del proceso se ofrece en la Imagen 1.
- **Gases de efecto invernadero (GEI).**- Aquellos cuya presencia en la atmósfera contribuye a acrecentar el efecto invernadero. Aunque la mayoría se encuentran de forma natural en la atmósfera, la actividad humana provoca la emisión muchos de ellos aumentando notablemente sus concentraciones en la atmósfera. La contribución al calentamiento global se mide mediante el llamado potencial de calentamiento global (GWP), o índice GWP, valor que mide la cantidad de calor atrapado por una sustancia en relación a la cantidad de calor atrapado por la misma cantidad de CO₂ (cuyo GWP sería por tanto la unidad). El índice GWP suele calcularse para periodos de tiempo de 20, 100 o 500 años. En la Tabla 1 se recogen los tiempos de permanencia en la atmósfera y GWP para varios gases. Los principales son:
 - **Dióxido de Carbono (CO₂).**- El GEI, de entre los generados por el hombre, emitido en mayor cantidad, y que, por esta razón, es el que más contribuye al efecto invernadero. Es generado principalmente en los procesos de combustión destinados a la obtención de energía calorífica a partir de combustibles fósiles, y en menor medida en la producción de cemento. Su tiempo medio de permanencia en la atmósfera es de unos 100 años.

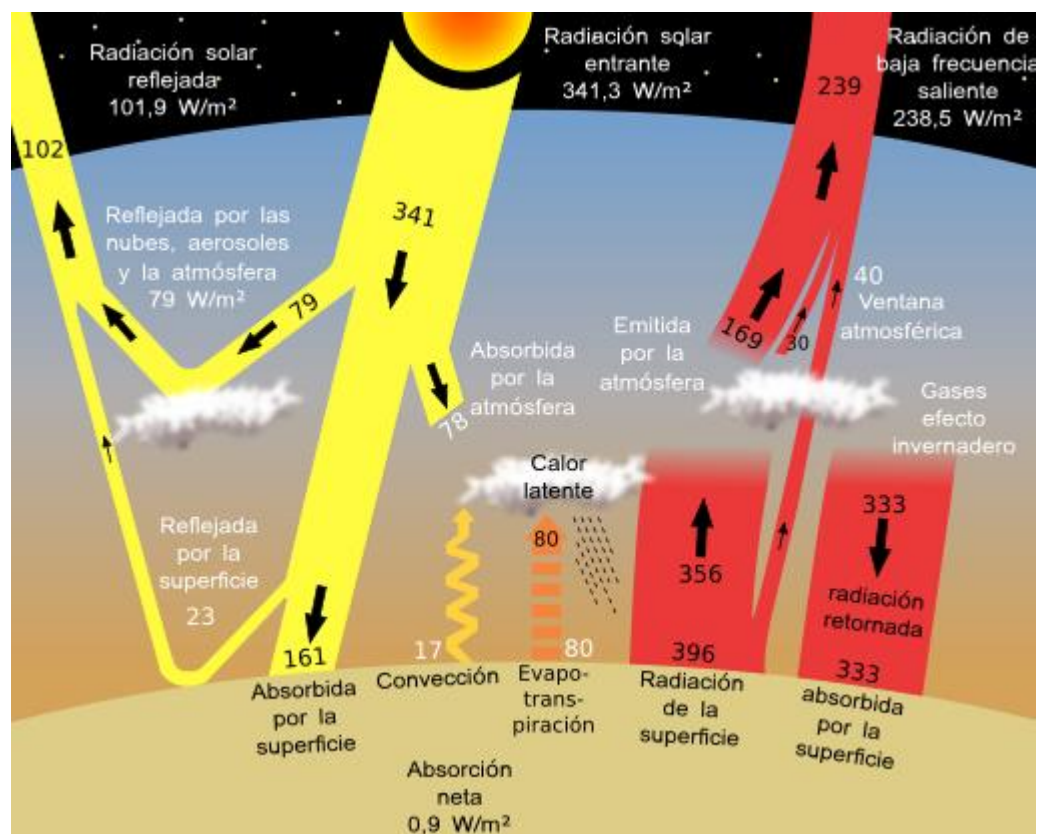


Imagen 1.- Ilustración del balance de radiación solar sobre la superficie terrestre.²

- **Metano (CH₄).**- Su concentración en la atmósfera es más de 200 veces menor a la del CO₂ aunque su GWP es unas 23 veces mayor. Es el principal componente del gas natural (hasta un 97%) y es emitido por el ser humano mayoritariamente a través de la ganadería y el sector energético (como fugas de gas natural). Otras fuentes antropogénicas importantes de metano

²Fuente: Wikimedia Commons (dominio público). Basado en datos del periodo entre marzo de 2000 y mayo de 2004.

son los vertederos y el tratamiento de basuras.

- **Óxidos de nitrógeno (NO_x).**- Se generan en los procesos de combustión, especialmente a altas temperaturas, como las que se alcanzan en los motores de las aeronaves. Presenta largo tiempo de permanencia en la atmósfera y su GWP es muy elevado, por lo que supone un gran peligro. Afortunadamente su concentración en la atmósfera es bastante reducida, así como su volumen de emisión por el ser humano comparado con los demás.
- **Gases fluorados:**
 - **Fluorocarbonatos (CFC).**- Presentes fundamentalmente en líquidos refrigerantes, son causa importante de la destrucción de la capa de ozono, y su uso está muy limitado en la actualidad por el Protocolo de Montreal, por lo que han sido mayoritariamente sustituidos por los HFCs.
 - **Hidrofluorocarbonos (HFCs).**- Los más comunes actualmente entre los gases fluorados. Empleados como refrigerantes o como agentes espumantes en extintores de incendios, en aerosoles o disolventes.
 - **Perfluorocarbonos (PFCs).**- Empleados en el sector electrónico y en la industria cosmética y, en menor medida, en refrigeración. Poseen GWP muy elevados.
 - **Hexafluoruro de azufre (SF₆).**- Posee un GWP elevado y es cada vez más usado en aplicaciones eléctricas por sus buenas condiciones aislantes y estabilidad térmica y química. Su contribución al efecto invernadero es, sin embargo, actualmente muy pequeña.
- **Vapor de agua.**- Es el principal gas de efecto invernadero, aunque la actividad humana no aumenta de forma directa su concentración en la atmósfera excepto a un nivel local. Una excepción importante son las estelas dejadas por los motores de los aviones, cuya contribución al calentamiento global no es absoluto despreciable. Por otro lado, el aumento de la temperatura atmosférica está provocando un aumento de la concentración de vapor de agua en la atmósfera, lo que actúa como un catalizador del proceso.

	Tiempo de permanencia en la atmósfera (años)	GWP	
		20 años	100 años
Metano	12,4	84	28
HFC-134a	13,4	3.710	1.300
CFC-11	45	6.900	4.660
CFC-12	100	10.800	10.200
Óxido nitroso	121	264	265
SF ₆	3.200	17.500	23.500
PCF-14	50.000	4.880	6.330

Tabla 1.- Tabla de propiedades de los GEI más importantes³.

- **Dióxido de Carbono equivalente (CO₂eq).**- Se define como la concentración de CO₂ que causaría el mismo nivel de forzamiento radiativo (o efecto invernadero) que un determinado tipo y concentración de un gas de efecto invernadero.
- **Huella de Carbono.**- Se trata de un concepto surgido en las últimas décadas, entendido como “la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o

³ Fuente: IPCC (5th Assessment Report).

producto” (Carbon Trust 2008). Con los procedimientos apropiados es posible calcular la Huella de Carbono generada por cada una de las distintas actividades, equipos o instalaciones de un aeropuerto, lo que nos permitirá identificar las principales fuentes de emisión de GEI, y buscar soluciones que provoquen una reducción y/o compensación de la misma. La Huella de Carbono se mide en dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

1.1.3 El valor de las emisiones para su inclusión en un análisis de costo-beneficio

A la hora de realizar un estudio de costes de un proyecto de ingeniería, los costes externos ocasionados por la contribución que dicho proyecto pueda tener al cambio climático, generalmente a raíz de las emisiones de GEI generadas, no son a menudo tenidos en cuenta si no existe una obligación legal para ello. Sin embargo, como hemos visto anteriormente, el coste económico que estas emisiones pueden suponer para la sociedad puede llegar a ser muy elevado y, en el caso de empresas que mantengan un importante compromiso medioambiental, y deseen incorporar criterios de sostenibilidad en su toma de decisiones, puede resultar deseable tener estos costes en consideración, es lo que se denomina un proceso de internalización de costes.

En general, ha sido demostrado que una falta de internalización suele suponer una desventaja para aquellos modelos que causan menor daño medioambiental, así como para aquellos que generan mayores beneficios sociales (INFRAS/IWW 1995).

Este proceso se realiza asignando un precio a cada tonelada de CO₂ (o CO₂eq) emitido. La selección de dicho valor no es una tarea baladí, sino que se presenta en muchos casos sumamente complicada por existir un alto grado de incertidumbre. En general, suelen emplearse dos tipos de aproximaciones para la estimación de dicho valor: una directa, basada en el cálculo del coste social marginal, y otra indirecta, basada en el cálculo del precio sombra, tal como se discute en un estudio realizado a este respecto (Mandell 2011):

- **Coste social marginal.**- Es el coste “directo” que una unidad adicional de CO₂ emitida a la atmósfera infringe a la sociedad en su conjunto. Un estudio (Tol 2008) que recopiló los estimaciones del coste social marginal de otros 47 estudios obtuvo un conjunto de valores en un rango de entre -1,24€ a 451€ por tonelada de CO₂ emitido, a los que les correspondía una media de 19,7€ y una mediana de 5,45€ por tonelada. Esta dispersión suele ser debida a la dificultad que supone dar una correcta estimación a la ingente cantidad de factores que influyen en el resultado.
- **Precio sombra de las políticas de emisiones.**- Constituye un coste “indirecto” basado en las regulaciones existentes en materia de emisiones. A veces incluyen un coste económico o social que puede usarse en el cálculo del coste social marginal, pero a su vez, las tasas o límites impuestos por los órganos reguladores también suelen incluir una estimación de los costes sociales, estableciéndose así una especie de feedback entre ambos valores (Mandell 2011).

Este precio es más fácil de estimar que el anterior, aunque presenta una dificultad importante debida a la existencia de diferentes regulaciones en diferentes niveles, por ejemplo, a nivel internacional, la principal norma es el Protocolo de Kyoto, sin embargo, también existe una política climática para los países de pertenecientes a la UE, además de políticas nacionales en los países miembros. De entre estas regulaciones, conviene obviar aquellas que no sean vinculantes, es decir, de obligado cumplimiento, y de entre ellas elegir siempre la más restrictiva.

En el caso de la Unión Europea, la legislación que más contribuye a fijar un precio sombra en la actualidad para las emisiones de CO₂, es la correspondiente al mercado de derechos de emisión que se puso en marcha en 2005 mediante la Directiva 2003/87/CE, transpuesta en la legislación española por la Ley 1/2005. Esta legislación afecta solo a las emisiones generadas en algunas actividades, normalmente aquellas que presentan una mayor intensidad de emisiones. Recientemente se ha incluido entre ellas a la aviación, sin embargo, la actividad aeroportuaria aún no se encuentra sometida a esta normativa (al menos en el caso de que no posean sistemas de generación energética, incluidos los de cogeneración y excluidos otros sistemas basados en energías renovables con potencia nominal superior a 20 MW).

1.1.4 Motivaciones adicionales

La tendencia a incorporar prácticas de eficiencia energética y energías limpias en nuestro día a día, ya sea en

casa o a nivel empresarial o industrial, puede responder a otros motivos a parte del puramente medioambiental. A continuación comentamos los más importantes:

- **Un ahorro económico, derivado de un ahorro energético.**- En general, a la hora de la aprobación del proyecto correspondiente, la capacidad de recuperación de la inversión del mismo constituirá el factor determinante. En particular, muchas de las acciones más adelante comentadas supondrán mejoras de eficiencia energética, es decir, conllevarán un ahorro energético, que se traducirá a su vez en un ahorro económico, principalmente operacional (costes directos), pero también de mantenimiento, mano de obra, etc. (costes indirectos).
- **Un ahorro económico derivado de la implantación de fuentes de energía renovables.**- Los sistemas de generación basados en energías renovables, si bien presentan inversiones iniciales muy elevadas, pueden suponer un ahorro energético a medio o largo plazo. Esto es debido a que, en general, proporcionan un ahorro económico operacional, al obtener energía de manera más barata que con los combustibles fósiles, a lo que además debemos sumar los beneficios fiscales que este tipo de energías suelen recibir por parte del estado. Además, en el caso de ser usadas para la generación de energía eléctrica, cabría la posibilidad de vender la energía sobrante generada, siempre que la legislación lo permita, mediante su incorporación a la red pública, lo que puede ser también de gran ayuda a la hora de acelerar la recuperación de la inversión. Por otro lado, el progresivo abaratamiento de los costes, y las constantes mejoras tecnológicas, en pos de unos niveles de eficiencia cada vez mayores, contribuyen a que a menudo sean una opción más a tener en cuenta, si bien aún queda mucho camino que recorrer en este sentido.
- **Ganar en seguridad de abastecimiento.**- Al incorporar fuentes energéticas propias, como por ejemplo paneles solares para agua caliente sanitaria, o aerogeneradores para la obtención de energía eléctrica, conseguimos aumentar nuestra independencia energética, con lo que nos ahorramos ciertos riesgos debidos a factores o agentes externos que escapan del control del aeropuerto. Del mismo modo, a un nivel estatal, en países como España, donde los combustibles fósiles son obtenidos principalmente de la importación, lograr una baja dependencia energética de los combustibles fósiles puede conseguirse aumentando el porcentaje de electricidad obtenida por fuentes renovables en sustitución de la obtenida por centrales térmicas de gas o carbón, de esta forma, además, se disminuye el peligro derivado de las fluctuaciones constantes en los precios de los combustibles fósiles en los mercados internacionales.
- **Mayor cumplimiento con requisitos legales.**- Los requisitos en materia de eficiencia energética y emisiones por parte de las administraciones públicas y otras autoridades son cada vez más exigentes, por lo que cualquier avance en este sentido será ventajoso en un futuro, ya que nos permitirá estar mejor preparados para adaptarnos a futuros estándares de emisiones o marcos legales. Actualmente, todos los sectores económicos en los países desarrollados está avanzando en este sentido, y, por supuesto, el sector aeroportuario no debe quedarse atrás.
- **Mayor aceptación por parte de la sociedad.**- El compromiso social con el medioambiente, y la concienciación frente al cambio climático cada vez son mayores en la sociedad actual. Tampoco hay que olvidar que, después de todo, el principal cliente de un aeropuerto es el ciudadano, por lo que si éste demanda servicios cada vez más sostenibles y responsables con el medio ambiente, en un entorno de alta competitividad, los aeropuertos están obligados a dar respuesta a dicha demanda.

1.1.5 Otros impactos ocasionados por la actividad aeroportuaria

Es importante tener presentes otros impactos ambientales importantes que pueden aparecer, entre otros:

- Contaminación atmosférica local

Entre los gases emitidos por la actividad aeroportuaria existe, además, una especial preocupación por aquellos que producen contaminación atmosférica local, empeorando la calidad del aire en el entorno del aeropuerto. Los más importantes son el CO, el CO₂, los hidrocarburos, los NO_x, los óxidos de azufre, los aerosoles, o PM (especialmente aquellos de diámetro menor denominados PM_{2.5}) y el ozono.

Estos gases son emitidos por procesos de combustión y pueden tener efectos sobre la salud muy perjudiciales. Por ejemplo, un estudio (Barrett, Britter y Waitz 2010) estimó que aproximadamente unas 10.000 muertes prematuras al año en todo el mundo son ocasionadas por las emisiones de las aeronaves (las cuales emiten muchos de estos contaminantes en el entorno del aeropuerto), cifra que sin embargo puede ser muy inferior a la real, ya ésta ha sido aumentada de 800.000 a 7 millones recientemente por la OMS (OMS 2014).



Imagen 2.- Gases de escape de un avión despegando⁴.

- Uso del suelo

Los aeropuertos, prácticamente por definición, necesitan de amplias zonas para llevar a cabo sus funciones. Un aeropuerto sostenible, sin embargo, debe hacer un uso eficiente del suelo, es por ello que antes de realizar un proyecto dentro del sistema aeroportuario, en el que se deba construir un nuevo edificio o instalación, o pavimentar una nueva zona de terreno, deberá estudiarse la posibilidad de aprovechar mejor las instalaciones ya existentes o las zonas ya pavimentadas, evitando de esta forma causar un daño innecesario al medio ambiente. Debe siempre tenerse presente que la obra más sostenible es siempre la que no se realiza.

- Contaminación del suelo y agua subterránea

Varios focos de contaminación del suelo y acuíferos en los aeropuertos son, principalmente: las actividades realizadas en los talleres de reparación y mantenimiento de las aeronaves, en los que se manipulan diversas sustancias potencialmente contaminantes; la manipulación de hidrocarburos, tanto para dar servicio a las aeronaves, como para su empleo en vehículos terrestres que actúan en la zona de maniobras; y el uso de pesticidas en áreas ajardinadas o en el entorno de las pistas. Se deberá estudiar, por tanto, la posibilidad de que se produzca este tipo de contaminación en cualquier nuevo proyecto que se realice en el aeropuerto, y el estudio de dicho riesgo deberá ir acompañado de un estudio geológico, litográfico e hidrológico del terreno en la zona concreta donde vaya a realizarse.

- Ruido

El ruido en el entorno aeroportuario es un impacto medioambiental de gran importancia, lo cual es debido, principalmente, a los altos niveles de ruido alcanzados por las turbinas de los aviones durante las operaciones de aterrizaje, y especialmente en el despegue, al ser ésta la fase en la que los motores operan más cerca de su máxima potencia. Dicho impacto, además, se agrava si existe proximidad entre el aeropuerto y zonas residenciales, en cuyo caso, suelen tomarse medidas de insonorización y o de limitación del número de operaciones en determinados tramos horarios, llegándose incluso a la necesidad de cerrar las pistas por este motivo.

⁴ Fuente: <http://www.steadyhealth.com>

1.2 Las emisiones en el transporte aéreo y los aeropuertos en particular. Clasificación de emisiones.

El transporte aéreo afecta al medioambiente mediante la emisión de sustancias contaminantes desde las aeronaves y las infraestructuras aeroportuarias. Estas sustancias contribuyen a la contaminación del aire, tanto a un nivel local, afectando directamente a la salud de la población cercana a los aeropuertos, como a un nivel global, contribuyendo al fenómeno del calentamiento global (D.S. Lee 2010). En particular, se ha estimado la contribución del transporte aéreo en torno a un 2,5% para el total de las emisiones anuales de CO₂, lo que significa un 13% de todas las emisiones generadas en el sector de los transportes (D. S. Lee 2009). Se prevé que estas emisiones seguirán aumentando a un ritmo de en torno a un 6% anual en los próximos años (Macintosh y Wallace 2009).

En la actualidad, la concienciación en el sector aeronáutico es elevada, y pese a que en éste resulta a menudo más complicado el desarrollo de mecanismos normativos para reducir emisiones que en otros sectores consumidores de combustibles fósiles, objetivos colectivos a nivel global han sido tomados por gobiernos e instituciones internacionales a través de ICAO, los cuales persiguen alcanzar el máximo nivel de emisiones de CO₂ en 2020 y reducir las emisiones en 2050 hasta los niveles de 2005 (ATAG 2010a). La estrategia para lograr estos objetivos se asienta en cuatro pilares fundamentales:

- **Tecnología.-** Mediante nuevos diseños de aeronaves y motores, avances en materiales compuestos que permitan disminuir el peso, y el desarrollo de nuevos combustibles para aeronaves que permitan reducir las emisiones de CO₂ hasta un 80% (ATAG 2010b).
- **Operaciones.-** Principalmente mediante procedimientos de vuelo más eficientes o la menor utilización de las APU en favor de otras alternativas menos contaminantes.
- **Infraestructura.-** Supone otro importante campo de actuación, el cual comprende principalmente las actividades aeroportuarias, las cuáles constituyen el principal interés del presente documento; y las mejoras en la gestión del tráfico aéreo.
- **Medidas económicas.-** Constituyen un acicate económico para impulsar las medidas anteriores. Su ejemplo más claro es la inclusión de las emisiones de las aeronaves en el EU ETS (European Union Emissions Trading Scheme).

La gran mayoría de las emisiones generadas por el transporte aéreo, entorno a un 95% (Milan 2011), son ocasionadas por la quema de combustible en las aeronaves, lo que supone una contribución al calentamiento del planeta de entorno 4% (Jardine 2005). Este gran impacto se debe, en parte, a que un alto porcentaje de los GEI emitidos son expulsados muy cerca de la estratosfera, capa en la que gases y partículas permanecen gran tiempo en suspensión, y en la que los GEI, por tanto, poseerán un potencial de calentamiento mucho mayor.

Un área de mejora que podría ser muy prometedora a corto plazo para reducir estas emisiones es la basada en los nuevos combustibles para aeronaves, menos contaminantes que el keroseno, pero cuyo avance, sin embargo, se ve muy limitado por el complejo y costoso proceso de desarrollo, y los largos periodos de prueba a los que deben enfrentarse, además, la feroz competencia entre aerolíneas solo da viabilidad a las opciones más económicas, lo que supone otro freno importante (Hari, Yaakob y Binitha 2015). Pese a ello, prometedores avances se están consiguiendo a nivel operacional, como es el caso de la maniobra de Aproximación en Descenso Continuo (CDA), cuyo empleo se espera siga extendiéndose y optimizándose para densidades de tráfico cada vez mayores.

No menos preocupante es el problema de las estelas de vapor generadas en las turbinas de las aeronaves, las cuales están formadas por diminutos cristales de hielo que impiden la salida de radiación solar del planeta, contribuyendo al efecto invernadero. Contra lo que pueda parecer en un principio, la contribución de dichas estelas no es para nada despreciable, por el contrario, se ha calculado que éstas contribuyen al calentamiento del planeta tanto como el CO₂ emitido por los motores de los aviones (IPCC 1999). Desgraciadamente, la tarea de reducir o eliminar las estelas de vapor está muy limitada técnicamente, y aunque se ha propuesto reducir la altura de vuelo de las aeronaves comerciales a una altura suficiente para que éstas no aparezcan, dicha propuesta no parece destinada a salir adelante (Milan 2011).

Las emisiones generadas por los aeropuertos, por otro lado, y aunque solo asciendan al 5% restante de las ocasionadas por el transporte aéreo, sí pueden ser objeto de medidas de reducción de emisiones con las que conseguir resultados significativos a más corto plazo. La variedad de estas medidas, además, será muy amplia,

ya que las fuentes de emisiones que podremos encontrar dentro de los mismos serán numerosas. A continuación identificaremos e introduciremos brevemente las distintas áreas que comprenderán las principales fuentes de emisión de GEI del sistema aeroportuario y que serán objeto de nuestro estudio a partir del próximo capítulo, en el que se tratarán medidas de eficiencia energética relativas a los sistemas de control y las O&M del aeropuerto.

- **Climatización.-** En torno a un 50% - 60% de la energía consumida en un aeropuerto corresponde a la climatización del mismo (Galludo y Navarro 2006). En principio todos los edificios del aeropuerto pueden contar con sistemas de climatización: zonas terminales, torre de control, edificios de mantenimiento de aeronaves, u edificios que alberguen otros servicios, como el SEI. En general, dispondrán de climatización tanto los servicios propios del aeropuerto como, en general, todos los establecimientos comerciales ubicados en el mismo.
- **Iluminación.-** Supone aproximadamente el 20% del consumo eléctrico en la mayoría de edificios del sector terciario (Benya, y otros 2003), en aeropuertos, sin embargo, este porcentaje puede llegar hasta el 40% (Lau, Stromgen y Green 2010), y constituye generalmente el segundo factor de demanda energética más importante, el cual abarca tanto la iluminación interior de las terminales, como la iluminación del área de movimiento (pistas, calles de rodaje y plataformas), así como viales de acceso, parkings, otras zonas de movimiento de vehículos, etc.
- **Generación de electricidad.-** Se realizará un estudio de los posibles sistemas de generación eléctrica en el propio aeropuerto, prestando especial atención a aquellos que empleen fuentes de energías renovables, como son la solar, eólica, geotérmica o de biomasa, los cuales pueden ofrecer una alternativa limpia y económica a las fuentes empleadas tradicionalmente.
- **Asistencia en tierra a las aeronaves.-** Para el desempeño de esta labor, básica en la operación aeroportuaria, son necesarios un buen número de equipos y vehículos (GSE), los cuáles constituirán, en general, una importante fuente de emisiones.
- **Acceso al aeropuerto.-** Corresponde al movimiento de aquellos vehículos que transportan pasajeros, acompañantes de estos, o trabajadores del aeropuerto, en las rutas de acceso al aeropuerto. Se estudiará la posibilidad de incorporar sistemas de transporte público u otros medios alternativos para comunicar el aeropuerto con otros puntos, y así reducir la contaminación generada por esta actividad. Muchas de las medidas que podrán tomarse en este campo necesitarán del apoyo y colaboración de otras instituciones, ya que escapan del control del gestor aeroportuario.
- **Movimiento de las aeronaves en tierra.-** Supone, generalmente, la mayor fuente de emisiones de GEI en el aeropuerto, sin embargo, al igual que sucede con los accesos al aeropuerto, la capacidad del aeropuerto para limitar estas emisiones resulta limitada. En general, la optimización de los recorridos que realizan las aeronaves en tierra, así como las condiciones en las que este recorrido se realiza, puede suponer un ahorro substancial de combustible y emisiones.

Las fuentes de emisión de GEI en aeropuertos pueden ser clasificadas según el alcance del que disponga el aeropuerto para influir sobre ellas, es decir, en función de la capacidad de maniobra del gestor aeroportuario en la gestión y control de las emisiones generadas por estas fuentes. Estos grupos aparecen definidos en la Tabla 2 según la clasificación realizada por ACI (ACI 2009).

Alcance 1	Emisiones de GEI de fuentes propiedad o controladas por el gestor aeroportuario.
Alcance 2	Emisiones de GEI procedentes de la generación externa, es decir, fuera de los límites del aeropuerto, de energía eléctrica aunque también energía térmica para calefacción y refrigeración, y que son compradas por el gestor aeroportuario.
Alcance 3	Emisiones de GEI procedentes de actividades relacionadas con el aeropuerto de fuentes que no son propiedad o no están controladas por el gestor aeroportuario. A su vez se divide en: <ul style="list-style-type: none"> - Alcance 3A: Emisiones sobre las que el operador aeroportuario puede influir, incluso sino controla las fuentes. - Alcance 3B: Emisiones sobre las que un operador aeroportuario no puede influir de ningún modo razonable.

Tabla 2.- Definición de Alcances por ACI.

En el primer grupo se incluyen, principalmente, las emisiones generadas por la quema de combustibles en el aeropuerto, ya sea para climatización, producción de electricidad, o en los vehículos que presten servicio en el aeropuerto, y que sean propiedad del operador del mismo. En el segundo grupo, se incluyen las emisiones generadas de forma indirecta por el consumo eléctrico del aeropuerto, en el caso de que esta electricidad sea comprada a la red pública. Por último, dentro del Alcance 3, se incluyen las emisiones ocasionadas en los desplazamientos de pasajeros y empleados del aeropuerto (aunque en el caso de que éstos trabajen para el aeropuerto las emisiones se pueden considerar como pertenecientes al Alcance 1), así como aquellas generadas por las operaciones de las aeronaves durante el ciclo LTO (Landing and Take-off), y por la operación de las unidades de potencia auxiliares (APUs), sobre los que el operador aeroportuario gozará en general de cierta influencia para lograr reducir las emisiones.

1.3 El consumo energético en los aeropuertos

Las emisiones de GEI en aeropuertos son casi siempre la consecuencia de un consumo energético, y son mayoritariamente debidas a la combustión de combustibles fósiles, ya sea de una manera directa en el propio aeropuerto mediante la quema de combustible para automóviles, calderas, equipos de generación eléctrica, etc., o de manera indirecta, si la combustión es realizada en algún otro lugar para generar la energía eléctrica que posteriormente será usada en el aeropuerto. Además, para un estudio totalmente exhaustivo, no deberán perderse de vista las emisiones generadas en la fabricación, almacenamiento y transporte de productos usados para el conjunto de actividades aeroportuarias.

Dada la estrecha relación existente, por tanto, entre las emisiones de GEI y la energía consumida, el estudio de éstas deberá realizarse necesariamente a través del estudio del consumo energético y la forma en que esta energía es producida. De esta forma, las principales medidas para la reducción de emisiones en un aeropuerto serán la reducción del consumo o el “ahorro” energético, el aumento de la eficiencia energética (ambos se tratarán de manera conjunta, entendiendo el ahorro energético como una forma de aumento de eficiencia, aunque en la literatura a menudo aparecen separadas), y el uso de energías limpias en sustitución de las energías convencionales basadas en los combustibles fósiles.

Los aeropuertos se encuentran entre las infraestructuras del sector servicios con mayor consumo energético, suponiendo éste entre un 10% y un 15% de los costes de operación, y constituyendo el segundo mayor gasto operacional tras los gastos de personal (Lau, Stromgen y Green 2010). En ellos, en general, nos encontramos con grandes edificios equipados con sistemas de climatización, tanto de calefacción (generalmente calderas alimentadas con diésel o gas natural o bombas de calor eléctricas), como de aire acondicionado o refrigeración (usualmente alimentados con electricidad adquirida de la red), además, existirá una demanda energética considerable para alumbrado, equipos electrónicos y otras instalaciones y servicios dentro del aeropuerto.

A continuación se presentan valores típicos de la energía específica consumida anualmente y la potencia específica instalada para electricidad, calefacción y aire acondicionado en terminales de aeropuertos:

	Electricidad	Calefacción	Aire Acondicionado
Potencia específica instalada	0,5 - 0,8 kW/pax	50 - 160 W/m ²	50 - 200 W/m ²
Energía específica consumida	4,5 - 5,8 kWh/pax	30 - 55 kWh/m ³	20 - 40 kWh/m ³

Tabla 3.- Rango de demandas energéticas de una terminal genérica⁵.

La energía consumida dependerá de un amplio número de factores, tanto correspondientes a las estructuras del aeropuerto (superficie, volumen, orientación, aislamiento, cerramientos, etc.) como concernientes a las operaciones (número de pasajeros anuales, horarios, niveles de ocupación medios, estacionalidad, etc.) o los negocios o servicios dentro del sistema aeroportuario. Junto a estos, las características climáticas del lugar en el que se encuentre jugarán un papel fundamental.

La mayor parte de la energía consumida en un aeropuerto es eléctrica, normalmente comprada a algún proveedor

⁵Fuente: (Cardona, Piacentino y Cardona 2006).

y suministrada a través de la red eléctrica pública. En este caso, a diferencia de las emisiones generadas por la quema de combustibles, las emisiones ocasionadas variarán considerablemente de un aeropuerto a otro, lo cual será función principalmente del mix eléctrico. De este modo, si la electricidad proviene en un alto porcentaje de energías renovables o de energía nuclear, las emisiones indirectas producidas por su consumo serán pequeñas, mientras que, si ésta es esencialmente generada a partir de fuentes contaminantes como el carbón, las emisiones serán elevadas. Para ilustrar esta variación, en la siguiente gráfica se muestran las emisiones asociadas al consumo eléctrico en diferentes países para el año 2009:

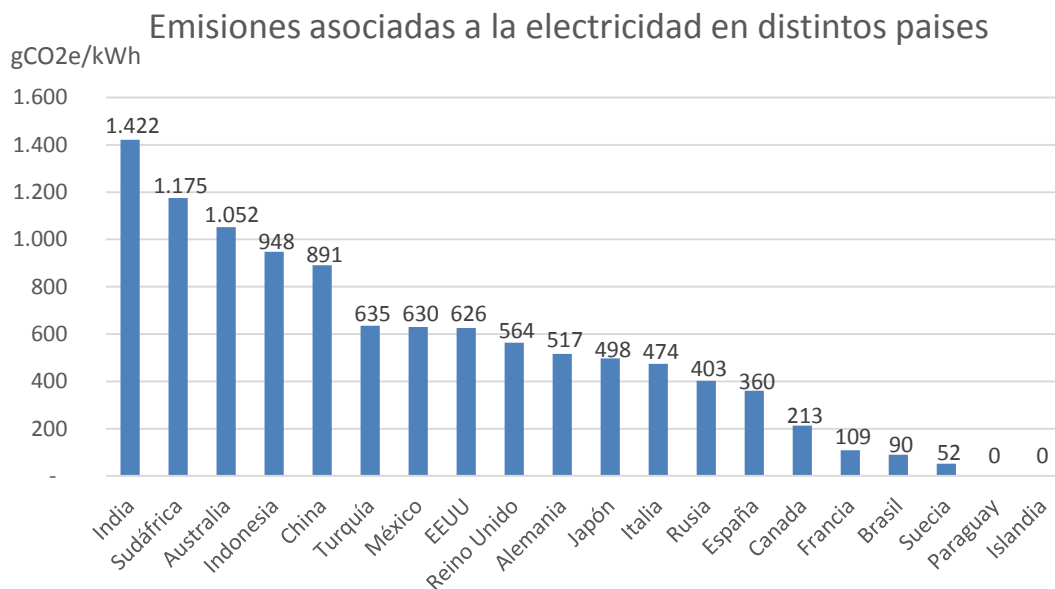


Gráfico 2.- Emisiones asociadas a la electricidad consumida en distintos países⁶.

Además, el aeropuerto necesitará disponer de la capacidad para generar su propia energía eléctrica mediante sistemas de generación auxiliar, como los UPS (Sistema de Energía Ininterrumpida), los cuales garantizan la continuidad en el suministro eléctrico en caso de fallo repentino de la fuente principal, para sistemas esenciales en las operaciones, como son las luces de superficie. En el caso de cortes del suministro prolongados, también es necesario disponer de grupos electrógenos de media o alta potencia, los cuales suelen funcionar con combustibles fósiles como el diésel.

En parte, por esta necesidad de seguridad en el suministro, aunque también por motivaciones económicas y medioambientales, cada vez son más los aeropuertos que empiezan a contar con sistemas de generación eléctrica con los que consiguen la totalidad o gran parte de la energía que necesitan. De entre estos sistemas, tendrán especial importancia aquellos basados en energías renovables como las placas solares o los aerogeneradores, y otros que permitan obtener una alta eficiencia, como la cogeneración.

El resto del consumo energético en el aeropuerto es debido a la quema de combustibles fósiles, principalmente en sistemas de calefacción como las calderas de propano o gas natural, en los equipos de asistencia en tierra a las aeronaves, los cuales suelen funcionar con diésel, en los desplazamientos de pasajeros y trabajadores desde y hacia el aeropuerto, y en las propias aeronaves.

1.4 La eficiencia energética en los aeropuertos

La persecución de la máxima eficiencia energética será otro pilar fundamental durante nuestra tarea de reducción de la Huella de Carbono, ya que nos permitirá disminuir la energía consumida mediante un ahorro en el consumo o una mayor eficacia en la generación, transformación o transporte de la energía.

Los capítulos 2, 3 y 4 recopilarán una serie medidas de eficiencia energética para la gestión de O&M y para la envolvente térmica, climatización, iluminación y otros equipos dentro de los aeropuertos. En la presente sección

⁶ Fuente: (Wilson 2013). NOTA: Las emisiones para España no coinciden con las utilizadas más adelante en este Proyecto debido a que proceden de fuentes distintas.

se realizará una introducción a la eficiencia energía ofreciendo definiciones y legislación, y se hablará de consideraciones y estrategias a tener en cuenta para la implantación de estas medidas.

1.4.1.1 Definición

No es fácil encontrar una definición única para la *eficiencia energética*, ya que se trata de un término muy polivalente, el cual variará dependiendo de su aplicación. Por ejemplo, para su uso en edificios existe la siguiente definición, la cual encontramos en la Directiva 2010/31/UE: “Consumo de energía, calculado o medido, que se estima necesario para satisfacer la demanda energética del edificio en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación, que incluirá, entre otras cosas, la energía consumida en calefacción, la refrigeración, la ventilación, la producción de agua caliente sanitaria y la iluminación”.

Sin embargo, para el caso que nos ocupa, parece especialmente apropiada la siguiente definición del Departamento de Energía de los EEUU, que es más general y habla de la eficiencia energética en términos relativos o comparativos: “Un aumento en eficiencia energética se da cuando la energía utilizada para un determinado nivel de servicio es disminuida o se produce un incremento o mejora de los servicios para una determinada cantidad de energía proporcionada” (EIA-DOE 2003). Esta eficiencia se consigue principalmente por dos medios: una mejora de las tecnologías utilizadas durante todo el ciclo energético (desde su producción a su consumo), y un cambio en el comportamiento de los consumidores, como puede ser el fomento del transporte público frente al privado o realizar un uso correcto de los termostatos (Salgado y Navarro 2011).

1.4.1.2 Legislación básica

En el Plan de Eficiencia Energética 2011, adoptado por la Comisión Europea, se establecen una serie de medidas concretas para el ahorro de energía en el marco del objetivo 20-20-20. Estas medidas aspiran a conseguir ahorros económicos de hasta 1.000 € por vivienda al año y la creación de hasta 2 millones de puestos de trabajo.

La principal norma europea actualmente vigente en materia de eficiencia energética es la Directiva 2010/31/UE. Esta norma tiene como objeto *el fomento de la eficiencia energética de los edificios situados en la UE teniendo en cuenta las condiciones climáticas exteriores y las particularidades locales, así como las exigencias ambientales interiores y la rentabilidad en términos coste-eficacia*.

En España, siguiendo las directrices de la Comisión Europea fijadas por la Directiva de Eficiencia Energética 2012/27/UE, se ha adoptado el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020, que fija objetivos concretos a nivel nacional para 2016 y 2020. Además, es de aplicación el Real Decreto 235/2013, el cual transpone parte de la Directiva 2010/31/UE, que entre otras cosas recoge el procedimiento básico de certificación de eficiencia energética en edificios. La obtención del certificado de eficiencia energética otorga el derecho de utilización de la etiqueta de eficiencia energética, que clasifica a los edificios en una escala de la A a G de mayor a menor eficiencia (Imagen 3). En edificios con una elevada superficie y que sean frecuentados habitualmente por el público, como son las terminales aeroportuarias, la obtención de este certificado es obligatoria y además deberán exhibir la etiqueta en lugar destacado y visible.

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO TERMINADO ETIQUETA		
DATOS DEL EDIFICIO		
Normativa aplicable construcción / rehabilitación	Tipo de edificio	
Referencia catastral	Dirección	
	Municipio	
	CP	
	C. Autónoma	
ESCALA DE LA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA		
A más eficiente	Consumo de energía kWh/m ² /año	Emisiones kgCO ₂ /m ² /año
B		
C		
D		
E		
F		
G menos eficiente		
REGISTRO		Válida hasta:
		ESPAÑA
		Directiva 2010/31/UE

Las exigencias básicas en materia de eficiencia que deben cumplir los edificios y sus instalaciones térmicas en España (incorporando las exigencias de la UE) se recogen en el Código de Edificación (CTE) y en el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE). Se hablará más en profundidad de estos textos a lo largo de este Pfc.

⁷ Fuente: <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/Paginas/certificacion.aspx>

1.4.1.3 Consideraciones económicas para la implementación de medidas de eficiencia energética

El coste de cada medida y su payback, o periodo de recuperación, calculado de su forma más simple, esto es, el cómputo del número de años requeridos para recuperar la inversión, serán los factores primordiales para determinar su rentabilidad, o lo que es lo mismo, su viabilidad económica. En general, las estimaciones en cuanto a periodos de recuperación aportadas en esta sección carecerán de precisión, siendo meramente orientativas, ya que para cada caso concreto dependerán de una gran cantidad de factores cambiantes: los precios de la energía, las horas de operación, las condiciones climáticas, las diferencias de eficiencia entre los equipos que son sustituidos o modificados, los requisitos de diseño, interdependencias en los ahorros, etc. Varias medidas que comentaremos más adelante, como la recopilación de un historial de facturas correspondientes a los consumos de electricidad, agua y gas, serán de gran utilidad para el cálculo de estos paybacks (Lau, Stromgen y Green 2010).

La financiación resulta a menudo el principal obstáculo para llevar a cabo proyectos de eficiencia energética, encontrándose casi siempre que los aeropuertos pequeños suelen estar más limitados económicamente que los grandes aeropuertos. Una manera de superar este obstáculo es asegurar fondos fuera del presupuesto del aeropuerto, a través de subvenciones o ayudas estatales o privadas, además, cuantificar de la forma más fiable posible el ahorro energético esperado a través del aumento de eficiencia, ayudará a recabar apoyos para que el proyecto sea finalmente aceptado por los órganos administrativos con capacidad de decisión del aeropuerto. Junto a ello, debemos subrayar que las mejoras operacionales y otras relativas al beneficio medioambiental que pueden obtenerse también ayudarán a conseguir apoyo. Por otro lado, conseguir financiación para proyectos de eficiencia individuales suele ser más complicado que si el proyecto forma parte de otro proyecto mayor y más necesario a ojos de la administración. Del mismo modo, al tener presente la eficiencia energética durante el diseño de proyectos destacados, la necesidad de realizar modernizaciones o reformas en un futuro se verá reducida (Lau, Stromgen y Green 2010).

1.4.1.4 Subvenciones

Existen multitud de programas que proporcionan subvenciones para proyectos encaminados a aumentar la eficiencia energética. A nivel europeo, desde 2003 existe el programa IEE (Intelligent Energy - Europe), el cual financia hasta un 75% del coste total de proyectos que tienen por objetivo promover la eficiencia energética y las energías renovables, y fue lanzado con el propósito de contribuir al cumplimiento de los objetivos marcados por el Plan de Acción Horizonte 2020. Una de las áreas de financiación en las que se divide este programa es el SAVE (Specific Actions for Vigorous Energy Efficiency), enfocada, entre otras cosas, a la financiación de proyectos de eficiencia energética en edificios.

En España, este tipo de ayudas son concedidas por las Comunidades Autónomas, en Andalucía, por ejemplo, está en marcha el programa Andalucía A+, cofinanciado con fondos propios de la Junta de Andalucía y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional. Estas subvenciones pueden ser solicitadas para la realización de auditorías o la mejora energética de edificios mediante la realización de proyectos de ahorro energético y aprovechamiento de energías renovables, tanto en el ámbito público como en el privado.

1.4.1.5 Consideraciones y medidas preliminares a la iniciación de un proyecto de eficiencia energética

En general, habrá que empezar identificando todas aquellas oportunidades para reducir el consumo energético que impliquen el mínimo coste, mientras que medidas más costosas deberán ser evaluadas y justificadas en relación con su plazo de recuperación. Realizar una auditoría energética, una evaluación de O&M, y/o disponer de información procedente de sistemas de inmótica o automatización de edificios, será de gran ayuda para encontrar oportunidades de mejora (Lau, Stromgen y Green 2010).

Algunas estrategias o prácticas que se han encontrado esenciales (Lau, Stromgen y Green 2010) a la hora de conseguir unos resultados óptimos con cualquier proyecto en materia de eficiencia energética son:

- Asegurar la colaboración de todos los empleados, no solo técnicos, sino también operacionales y de mantenimiento.
- Disponer de instalaciones y sistemas eléctricos/mecánicos modernos, y de sistemas automatizados de gestión de edificios como los BMS (Building Management Systems), comentado más adelante.
- Una formación adecuada de la plantilla.
- Considerar mejoras de eficiencia energética en planes a largo plazo.

- Tener en cuenta consideraciones de eficiencia energética en el día a día a través de las tareas de O&M.
- Crear un Plan de Sostenibilidad independiente.
- Incluir criterios de eficiencia energética y estudios de viabilidad en cada proyecto.
- Utilizar como fuentes de información para la elaboración de proyectos de eficiencia energética a otros gestores aeroportuarios, consultorías, además de regulaciones locales, programas de los servicios públicos y estándares nacionales.
- Los principales medios de financiación para proyectos de eficiencia energética deberán extraerse del presupuesto del aeropuerto, pero también será muy importante aprovechar cuantas subvenciones públicas que se encuentren disponibles.
- Para presupuestos reducidos conviene adoptar una implementación por fases o etapas, o asignar su financiación a departamentos específicos dentro de los presupuestos generales.
- Usar auditorías o datos de Operaciones y Mantenimiento para desarrollar una lista de mejoras de eficiencia energética.
- Buscar programas que ofrezcan auditorías gratuitas o subvenciones para estas.
- Realizar, cuando sea posible, tests o pruebas a pequeña escala antes de la implantación del proyecto final a gran escala. Esta medida será especialmente recomendable en aeropuertos en los que existan microclimas o climas singulares y cuando no se disponga de datos de proyectos similares. También será importante, por ejemplo, si se pretende instalar sistemas de generación solar o eólica.
- Usar estándares de eficiencia energética existentes (operacionales o relativos a los propios equipos, como las certificaciones ENERGY STAR) o crear unos propios para el aeropuerto, y reclamar su cumplimiento también a los arrendatarios del aeropuerto.
- Designar a una persona o comité encargado de la supervisión de las medidas de eficiencia energética y de comprobar que los sistemas del edificio funcionan y se operan de la forma deseada.
- Considerar los proyectos de eficiencia energética de una manera holística y explorar la existencia de sinergias entre distintas mejoras.

1.5 Compromisos voluntarios

Pese a la ausencia de una legislación ambiciosa en materia de emisiones o sostenibilidad en general, existente en multitud de actividades de la industria y el sector terciario, entre las que se encuentra la actividad aeroportuaria, podemos encontrar completas normativas de seguimiento voluntario con las que se pueden conseguir mejoras medioambientales significativas, junto a otros beneficios, como una reducción de costes o una mayor calidad de los servicios. Además de estas normativas, también existen programas o proyectos de colaboración orientados a la reducción de emisiones, a las que pueden adscribirse los aeropuertos interesados en implementar estrategias de reducción de emisiones en sus actividades.

1.5.1 Normas ISO

Las más importantes de las normas voluntarias que hemos comentado son las elaboradas por ISO (International Organization for Standardization). Las más importantes de estas normas relacionadas con la gestión de las emisiones que puedan ser de implantación en un aeropuerto son las siguientes:

- **Familia ISO 14000.-** Esta familia de normas está a la gestión medioambiental. Destacan la ISO 14001, la cual fija unas líneas de actuación para que las empresas u organizaciones que la utilicen puedan implementar un sistema de gestión medioambiental efectivo; y la ISO 14064, dedicada a la certificación de inventarios de GEI, es decir, al cálculo de la huella de carbono desarrollado por una organización.
- **Familia ISO 50000.-** Esta familia de normas está dedicada a la gestión energética. La más importante es la norma ISO 50001, la cual fija un marco o líneas de actuación para que las organizaciones que la empleen puedan mejorar su gestión energética mediante la implantación de un Sistema de Gestión Energética, instrumento centrado en mejorar la eficiencia en el consumo energético.

Si se demuestra el cumplimiento del aeropuerto con estas normas se obtiene una certificación de cumplimiento que garantiza una gestión ambiental óptima en cada campo. En España esta certificación es otorgada por AENOR.

1.5.2 Airport Carbon Accreditation y otros proyectos de reducción de emisiones en aeropuertos

El proyecto internacional más importante actualmente en marcha, para lograr una reducción de emisiones en los aeropuertos alrededor del mundo, es el Airport Carbon Accreditation, lanzado por ACI EUROPE en junio de 2009. Mediante este programa se evalúan y reconocen los esfuerzos de los aeropuertos adscritos para gestionar y reducir sus emisiones de carbono, en función de lo cual se conceden hasta 4 niveles de certificación. Estos son:

- **Nivel 1 – Mapping.-** Para lograr este nivel de certificación se debe evaluar la Huella de Carbono del aeropuerto, para lo que deben determinarse los “límites operacionales” del mismo, e identificar las fuentes de emisión en ellos contenidas correspondientes al Alcance 1 o Alcance 2. Posteriormente se debe realizar una recopilación de datos que permita calcular las emisiones generadas durante un año y elaborar un informe de la Huella de Carbono, que deberá ser verificado por un tercero para comprobar que dicho cálculo cumple con la normativa ISO 14064 y con los requisitos de acreditación del programa.
- **Nivel 2 – Reduction.-** Para lograr este nivel debe iniciarse una gestión de las emisiones de GEI y avanzar hacia una reducción de la Huella de Carbono, probando que acciones específicas están siendo llevadas a cabo y que éstas han ocasionado una reducción de la Huella de Carbono, lo que debe comprobarse comparando los datos de emisiones de GEI entre años consecutivos.
- **Nivel 3 – Optimisation.-** Consiste en la ampliación del alcance de las medidas para reducir las emisiones, mediante la inclusión de aquellas correspondientes al Alcance 3, principalmente las debidas a las aeronaves durante su aproximación y ciclo LTO, así como las generadas por pasajeros y empleados del aeropuertos en sus desplazamientos en los sistemas de acceso al aeropuerto. Requiere la implicación de terceras partes en el programa de reducción de la Huella de Carbono, éstos pueden ser aerolíneas, operadores de handling, compañías de catering, control de tráfico aéreo, y otras empresas que desarrollen su actividad dentro del aeropuerto. También incluye la implicación de terceras partes, como administraciones públicas o usuarios, para la reducción de emisiones en los sistemas accesos al aeropuerto.
- **Nivel 4 – Neutrality.-** Se trata de lograr un balance de emisiones cero, es decir, unas emisiones anuales de GEI nulas, lo cual solo es posible si se llevan a cabo medidas de compensación de las emisiones generadas mediante la inversión de fondos o recursos en otros proyectos que supongan una reducción de emisiones. Este balance solo incluye a las emisiones pertenecientes al Alcance 1 y el Alcance 2.

Para lograr estos objetivos, los aeropuertos deben seguir unas estrategias comunes, utilizando herramientas proporcionadas por el programa para lograr una gestión activa de las emisiones generadas en las operaciones del aeropuerto. Actualmente existen 90 aeropuertos certificados en Europa, 22 en Asia, y 3 en Norteamérica (repartidos en EEUU, Canadá y México), los cuales recogen más de un 20% del total del tráfico aéreo global.

Otros programas o proyectos de cooperación puestos en marcha con el propósito de reducir las emisiones o, en general, aumentar la sostenibilidad de las operaciones aeroportuarias son:

- **Green Sustainable Airports.-** Se trata de un proyecto de cooperación entre varios aeropuertos en el norte de Europa. Entre los principales objetivos se encuentran el cálculo de la Huella de Carbono, la implementación de mejoras baratas y de fácil implementación que permitan disminuir el consumo de energía, o la promoción de las energías renovables.
- **Voluntary Airport Low Emission Program (VALE).-** Se trata de un programa lanzado por la FAA al que pueden acogerse los aeropuertos de los EEUU. Su objetivo es proporcionar fondos para facilitar proyectos que persigan la reducción de emisiones.

2 REDUCCIÓN DE EMISIONES EN LA GESTIÓN DE OPERACIONES Y MANTENIMIENTO EN AEROPUERTOS

En este capítulo analizaremos prácticas para aumentar la eficiencia energética en aeropuertos relacionadas con la gestión energética, incluyendo automatización y controles, sistemas de evaluación y medidas operacionales, así como otras relacionadas con el personal y los factores humanos. Las actuaciones aquí comentadas afectarán a varias de las áreas de mejora comentadas en el Apartado 1.2, y, en general, todas se considerarán pertenecientes al Alcance 1, ya que la capacidad de control y responsabilidad de las mismas recaerá, sino en su totalidad, al menos sí en última instancia, sobre el gestor aeroportuario.

Para muchas de las prácticas aquí introducidas se darán, además, estimaciones de los plazos de retorno de la inversión esperados. Conviene recordar que estos datos poseerán solo valor orientativo y que podrán variar significativamente de un caso a otro (ver pag. 14).

2.1 Sistemas de control

Sistemas automáticos de control, basados en sensores y controladores digitales, son muy usados para monitorizar y disminuir el consumo energético en un edificio u otra instalación, y recopilar datos que podrán ser de ayuda en otros proyectos. Estos sistemas pueden ser más asequibles en terminales de aeropuertos pequeños, debido a que, en general, poseerán menor superficie y sistemas más sencillos, por el contrario, estos aeropuertos suelen contar con más problemas que los aeropuertos grandes para financiar este tipo de proyectos.

2.1.1 Sistemas de Automatización de Edificios (BAS)

También denominados Sistemas de Control de Gestión Energética (EMCS), Sistemas de Gestión Computerizada de Mantenimiento (CMMS), o Sistemas Inteligentes de Monitorización y Control (IMACS), entre otros nombres, en función de su tamaño y alcance. Estos sistemas pueden proporcionar un buen número de funciones para la gestión energética, como ajustar los sistemas de climatización e iluminación para que reaccionen automáticamente a las cambiantes condiciones operacionales y ajustarlos a la demanda en cada momento, o identificar de forma rápida equipos con necesidad de ajustes o reparaciones, reduciendo así los tiempos de inactividad y los costes de reparación. La sustitución de sistemas de control analógicos por estos sistemas digitales puede suponer un ahorro energético también de forma directa por su menor consumo energético (Turner, y otros 2007).

Un sistema BAS eficaz requerirá de un personal bien cualificado para su correcta configuración y un uso óptimo de la instalación, un correcto mantenimiento del sistema BAS también será de vital importancia, en particular, una calibración continuada de los sensores será requerida para evitar gastos energéticos indeseados (Turner, y otros 2007).

Junto a lo hasta ahora comentado convendrá tener también en cuenta las siguientes consideraciones:

2.1.1.1 Calibración higrotérmica del entorno mediante BAS

Como se detallará más adelante, en los edificios que integran un aeropuerto se necesitarán unos requisitos térmicos y de calidad del aire para garantizar el confort de sus usuarios, además, éstos podrán variar temporalmente y de un lugar a otro del aeropuerto, por lo que cumplir esta demanda para cada uno de estos espacios no será tarea fácil. Por otro lado, un ajuste preciso puede suponer un importante ahorro energético y económico, por ejemplo, se estima que por cada medio grado centígrado de más en una instalación se ahorra

aproximadamente un 2% de la energía usada para enfriarla cada año (Lynch y O'Rourke 2008).

2.1.1.2 Optimización de los sensores

Con una mala calibración de los sensores los BAS se pueden obtener datos imprecisos, lo que puede provocar un desperdicio energético, malas condiciones de confort, etc. Por el contrario, mantener estos sistemas en condiciones óptimas puede suponer aumentar la vida útil de las instalaciones o los sistemas mecánicos. Tareas de mantenimiento periódicas serán vitales para mantener los sistemas bien calibrados y optimizados en todo momento. El plazo de recuperación por la optimización de estos sensores ha sido documentado de entre 1 y 4 años (Turner, y otros 2007).

2.1.1.3 Actualización o mejora de los BAS

Los sistemas de automatización de edificios se han convertido en un estándar en programas de eficiencia energética en edificios, es por ello que se recomienda su ampliación de manera gradual para aumentar así los potenciales ahorros energéticos derivados de su utilización, plazos de recuperación para estas mejoras de entre 6 y 10 años han sido registrados (Turner, y otros 2007).

2.1.2 Control de motores

Los motores usados en muchas instalaciones de tratamiento de aire o en equipos de bombeo en redes de distribución pueden ser modificados mediante la instalación de controladores digitales o reguladores de frecuencia, los cuales, conociendo la demanda de la carga en tiempo real, permiten ajustar la frecuencia a la óptima en cada momento. Algunos de estos controladores son:

- **Reguladores de velocidad en ventiladores.**- Permite un control dinámico de los sistemas de ventilación. Los costes son bajos y los periodos de recuperación de entre 3 y 7 años (Turner, y otros 2007).
- **Controladores de motores para bombas.**- Usados por aeropuertos de diversos tamaños, con un coste bajo-medio y periodos de recuperación de entre 2 y 5 años. Estos controladores suelen usarse en bombas con una potencia superior a 3 kW, aunque también pueden incorporarse a motores de menor potencia (Lau, Stromgen y Green 2010).
- **Reguladores en ventiladores en torres de refrigeración.**- Usados normalmente en aeropuertos grandes. Costes bajos-medios, y con periodos de recuperación de la inversión de entre 2 y 5 años (Lau, Stromgen y Green 2010).

2.2 Tareas de Operaciones y Mantenimiento (O&M)

Por Operaciones y Mantenimiento entendemos “*aquellas decisiones y acciones relativas al control y conservación de la propiedad y el equipamiento*” (G. P. Sullivan, R. A. Pugh, y otros 2010). En principio, se recomienda la creación en el aeropuerto de un documento propio de procedimientos de O&M, esto es, un manual centralizado, que nos permita reducir o eliminar la dependencia en un conocimiento o experiencia específica individual, en el que se recojan los procedimientos de O&M. La utilización de un manual lo más exhaustivo posible asegurará que los equipos no sufrirán deterioro antes de tiempo y ayudará a mantener el consumo energético en niveles relativamente constantes. Además, se recomienda realizar revisiones periódicas o estacionales de las estrategias y programa de O&M para ajustarlas al posible cambio de las condiciones climáticas (PECI 1999a).

En este apartado se comentarán los distintos métodos de evaluación y puesta a punto de equipos e instalaciones tales como las auditorías o los comisionamientos, así como consideraciones relativas a los planes de mantenimiento llevados a cabo, los cuales deben ser incluidos dentro de un programa de O&M que contemple el gasto energético de manera exhaustiva, fijando unos objetivos ambiciosos en materia de eficiencia, en el que se garantice la financiación de los mismos y se asegure un apoyo de las principales autoridades gestoras del aeropuerto. Tras esto, se introducirán una serie de programas y medidas operacionales y de mantenimiento adicionales y algunas nociones importantes en cuanto a la implicación del personal y usuarios en las acciones de fomento de la eficiencia energética. Finalmente, se sumará un último apartado referente a las ventajas

derivadas del uso de técnicas de medida del consumo energético.

2.2.1 Evaluaciones Sistemáticas

Se tratan de métodos para la evaluación, mantenimiento y optimización de los sistemas existentes. Pese al gran potencial que poseen las prácticas aquí comentadas para el ahorro energético, a menudo no se les presta toda la atención que merecen. Sin embargo, éstas deberían ser consideradas como una prioridad, ya que tienen coste muy bajo o incluso nulo, pueden, en muchos casos, ser realizadas por el propio personal del aeropuerto, y poseen un plazo de recuperación reducido. No obstante, para pequeños aeropuertos, el no disponer de suficiente personal, o la existencia de contratos con gestores de servicios externos al aeropuerto, puede suponer un aumento de costes. En estos aeropuertos se recomienda designar un individuo o equipo para gestionar la implantación de estas prácticas (Lau, Stromgen y Green 2010).

A continuación se comentan las más importantes:

2.2.1.1 Auditorías Energéticas

Las auditorías energéticas son llevadas a cabo con objeto de identificar oportunidades para reducir el consumo energético y/o los gastos de operación de un edificio. Estas propuestas de mejora suelen implicar la modernización de los equipos o su sustitución por otros modelos más eficientes, por lo que a menudo son costosas y pueden presentar plazos de recuperación de la inversión elevados. También pueden proporcionar recomendaciones para la optimización del sistema de gestión de la energía contribuyendo a la obtención de un gasto energético y unas condiciones de confort equilibradas. Como parte de un proyecto de modernización o reforma de aumento de eficiencia, una auditoría puede ser necesaria para garantizar la idoneidad y rentabilidad de éstos.

2.2.1.2 Evaluación de O&M

Una evaluación de O&M “es un método sistemático para la identificación de formas de optimización de la operación de un edificio mediante la comprensión del modo en que los sistemas y equipos son operados y mantenidos, las razones por las que se han adoptado estas estrategias de O&M y la identificación de los principales problemas para el edificio y sus ocupantes” (PECI 1999b). De esta forma pueden ser identificadas las mejores oportunidades para la optimización del consumo energético de los distintos sistemas y para la mejora de las prácticas de O&M. Estas evaluaciones suelen ser llevadas a cabo como una acción independiente al Programa de Mantenimiento, a menudo son realizadas por consultorías externas, y resultan en un conjunto de recomendaciones de O&M (PECI 1999b).

Estas evaluaciones pueden incluir (PECI 1999b):

- Entrevistas con los gestores, personal de O&M y contratistas de servicios.
- Revisión de las condiciones de los equipos, y de la documentación disponible.
- Pruebas in-situ de equipos y controles.
- Registro de datos a lo largo del tiempo (presiones, temperaturas, tensiones, etc.).

A diferencia de las auditorías energéticas, orientadas a la identificación de mejoras de envergadura, las evaluaciones de O&M están enfocadas a la identificación de medidas de bajo coste y poco riesgo de inversión en las prácticas de O&M, no obstante, estas medidas pueden llegar a suponer un ahorro de entre un 5% y un 20% de la factura anual del edificio (PECI 1999b). A menudo pueden ser desarrolladas antes o al mismo tiempo que una auditoría energética, ya que pueden servir para disminuir la necesidad o reducir el tiempo de payback de otras soluciones menos rentables que resulten de la realización de la auditoría. Además, su carácter complementario puede ser explotado para identificar áreas de mejora adicionales, y disponer de un mejor conocimiento de los sistemas con un nivel de detalle mayor (Lau, Stromgen y Green 2010).

El coste de éstas es normalmente similar o algo mayor al de las auditorías energéticas. Se recomienda realizar evaluaciones de O&M de forma periódica, con intervalos no superiores a 5 años (PECI 1999b).

2.2.1.3 Comisionamiento

Los comisionamientos son procesos sistemáticos de envergadura, llevados a cabo para asegurar que los sistemas de un edificio son operados de forma óptima, de acuerdo a los requisitos de operación y especificaciones de diseño (G. P. Sullivan, R. A. Pugh, y otros 2010). Con ello se pretende conseguir una disminución del consumo y del gasto, así como una disminución de las posibilidades de averías y un aumento del confort para los usuarios del edificio.

Un comisionamiento debe comenzar, idealmente, en la fase de diseño de un proyecto de reforma o ampliación en el edificio, y suele durar hasta un año después de que el proyecto haya finalizado, sin embargo, equipos ya existentes también pueden ser objeto de este proceso, por ejemplo, en el caso de que se pretenda optimizar las condiciones de operación del sistema de climatización, en caso de que se considere que éste funciona de forma ineficiente o existan desajustes que disminuyen su rendimiento. A diferencia de las autorías energéticas, que suelen realizarse en periodos de tiempo muy reducidos, habitualmente varios días, los comisionamientos son procesos que requieren la realización de pruebas y de una validación operacional continuada, por esta razón también resultan en general más caros. Éste es un proceso, por tanto, que profundiza más en el estado y funcionamiento de los equipos, y con el que podemos obtener una mejor “afinación” de éstos y, en definitiva, una optimización energética más profunda (PECI 1998).

Como se ha dicho, existen varios tipos de comisionamiento, dependiendo principalmente de las características del edificio o las instalaciones sobre las que es ejecutado:

- **Para edificios nuevos o sometidos a reformas importantes (puesta a punto).**- Se realizan revisiones de los diseños, pruebas funcionales, formación a los operadores, procesos de documentación, etc., con el propósito de asegurar que los sistemas y equipos nuevos están operando sin fallos.
- **Edificios ya existentes cuyas instalaciones han sufrido una merma de eficiencia (Recomisionamiento).**- Se trata de un proceso de optimización con el que se pretende devolver a los edificios o sistemas existentes a las condiciones recogidas en las especificaciones de diseño, y adaptándolos u optimizándolos conforme a los requisitos concretos determinados por las condiciones operacionales, resolviendo problemas que puedan existir, y mejorando el confort de las instalaciones. Con el tiempo, además, el uso y ocupación de un edificio puede variar, y equipos como el de climatización, que además pueden haber sufrido algún deterioro, pueden quedar desajustados respecto a la demanda. En general, esta tarea consta de dos fases: una primera fase inicial donde las oportunidades son identificadas a través del estudio de datos energéticos y las instalaciones, y una segunda fase en la que se lleva a cabo la tarea de optimización y corrección de defectos y se verifica su correcto funcionamiento (G. P. Sullivan, R. A. Pugh, y otros 2010).

El re-comisionamiento es más eficaz en instalaciones donde no se realicen tareas de mantenimiento continuas, ya que si éstas se realizan de forma continuada y correcta, la instalación deberá funcionar en condiciones cercanas a las óptimas, y una labor de re-comisionamiento apenas será beneficiosa. Varias de las tareas de optimización más comunes y eficaces, según vienen recopiladas en G. P. Sullivan, R. A. Pugh, y otros (2010) son:

- Reprogramación de los controladores de refrigeración.
- Monitorización de las plantas de refrigeración para evitar las cargas por picos de demanda.
- Ajustar temperaturas de reinicio y el resto configuraciones de temperatura. Recalibración periódica de sensores.
- Configuración de máquinas de refrigeración, calderas y unidades de tratamiento de aire para ser operados combinadamente de la forma más eficiente para distintas condiciones de carga.
- Ajustar y reparar los reguladores de flujo de aire y economizadores de aire, ya que un mal funcionamiento de los mismos puede provocar:
 - Aumento del suministro de energía a los ventiladores si los reguladores se encuentran cerrados o necesidad de más calefacción o refrigeración si se encuentran más abiertos de lo debido.
 - Condiciones no deseadas de la operación del edificio por falta de aire exterior.
 - Sustitución o degradación prematura del equipo.

- Modificar las estrategias de control para las distintas horas de operación.
 - Eliminar casos en los que calentemos y refrigeremos de manera simultánea una misma zona.
 - Ajustes y compensación de la distribución de agua y aire.
 - Verificar las secuencias de control incluyendo la habilitación y rehabilitación automática de controles para distintos puntos de operación, fines de semana y vacaciones.
- **Edificios grandes y complejos en los que se experimentan problemas de eficiencia.-** Se trata de una práctica de comisionamiento que es integrada en el programa diario de Operaciones y Mantenimiento de una instalación. La recopilación de datos, calibración y otras actividades son realizadas de forma periódica. Esta práctica es posible si se realiza la integración de servicios y sistemas que permitan la monitorización centralizada y la adquisición de datos en un edificio como son los sistemas BAS ya comentados. Además, permite identificar problemas dentro de los sistemas analizados de forma inmediata, manteniendo así una eficiencia óptima y aumentando el mantenimiento preventivo, lo que repercutirá en un incremento de la vida útil de los equipos (PECI 1998).

Esta práctica presenta un coste medio ya que requiere una significativa cantidad de personal. Estudios han indicado plazos de recuperación de la inversión de en torno a 2 años y ahorros de en torno a un 20% (Liu, Claridge y Turner 2002), pudiendo llegar incluso hasta un 45% (Lau, Stromgen y Green 2010).

2.2.1.4 Programas de Mantenimiento

Entendemos por mantenimiento “*aquellas acciones tomadas para prevenir el fallo o la necesidad de reparación de un dispositivo o componente durante la degradación experimentada durante su operación y que nos permiten mantenerlo en unas condiciones de trabajo apropiadas*” (G. P. Sullivan, R. A. Pugh, y otros 2010).

Un mantenimiento inadecuado de los sistemas consumidores de energía es una de las principales causas del desperdicio energético en los edificios. Pérdidas energéticas por fugas de vapor, agua, o aire, aislamientos defectuosos, controles mal ajustados y/u operados, etc., pueden ser elevadas si no es llevado a cabo un adecuado mantenimiento de las instalaciones.

Mediante un Programa de Mantenimiento adecuado se podrá conseguir, junto a un ahorro energético y económico, los siguientes beneficios adicionales según se recogen en G. P. Sullivan, R. A. Pugh, y otros (2010):

- **Mayor seguridad y confort para los usuarios.-** Mediante un correcto mantenimiento se minimizan los potenciales peligros derivados de una operación defectuosa de los equipos. Además, se reduce el riesgo de que aparezcan problemas relacionados con la calidad ambiental de las instalaciones.
- **Mayor vida útil.-** Se aumenta la vida útil de los equipos hasta los niveles de diseño. Resulta ilustrativo de lo anterior la siguiente gráfica, en la que también se aprecia la mejora del rendimiento, es decir, la mayor eficiencia alcanzada a lo largo de la vida en servicio del equipo, si un correcto mantenimiento es puesto en práctica.

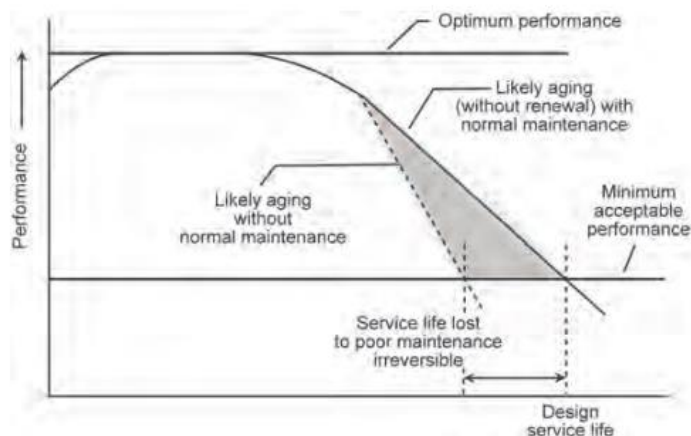


Gráfico 3.- Efecto de un adecuado mantenimiento en la vida útil de una instalación⁸.

⁸ Fuente: National Research Council.

En general, existen varias formas de llevar a cabo el mantenimiento de los equipos en un aeropuerto (G. P. Sullivan, R. A. Pugh, y otros 2010):

- **Mantenimiento reactivo.-** En esta modalidad solo se toman medidas tras el fallo de los equipos y, aunque esta forma de mantenimiento no proporciona ninguna ventaja respecto a las demás, su uso está, no obstante, muy extendido. Aunque a priori pueda parecer que es la opción más barata, en la práctica, esto resulta incierto, ya que mediante esta estrategia, tal como se ve claramente en la Imagen 3, la vida de los equipos se acorta y su eficiencia se ve mermada. Cuando se produce el fallo de un dispositivo, normalmente se incurre en un coste por inactividad, e incluso puede desencadenar el fallo de otros equipos, lo que dispararía los costes. En general, la reparación de un equipo tras un fallo por falta de mantenimiento es más costosa que la realización de las tareas de mantenimiento apropiadas para prevenirlo.
- **Mantenimiento preventivo.-** Puede ser definido como el conjunto de “*acciones llevadas a cabo siguiendo un programa prefijado en el tiempo o por parámetros operacionales de los equipos, que detectan, evitan, o mitigan la degradación de un componente o sistema con la intención de mantener o extender su vida útil*”. Este programa viene a menudo fijado por el diseñador del equipo. Este tipo de mantenimiento, en general, permitirá una operación más eficiente del edificio y mayor fiabilidad de los componentes respecto al mantenimiento reactivo, a cambio de una mayor cantidad de horas de trabajo. Sin embargo, los estudios han indicado que el ahorro económico esperado respecto al mantenimiento reactivo es de entre un 12% y un 18%, aunque no cabe duda de que en ocasiones puede ser mucho mayor.
- **Mantenimiento predictivo.-** Puede ser definido como el conjunto de “*medidas que detectan el inicio de degradación (estado funcional deficiente) en sistemas, y de este modo permiten la eliminación o el control de agentes perniciosos previamente a la aparición de un deterioro significativo en los mismos*”. Se trata de una evolución del mantenimiento preventivo, en este caso las acciones están basadas en mayor medida en el estado de los equipos, en lugar de en el seguimiento algún programa predeterminado. De esta forma, conseguimos minimizar las horas de trabajo eliminando las acciones de mantenimiento innecesarias que puede ocasionar el mantenimiento preventivo, así como optimizar las condiciones de operación, disminuir los ahorros energéticos, y aumentar la fiabilidad de los componentes. Todo esto, sin embargo, precisará de una fuerte inversión económica inicial, la cual es debida al coste de la tecnología utilizada para el diagnóstico y monitorización de las instalaciones, y a la necesidad de dotar de formación adicional al personal de mantenimiento. Pese a ello, varios estudios han estimado que los ahorros económicos conseguidos con esta práctica se sitúan entre el 8% y el 12% respecto del mantenimiento preventivo.

2.2.2 Programas especiales y medidas operacionales

Se trata de programas y medidas destinadas a guiar, implementar o monitorizar proyectos de eficiencia energética.

2.2.2.1 Acuerdos de mantenimiento

Una práctica útil, especialmente en pequeños aeropuertos, consiste en la contratación de especialistas para la realización de servicios periódicos en equipos mecánicos y eléctricos y otras instalaciones. Se trata de una acción de bajo coste con plazo de recuperación muy cortos (PECI 1999c).

2.2.2.2 Detenciones o ajustes temporales

En caso de que existan instalaciones en el aeropuerto que tengan un uso bajo o inexistente podemos considerar la detención temporal o incluso el cierre permanente de las mismas. Por ejemplo, el cierre de sistemas de transporte de equipajes cuando la actividad es reducida, o la detención de la calefacción/aire acondicionado durante los meses de verano/invierno. Los costes de este tipo de medidas suelen ser bastante bajos y los periodos de recuperación menores a un año (PECI 1999a). Asimismo, ajustes operacionales pueden llevarse a cabo para concentrar la actividad del aeropuerto en ciertas zonas permitiendo que otras se encuentren inactivas, por ejemplo, agrupando las puertas asignadas a los vuelos en las horas valle.

2.2.2.3 Normas específicas para proyectos de eficiencia energética

Es importante usar en nuestras instalaciones estándares operacionales o normas reconocidas oficialmente que contemplen cuestiones de eficiencia energética, aunque también puede considerarse la posibilidad de crear estándares propios adaptados específicamente a las instalaciones y operación de nuestro aeropuerto concreto. El uso de normas ya existentes supone una ventaja debido al ahorro de tiempo y personal que supone no tener que desarrollarlas, sin embargo, pueden aparecer problemas o ineficiencias cuando son aplicadas a unas condiciones climáticas específicas, y a menudo sus procesos certificación presenta requisitos de documentación rigurosos (Lau, Stromgen y Green 2010).

2.2.2.4 Programas de Sostenibilidad en Aeropuertos

El desarrollo de este tipo de programas fomenta el desarrollo de una cultura operacional con la que se puede conseguir un compromiso a largo plazo por parte del personal y los usuarios, que asegure a su vez que los programas y las prácticas son implementadas y ejecutadas (Lau, Stromgen y Green 2010). Un ejemplo de este tipo de programas es el creado por la Metropolitan Airport Commission en el aeropuerto de Minneapolis/Saint Paul llamado *Stewards of Tomorrow's Airport Resources* (STAR).

2.2.3 Personal/Factores humanos

Un factor decisivo a la hora de lograr una eficaz implementación de estas acciones en el aeropuerto implica al personal del aeropuerto y a los arrendatarios dentro del mismo.

2.2.3.1 El Efecto Hawthorne

Basado en un estudio realizado a principios del siglo XX en el complejo industrial Hawthorne, en Illinois, el cual encontró pruebas de que el comportamiento de los empleados era alterado de un modo beneficioso en cuanto a la consecución de resultados en un estudio cuando éstos eran conscientes de dicho estudio. En base a ello se considera que, al implementar una mejora de eficiencia energética, pequeñas ganancias de eficiencia pueden esperarse si los empleados son conscientes de la implementación de estas mejoras. Para ello debe distribuirse información acerca de los proyectos y las medidas que son llevadas a cabo. Se ha estimado que gracias a este efecto 2% pueden ser conseguidos ahorros adicionales de hasta un 2% (Sullivan, Pugh y Hunt 2007).

2.2.3.2 Formación

Por supuesto, es de vital importancia aportar la formación necesaria para que los empleados y usuarios del equipamiento del aeropuerto utilicen las herramientas de gestión energética de forma apropiada y conforme a los estándares de eficiencia.

2.2.4 Medición del consumo energético

Disponer de datos precisos y detallados sobre el consumo energético es una herramienta muy valiosa, ya que nos permite, por ejemplo, comprobar las facturas, fijar y utilizar estándares de comparación y determinar donde es más necesario realizar modificaciones y conseguir ahorros energéticos. De esta forma, las tecnologías de medida en aeropuertos permiten a los gestores iniciar las mejores prácticas de gestión energética, monitorizar tendencias y mejorar las operaciones de los edificios. Además, otra ventaja de disponer de técnicas de medida avanzadas es que estaremos preparados en caso de aparecer legislaciones más exigentes en esta materia (Sullivan, Pugh y Hunt 2007).

2.2.4.1 Métodos de medida avanzados

La mayoría de los sistemas de medida existentes en los aeropuertos para la medición del consumo eléctrico están basados en “*medidores electromecánicos o de estado sólido que miden de forma acumulativa, anotan y almacenan datos totales del uso energético que son periódicamente requeridos para su empleo en facturas para los consumidores o para gestión energética*” (Sullivan, Pugh y Hunt 2007).

Por su parte, un sistema de medida avanzado recolecta los datos del uso energético conforme a una programación temporal definida, así como para cada momento puntual demandado, permitiendo la monitorización en tiempo real del uso eléctrico, tarifas eléctricas en función del tiempo y la realización de un comisionamiento continuado. El coste de estos sistemas suele ser bajo y puede variar bastante por un gran número de razones, como por las especificaciones de los equipos, las infraestructuras existentes, etc. (Turner, y otros 2007).

2.2.4.2 Sub-medidores electrónicos

Como un complemento a los medidores estándar son un método rentable de determinar el consumo de energía por múltiples usuarios, sistemas o arrendatarios y añadir mayor detalle a los datos recolectados, mejorando así los valores de referencia obtenidos. Estos sistemas son especialmente útiles para controlar el gasto energético de los arrendatarios, y, en general, sirven para conseguir un seguimiento más profundo del gasto energético y una mejor monitorización de las mejoras de eficiencia energética. Ahorros energéticos de entre un 2% y un 5% pueden ser obtenidos con este método (Sullivan, Pugh y Hunt 2007).

2.2.4.3 Consecuencias derivadas de las mediciones

Podemos añadir varias a las ya enumeradas hasta ahora (Lau, Stromgen y Green 2010):

- El disponer de más y mejores datos para ser distribuidos entre el personal nos puede ayudar a ganar mayor apoyo para los planes de sostenibilidad y aumentar el efecto Hawthorne comentado anteriormente.
- Nos pueden ayudar a negociar de forma más eficaz precios y rentas, o las tasas impuestas a los arrendatarios dentro del aeropuerto.
- Mediante su uso en la optimización de edificios o en apoyo a procesos de comisionamiento se pueden lograr ahorros energéticos de entre un 5% y un 15% anuales (Sullivan, Pugh y Hunt 2007).

3 REDUCCIÓN DE EMISIONES EN CLIMATIZACIÓN

Los sistemas de climatización son usados para proporcionar unas condiciones de confort adecuadas a los usuarios de una determinada instalación en caso de que las condiciones naturales no sean capaces de proporcionarlas. La climatización, según el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) consiste en “*dar a un espacio cerrado las condiciones de temperatura, humedad relativa, calidad del aire y, a veces, también de presión, necesarias para el bienestar de las personas y/o la conservación de las cosas*”.

En aeropuertos, calefacción, ventilación y aire acondicionado, puede suponer entre un 50% y un 60% de la energía total consumida, con mayor peso del aire acondicionado o de la calefacción en función de las condiciones climáticas (Galludo y Navarro 2006). Convencionalmente, los sistemas de refrigeración suelen poseer alimentación eléctrica, mientras que los sistemas de calefacción emplean combustibles con mayor frecuencia, como el gas natural, por lo que también pueden suponer una fuente de emisiones in situ.

3.1 Legislación básica sobre climatización

Las principales guías normativas a este respecto, en España, son el Documento Básico HS-3, HE-1 y HE-2 del Código Técnico de la Edificación (CTE), el cual remite directamente al Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE):

- **HS-3 (CTE) - Calidad del aire interior.** Se establecen reglas y procedimientos que permiten cumplir las siguientes exigencias básicas:
 1. *Los edificios dispondrán de medios para que sus recintos se puedan ventilar adecuadamente, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los edificios, de forma que se aporte un caudal suficiente de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión del aire viciado por los contaminantes.*
 2. *Para limitar el riesgo de contaminación del aire interior de los edificios y del entorno exterior en fachadas y patios, la evacuación de productos de combustión de las instalaciones térmicas se producirá, con carácter general, por la cubierta del edificio, con independencia del tipo de combustible y del aparato que se utilice, de acuerdo con la reglamentación específica sobre instalaciones térmicas.*
- **HE-1 (CTE) - Limitación de demanda energética.** Se establecen reglas y procedimientos que permiten cumplir la siguiente exigencia básica:

Los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos.
- **HE-2 (CTE) - Rendimiento de las instalaciones térmicas.** *El cual se desarrolla en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, documento que tiene por objeto establecer las exigencias de eficiencia energética y seguridad que deben cumplir las instalaciones térmicas en los edificios destinadas a atender la demanda de bienestar e higiene de las personas, durante su diseño y dimensionado, ejecución, mantenimiento y uso, así como determinar los procedimientos que permitan acreditar su cumplimiento.*

Dentro de este documento es especialmente ilustrativo, en cuanto a los objetivos de eficiencia energética que se persiguen en las instalaciones de climatización, el artículo 12, que establece:

Artículo 12.- Las instalaciones térmicas deben diseñarse y calcularse, ejecutarse, mantenerse y

utilizarse de tal forma que se reduzca el consumo de energía convencional de las instalaciones térmicas y, como consecuencia, las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos, mediante la utilización de sistemas eficientes energéticamente, de sistemas que permitan la recuperación de energía y la utilización de las energías renovables y de las energías residuales, cumpliendo los requisitos siguientes:

- 1. Rendimiento energético: los equipos de generación de calor y frío, así como los destinados al movimiento y transporte de fluidos, se seleccionarán en orden a conseguir que sus prestaciones, en cualquier condición de funcionamiento, estén lo más cercanas posible a su régimen de rendimiento máximo.*
- 2. Distribución de calor y frío: los equipos y las conducciones de las instalaciones térmicas deben quedar aislados térmicamente, para conseguir que los fluidos portadores lleguen a las unidades terminales con temperaturas próximas a las de salida de los equipos de generación.*
- 3. Regulación y control: las instalaciones estarán dotadas de los sistemas de regulación y control necesarios para que se puedan mantener las condiciones de diseño previstas en los locales climatizados, ajustando, al mismo tiempo, los consumos de energía a las variaciones de la demanda térmica, así como interrumpir el servicio.*
- 4. Contabilización de consumos: las instalaciones térmicas deben estar equipadas con sistemas de contabilización para que el usuario conozca su consumo de energía, y para permitir el reparto de los gastos de explotación en función del consumo, entre distintos usuarios, cuando la instalación satisfaga la demanda de múltiples consumidores.*
- 5. Recuperación de energía: las instalaciones térmicas incorporarán subsistemas que permitan el ahorro, la recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales.*
- 6. Utilización de energías renovables: las instalaciones térmicas aprovecharán las energías renovables disponibles, con el objetivo de cubrir con estas energías una parte de las necesidades del edificio.*

3.2 Conceptos básicos y estado del arte de las instalaciones de climatización

A continuación se aclararán algunos conceptos básicos sobre climatización en edificios que serán de utilidad para una mejor comprensión del presente tema. Tras esto se realizará una descripción de las instalaciones más utilizadas, hoy en día, para cubrir las necesidades de climatización, prestando especial atención a su adecuación al objetivo del presente estudio, es decir, centrándonos en aquellas que generen menores emisiones y/o logren elevados niveles de eficiencia energética y cuya implantación en los edificios del aeropuerto sea viable.

3.2.1 Confort higrotérmico y otros principios de climatización.

Llamamos Confort Higrotérmico (CH) o bienestar térmico, según el CTE, a las condiciones interiores de temperatura, humedad y velocidad del aire que, se considera, producen una sensación de bienestar adecuada y suficiente a sus ocupantes. También según la normativa española al respecto, se consideran condiciones aceptables de confort las siguientes:

- **Temperatura.-** Entre 17°C y 27°C, si se realizan trabajos sedentarios o entre 14°C y 25°C, si son trabajos ligeros.
- **Humedad relativa.-** Entre 30% y 70%, excepto si hay riesgo por electricidad estática, en cuyo caso, el límite inferior será el 50%.
- **Velocidad del aire.-** Inferior a 0,25 m/s en ambientes no calurosos, inferior a 0,5 m/s en trabajos sedentarios en ambiente caluroso e inferior a 0,75 m/s en trabajos no sedentarios en ambientes calurosos. Para los sistemas de aire acondicionado, los límites son 0,25 m/s en trabajos sedentarios y 0,35 m/s en los demás casos.

Por otro lado, conviene tener presente el efecto de los mecanismos de intercambio de calor que estén en funcionamiento, por ejemplo, el cuerpo humano es más sensible al intercambio de calor por radiación, por lo que si la temperatura ambiente en un local es pequeña pero existe una radiación solar importante la sensación

de CH aumentará. De esta forma, otros factores del edificio o estancia que han de tenerse en cuenta a la hora de diseñar el sistema de climatización para darle servicio son:

- La presencia de focos de radiación, de entre los cuales debemos considerar especialmente el sol, a través de cristaleras o claraboyas además de la correspondiente a las paredes del edificio.
- La velocidad del aire en el interior.
- La presión parcial de vapor de agua.

Del estudio de las condiciones de confort en una determinada zona se generan las denominadas “cartas”, “climogramas”, o diagramas bioclimáticos de Givoni y de Olgyay, en las que se representan las relaciones entre varias variables climáticas involucradas en la sensación de confort térmico o higrotérmico. De estos diagramas, el más común es el de Givoni, en el que suele incluirse información de los sistemas climáticos necesarios para crear condiciones de confort. En la Gráfico 4 se presenta un ejemplo de un climograma de Givoni.

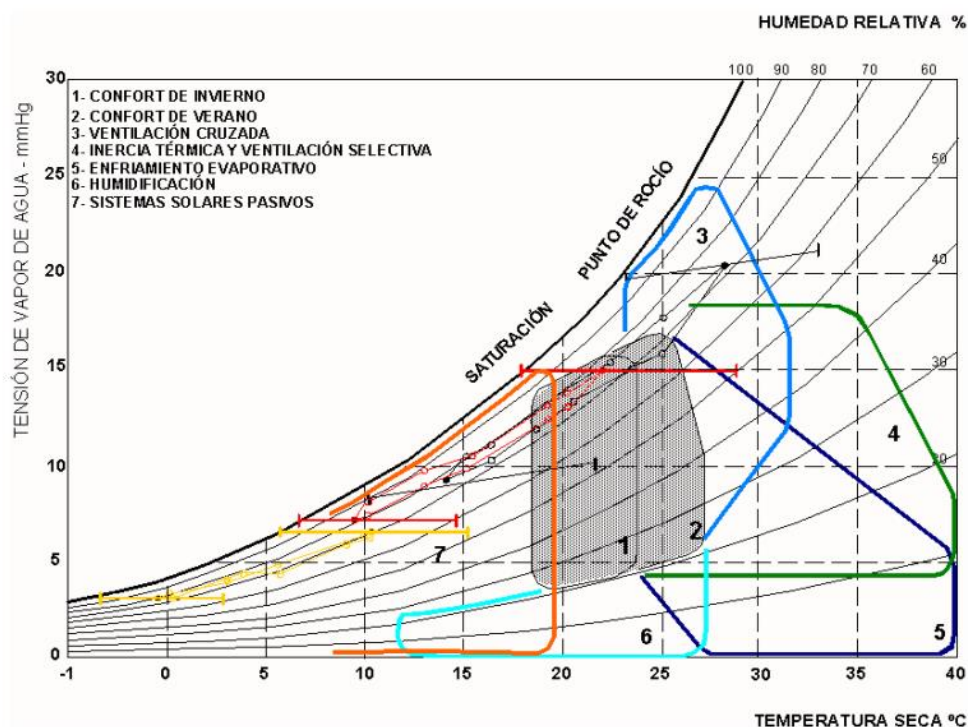


Gráfico 4.- Ejemplo del climograma de Givoni⁹.

Además, para alcanzar los niveles esperados de confort y habitabilidad en los espacios a acondicionar, éstos necesitan una correcta ventilación, es decir, la renovación del aire para reponer el contenido de oxígeno y retirar partículas u otras sustancias que hayan podido contaminar el aire durante su permanencia en el local, como anhídrido carbónico y aerosoles tales como olores corporales o el humo del tabaco. A veces, también es necesario tratar el aire exterior incorporado al local si sus propiedades no son las adecuadas.

3.2.2 Instalaciones de climatización

Las tres partes principales que integran un sistema de climatización son la calefacción, la ventilación y la refrigeración o aire acondicionado. Un primer paso a la hora de dimensionar un equipo de climatización consiste en hallar la potencia de producción de calor o de frío que nuestra instalación deberá proporcionar, en otras palabras, la demanda de calor de nuestra instalación. Esta potencia variará considerablemente entre estaciones, de un día a otro o en el transcurso de un mismo día, sin embargo, a efectos prácticos, los valores más importantes para el diseño serán los máximos anuales previsible y, en muchos casos, una forma de simplificar, será mediante la determinación de dos parámetros básicos: la potencia de producción de calor para climatización en invierno, y la potencia de producción de frío para la climatización en verano, donde ambas potencias se calculan

⁹ Fuente: Jorge Daniel Czajkowski [CC BY-SA 2.5 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5>)], via Wikimedia Commons

determinando la carga térmica existente en cada caso, la cual vendrá determinada principalmente por los siguientes factores:

- **La temperatura exterior.-** El calor se intercambia entre el edificio y el ambiente principalmente por conducción a través de los cerramientos. Un buen diseño de la inercia térmica del edificio es vital para evitar gastos energéticos tanto en verano como en invierno.
- **Insolación.-** Las mejoras técnicas y el empleo de nuevos materiales, así como los gustos estéticos actuales, han favorecido el aumento en el uso de los cristales en las fachadas de los edificios, especialmente en construcciones importantes como los aeropuertos, donde se han convertido en un recurso muy utilizado. No obstante, el incremento en la sensación térmica provocado por la radiación solar puede ser muy importante, especialmente en verano, además, el cristal puede crear un efecto invernadero en el interior de los edificios. En invierno, por contra, puede jugar a nuestro favor disminuyendo la necesidad de calefacción. Como regla general, el acristalamiento exterior no es deseable en climas cálidos, pero puede ser muy conveniente en climas fríos, especialmente si los cristales tienen buenas condiciones aislantes.
- **Aire exterior.-** Aquí debemos diferenciar el aire introducido no deseado (infiltración) o el aportado por la ventilación del local (renovación). El aire exterior introducido mediante los sistemas de ventilación tendrá unas propiedades higrotérmicas que pueden estar bastante alejadas de las requeridas, por lo que puede ser necesario alterar su temperatura y/o humedad.
- **La ocupación.-** El cuerpo humano emite calor continuamente por acción del metabolismo. El calor metabólico emitido dependerá fundamentalmente de la posición e intensidad del trabajo que se esté realizando, luego para realizar el cálculo de la carga térmica por ocupación será necesario conocer el número de usuarios esperable en cada estancia del aeropuerto y el calor metabólico emitido por éstos en función de su actividad.
- **Iluminación, ofimática y otros.-** La iluminación es un factor muy importante, dependiendo de la capacidad y tipo de iluminación instalada se pueden alcanzar potencias térmicas de entre 15 a 25 W/m² (Galludo y Navarro 2006). Junto a ésta, otros aparatos como motores, productos de ofimática, o en general, cualquier consumidor de energía en funcionamiento, aportará una cantidad de energía térmica que convendrá ser tenida en cuenta.

A groso modo, podemos decir que un sistema de climatización completo constaría de al menos los siguientes elementos:

- **Equipo generador de energía térmica.**
 - Bombas de calor, calderas, colectores de energía solar, etc., para calefacción.
 - Máquinas de compresión de vapor, bombas de calor reversibles y máquinas de absorción y adsorción.
- **Climatizador o Unidad de Tratamiento de Aire (UTA).**
- **Red de distribución.**
 - Redes primarias y secundarias, transportan agua y/o aire principalmente (fluidos térmicos).
- **Equipos terminales.**
 - Ventilconvectores, radiadores, difusores, suelo radiante, etc.
- **Sistema de instrumentación y control sobre la instalación.**
 - Desde simples termostatos hasta complejos sistemas de control centralizado como el BAS.

En el siguiente apartado ofreceremos una descripción más detallada de estos sistemas.

La siguiente pregunta que conviene realizarse al instalar un sistema de climatización en un aeropuerto será acerca de la configuración básica del sistema en cuanto a su integración en el edificio, para la que los principales modelos son (Guillamón 2004):

- **Modelo centralizado.-** Si se produce la energía térmica (calor y/o frío) en un único punto y se reparte mediante conducciones a otros puntos del edificio o un conjunto de edificios (District Heating), es la configuración más común en grandes edificios de uso público como aeropuertos. El propósito es el uso

de un mismo generador para todo el edificio o conjunto de edificios o para amplias zonas del mismo.

- **Modelo unitario.-** Modelo descentralizado. Se climatiza por zonas o estancias mediante equipos independientes. Su ventaja respecto al modelo centralizado es que generalmente disminuye la red de distribución o ésta es inexistente, con lo que podemos evitar pérdidas térmicas.

En general, el modelo unitario presenta importantes desventajas en comparación a los sistemas centralizados en grandes edificios, que convierten a estos últimos en la opción favorita en la mayoría de aeropuertos. Las principales de estas desventajas son:

- El rendimiento energético disminuye con el tamaño de los equipos, la eficacia energética de equipos unitarios puede ser a veces muy inferior a la de equipos centralizados.
- El coste de un equipo centralizado es en general menor al de muchos equipos individuales.
- Mayores dificultades en la instalación de los equipos.
- Complicación en las labores de mantenimiento: menos precisas y más costosas. Al existir un mayor número de equipos la probabilidad de fallo es más elevada.
- Complicación en la aplicación de prácticas de ahorro energético como el free-cooling, la recuperación de calor o el enfriamiento evaporativo, comentadas más adelante.

En la literatura es habitual referirse a los sistemas de climatización como sistemas HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), especialmente al referirnos a un mismo sistema centralizado que integre estas tres funciones, es decir, un sistema de climatización completa, que trata el aire del ambiente en todos sus parámetros: limpieza (ventilación y filtrado), temperatura (aportando tanto frío como calor), humedad y a veces hasta presión. Este suele ser el caso de edificios grandes y modernos en los que se busquen unas condiciones de confort óptimas y un alto grado de eficiencia energética, un buen ejemplo de los cuales son las terminales aeroportuarias. Por tanto, serán en este tipo de instalaciones, es decir, en las instalaciones centralizadas de climatización, en las que centraremos nuestra atención en el presente Proyecto.

3.2.2.1 Equipos generadores de energía térmica

Diferenciamos entre generadores de calor para calefacción y ACS y generadores de frío para refrigeración o aire acondicionado. En instalaciones con potencia térmica superior a los 70 kW, el local técnico en el que se encuentren alojados los equipos de generación tanto de calor como de frío, así como otros equipos auxiliares y accesorios de la instalación térmica, recibe el nombre de sala de máquinas, y deberá ajustarse a la legislación básica al respecto contenida en el RITE, IT 1.3.4.1.2.

3.2.2.1.1 Calefacción

Para calefacción diferenciaremos tres tipos de generadores: las calderas, las bombas de calor y los colectores solares térmicos, el cual consideraremos separadamente en el Apartado 3.3.4.1 por tratarse de un sistema exclusivamente basado en energía renovable. Otros sistemas, como los sistemas de calefacción eléctricos, han sido ignorados por su ineficiencia o por no ser apropiados para la calefacción de este tipo de edificio.

3.2.2.1.1.1 Caldera

Según la definición ofrecida en el RITE una caldera es un *“equipo a presión en el que el calor procedente de cualquier fuente de energía se transfiere a los usos térmicos del edificio por medio de un circuito de agua cerrado. No se incluyen en esta definición aquellos equipos basados en motores de combustión interna o externa, los de cogeneración o bomba de calor”*.

Estas máquinas constan de tres elementos principales:

- Un sistema productor de calor, que será una parrilla, en el caso de combustibles sólidos, una resistencia eléctrica en el caso de las calderas eléctricas, o un quemador si se utilizan combustibles fluidos.
- Un intercambiador de calor, en el que el agua es calentada usando los gases calientes producidos en la combustión, y en ocasiones también el calor de la llama.
- Un sistema de evacuación de los productos de la combustión.

Para medir la eficiencia de calderas el término que suele usarse es el rendimiento (η):

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1}$$

Donde Q_2 es el calor exportado al fluido en el intercambiador de calor y Q_1 es la energía calorífica contenida en el combustible usando el poder calorífico inferior (PCI), es decir, descontando el calor perdido por la evaporación de vapor de agua en la combustión. Este convenio permite que, por ejemplo, en las calderas de condensación, donde es aprovechable el poder calorífico superior, el rendimiento sea superior al 100%.

Un valor más realista para medir la eficiencia de las calderas es el rendimiento estacional (η_e), el cual mide el rendimiento a lo largo de toda la campaña de invierno teniendo en cuenta las condiciones variables de demanda y funcionamiento de una instalación real. El AFUE (Annual Fuel Utilization Efficiency) también es muy usado en la práctica para medir el rendimiento medio anual.

Muchas calderas, además de para climatización, también pueden ser usadas para obtener Agua Corriente Sanitaria (ACS) o para otros usos industriales, en cuyo caso suelen usar vapor como fluido térmico en lugar de agua. En el mercado actual existe una variada oferta de calderas y multitud de clasificaciones de las mismas: en función del tipo de combustible, fluido térmico, limitación de temperatura de retorno, forma de combustión y evacuación de humos, etc. A continuación diferenciaremos los tipos de calderas existientes centrándonos en aquellas características que más influirán en las emisiones por ellas generadas, estos son: el combustible utilizado, y la eficiencia en la obtención del calor.

Encontramos que la principal diferenciación entre calderas es precisamente aquella basada en el tipo de combustible, de entre las que analizaremos solo aquellas mayoritariamente usadas en climatización para grandes edificios como las terminales aeroportuarias: las calderas convencionales de combustibles fluidos (gas natural, gasóleo o diésel, aunque también biogás, syngas o biodiésel) y las calderas de biomasa (en estado sólido). La siguiente clasificación ha sido realizada a partir de (IDAE 2010a), (IDAE 2008), (IDAE 2009b) y (López, Banyeras y Barreras 2012).

- **Caldera de combustibles fluidos.**- Los principales componentes de estas calderas son el quemador, en el que el combustible es preparado y quemado con la proporción idónea de aire, el intercambiador de calor, en el que los gases de combustión aportan energía calorífica al fluido térmico de la red primaria, y la chimenea. Estas máquinas cubren un rango amplio de potencias, los modelos de media potencia cubren desde el orden de los 10 kW hasta el orden de los 100 kW, mientras que los modelos usados para climatización de grandes edificios pueden alcanzar potencias de varias decenas de Megavatios. Los combustibles empleados suelen ser gaseosos, en general gas natural o propano, aunque también pueden emplearse combustibles líquidos como el gasóleo. Combustibles obtenidos de la biomasa, como el biogás o el biodiésel también pueden también ser usados en este tipo de calderas, en cuyo caso el beneficio medioambiental se incrementa enormemente, ya que estos combustibles generan muchas menos emisiones de CO_2 a lo largo de su ciclo de vida.



Imagen 4.- Caldera de gas en la sala de calderas del Aeropuerto de Sumburgh, (Islas Shetland, Escocia)¹⁰.

¹⁰ Fuente: Ness Engineering Ltd.

La mayoría de calderas de este tipo usadas en climatización usan agua como fluido térmico, siendo las calderas de vapor generalmente usadas para generación eléctrica, y estando en desuso para funciones de climatización por los riesgos para la seguridad humana que entrañan.

La principal división que podemos realizar a continuación, de gran importancia normativa, pero que también guarda gran relación con las distintas funciones que pueden desempeñar y las distintas eficiencias que estas calderas son capaces de alcanzar, tiene que ver con la temperatura de salida del agua de la caldera:

- **Calderas de agua caliente.-** La temperatura del agua es inferior a 110°C. Es de especial aplicación en este caso la normativa 92/42/CE sobre calderas nuevas de agua caliente alimentadas con combustibles líquidos y gaseosos. Suelen estar construidas para potencias pequeñas o medias, aunque se pueden encontrar modelos en el mercado de hasta el megavatio.

A su vez podemos diferenciarlas en:

- **Calderas convencionales.-** Tienen un rendimiento más bajo debido a que no están diseñadas para soportar condensaciones, por lo que la temperatura de retorno suele estar siempre entre los 55°C - 60°C para evitar que ésta se produzca. El rendimiento estacional de este tipo de calderas también se ve mermado al tener problemas para adaptar la demanda con la producción. Las calderas de este tipo que poseen una mayor eficiencia son aquellas que trabajan con temperaturas de humos más bajas, de unos 140°C o inferiores.
- **Calderas de baja temperatura.-** Funcionan igual que las convencionales pero trabajan a temperaturas de retorno menores (35°C-40°C). Debido a que producen agua a menor temperatura son muy recomendables para ser usadas con suelo radiante. Poseen rendimientos un 15% superior a las convencionales.
- **Calderas de condensación.-** Están diseñadas para condensar de manera permanente una parte importante del vapor de agua contenido en los gases de combustión trabajando con una temperatura de humos muy inferior al resto de calderas, lo que permite aprovechar el calor latente de estos gases, y obtener así un rendimiento mayor. Como contrapartida son más costosas, debido a que emplean materiales anticorrosión. El agua es obtenida a baja temperatura, por lo que también son muy recomendable su uso combinado con sistemas de suelo radiante.

En el rango de media potencia este tipo de calderas serán la opción preferente debido a las importantes ventajas económicas que su elevado rendimiento implica en instalaciones con elevada carga de calefacción y elevadas horas diarias de uso, como es el caso de los aeropuertos. En general, en aeropuertos de alta demanda energética será necesaria la instalación de varias de estas calderas en cascada, lo que permitirá un mejor ajuste de la producción con la demanda con una merma mínima en la eficiencia total del sistema. Estas instalaciones pueden ser factibles hasta potencias del orden del megavatio.

- **Calderas de agua sobrecalentada.-** Para este tipo de calderas es de aplicación la Directiva 97/23/CE sobre equipos a presión. En ellas el agua es calentada a más de 110°C. Suelen ser fabricadas para grandes potencias y presentan rendimientos de hasta el 90% sin, 95% con intercambiador de calor de humos, o 105% con intercambiador de calor de condensación. Son más apropiadas para suministro remoto debido a que pueden soportar mayores pérdidas térmicas en la distribución. Entrañan mayores riesgos de seguridad debido a que el agua se encuentra a una temperatura muy alta y a alta presión.
- **Caldera de biomasa.-** La biomasa puede alimentar al sistema de climatización del mismo modo que si se tratase de gas, gasóleo o electricidad. En general podemos considerar la biomasa como un combustible neutro en emisiones de CO₂, si bien consideraciones a este respecto vienen recogidas en el Capítulo 5, en el que se habla en más detalle de esta fuente energética. Los tipos de biomasa brutos o petratados empleados comúnmente para sistemas de calefacción son:
 - **Pélets.-** Biocombustibles estandarizados a nivel internacional. Los pélets de madera natural son los más adecuados para grandes edificios.

- **Astillas.-** Provenientes de la transformación de la madera o de tratamientos silvícolas y forestales.
- **Residuos agroindustriales** (huesos de aceituna, cáscaras de frutos secos, almendra, piña...).
- **Leña.-** Autoproducida o adquirida en el mercado.

Las calderas de biomasa pueden clasificarse atendiendo al tipo de combustible que admiten y a la clase de tecnología que utilizan, factores que suelen ir de la mano. En función del combustible diferenciamos:

- **Calderas específicas de pélets.-** Compactas y eficientes, para potencias pequeñas de hasta 40 kW.
- **Calderas de biomasa.-** Para potencias pequeñas y medias. No pueden usar diferentes tipos de combustible simultáneamente, aunque puede cambiarse el tipo de combustible utilizado de una vez a otra.
- **Calderas mixtas o multicomcombustible.-** Desde potencias medias (unos 200 kW) a potencias grandes. Permiten cambiar entre varios combustibles de una forma rápida y eficiente.

Otra característica importante es el grado de automatización: existen calderas que funcionan de forma automática, en las cuales la biomasa, tras ser depositada en los tanques de almacenamiento, es llevada a la caldera mediante un sistema transportador automático, y todo el proceso de combustión es realizado computacionalmente, por lo que muchas veces solo es necesaria una persona encargada de manejar el ordenador; por el contrario existen calderas que funcionan de forma semi-automática en las que se necesita de una mayor mano de obra para mantenerlas operacionales, aunque de esta forma se consigue adaptar mejor el funcionamiento de la caldera a las variaciones de la demanda, haciéndolas más eficientes. Estas últimas presentan altos costes operacionales.

Una clasificación tecnológica de las mismas muy relacionada con el nivel de eficiencia es la siguiente:

- **Calderas convencionales adaptadas para biomasa.-** Suelen ser antiguas calderas de carbón adaptadas para poder ser utilizadas con biomasa, o calderas de gasóleo con un quemador de biomasa. Aunque resultan baratas, su eficiencia es reducida, situándose en torno al 75-85%. Suelen ser semi-automáticas ya que, al no estar diseñadas específicamente para biomasa, no disponen de sistemas específicos de mantenimiento y limpieza.
- **Calderas estándar de biomasa.-** Diseñadas específicamente para un combustible determinado (pélets, astillas, leña,...), alcanzan rendimientos de hasta un 92%, aunque suele ser posible su uso con un combustible alternativo a costa de una menor eficiencia. Generalmente se trata de calderas automáticas ya que disponen de sistemas automáticos de alimentación del combustible, de limpieza del intercambiador de calor y de extracción de las cenizas.



Imagen 5.- Caldera de biomasa para astillas de madera en el Aeropuerto de Stansted, (Londres, UK)¹¹.

¹¹ Fuente: Advantage Austria.

- **Calderas mixtas.-** Las calderas mixtas permiten el uso alternativo de dos combustibles, haciendo posible el cambio de uno a otro si las condiciones económicas o de suministro de uno de los combustibles así lo aconsejan. Necesitan de un almacenamiento y de un sistema de alimentación para cada combustible, por lo que el coste de inversión es mayor que los de otras tecnologías. Su rendimiento es alto, cercano al 92%, y son calderas totalmente automáticas.
- **Calderas de pélets de condensación.-** Pequeñas, automáticas y para uso exclusivo de pélets. Recuperan el calor latente de condensación contenido en el combustible bajando progresivamente la temperatura de los gases hasta que se condensa el vapor de agua en el intercambiador. Mediante esta tecnología, el ahorro de pélets es del 15% respecto a una combustión estándar, logrando así las mayores eficiencias del mercado, con un rendimiento de hasta el 103% respecto PCI. Para potencias en general no superiores a los 70 kW.

3.2.2.1.2 Bomba de calor

Es una máquina térmica que transfiere calor desde una fuente de bajo nivel térmico o baja temperatura (foco frío) a otra fuente de mayor nivel térmico o temperatura (foco caliente) mediante la aportación de un trabajo (compresión del refrigerante), tal como exige la Segunda Ley de la Termodinámica. Estas máquinas emplean un fluido refrigerante con bajo punto de ebullición, el cual realiza un ciclo compuesto de cuatro fases (ciclo de compresión de vapor), las cuales pueden verse representadas gráficamente en la Imagen 6 y el Gráfico 5, y son explicadas a continuación:

1. **Condensación isobárica.-** El fluido refrigerante, en estado gaseoso sobrecalentado tras salir del compresor a alta presión y temperatura, es incorporado a un condensador, el cual funciona como un intercambiador de calor cediendo calor al foco caliente. Este foco, pese a su nombre, debe encontrarse a menor temperatura que el fluido y, en caso de que la bomba trabaje en calefacción será el aire del local a climatizar. En la realidad esta condensación no será totalmente isobárica, sino que se producirán pérdidas energéticas por la disminución de presión. Finalmente, el fluido abandona el condensador tras ser transformado a estado líquido subenfriado.
2. **Expansión isoentálpica.-** Posteriormente es empleada una válvula de expansión para disminuir drásticamente la presión del fluido, con lo que este disminuye su temperatura y además comienza a evaporarse.
3. **Evaporación isobárica.-** A continuación el fluido pasa a un evaporador, en el que vuelve a estado gaseoso absorbiendo calor del foco frío, el cual ha de encontrarse a mayor temperatura que el fluido. En la realidad este proceso no será totalmente isobárico debido a las pérdidas energéticas.
4. **Compresión isoentrópica.-** Por último el fluido en estado gaseoso retorna al compresor, que aumenta su presión y temperatura, tras lo cual el fluido es de nuevo incorporado al condensador dando lugar a una nueva repetición del ciclo. En realidad la entropía no podrá mantenerse totalmente constante, sino que aumentará.

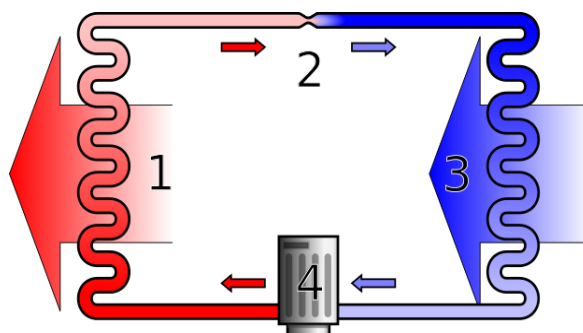


Imagen 6.- Esquema del ciclo de la bomba de calor¹².

En la práctica pueden emplearse ciclos más complejos basados en éste, por ejemplo incluyendo un mayor número de etapas en el evaporador para sacar mayor provecho al calor latente del gas refrigerante.

¹² Fuente: Wikimedia Commons.

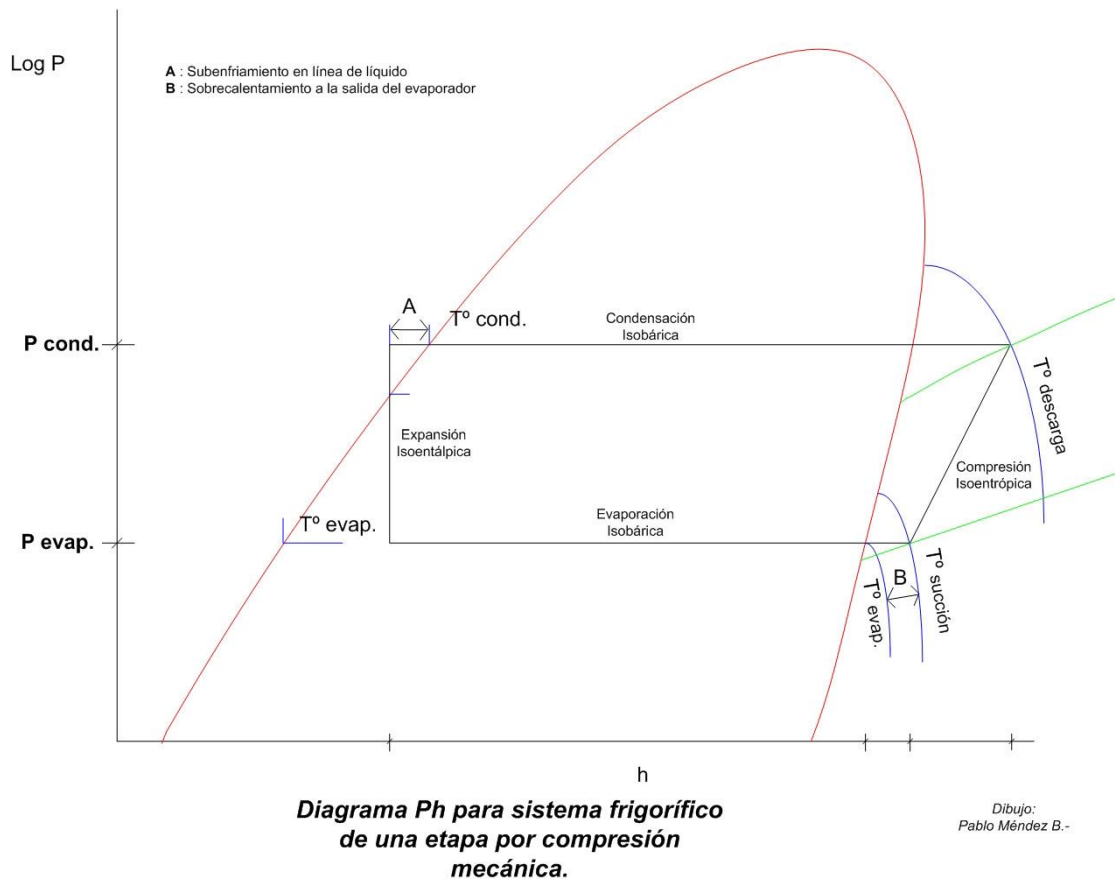


Gráfico 5.- Ciclo ideal de compresión de vapor de una sola etapa. Diagrama Ph¹³.

Existen modelos de bombas de calor cuyo ciclo puede ser invertido mediante el uso de una válvula inversora de ciclo (o una válvula de cuatro vías). Estas máquinas, llamadas bombas de calor reversibles pueden ser usadas para calefacción o refrigeración según interese, y permiten evitarnos el alto coste que supone instalar sistemas separados de calefacción y refrigeración, ahorrando además espacio y mantenimiento. Sin embargo, ya que en estas máquinas condensador y evaporador han de intercambiar funciones, el rendimiento es ligeramente inferior al de dos bombas de calor, una optimizada para calor y otra para refrigeración, trabajando separadamente (Guillamón 2004).

El consumo energético de la bomba de calor es debido a la necesidad de accionar el compresor para poner en marcha el ciclo. Como fuente energética suele emplearse la electricidad, aunque como alternativa también puede emplearse gas natural, como es el caso de la bomba de calor de absorción de gas, con las que se aumenta la eficiencia energética y puede disminuirse enormemente las emisiones generadas (Evans 2010). Este tipo de bombas de calor, sin embargo, aún tiene una presencia muy limitada en el mercado.

La principal clasificación de las bombas de calor para calefacción (o para climatización en general si se usan bombas reversibles) se realiza en función del foco frío empleado (considerando solo el proceso de calefacción), el cual convendrá que sea abundante y gratuito, con la menor variación térmica posible y temperaturas próximas a las del espacio a calentar. Consideramos sólo los más importantes:

- **Aire atmosférico.-** Son las llamadas bombas de calor aerotérmicas, las que usan como foco frío el aire exterior del edificio. Su funcionamiento es esencialmente el mismo, pero operando en modo inverso a los sistemas de refrigeración por compresión convencionales usados en los equipos de aire acondicionado. Actualmente estas máquinas siguen siendo una opción eficiente y competitiva frente a las calderas convencionales, sin embargo su uso en lugares con temperaturas muy bajas en invierno puede disminuir su rendimiento considerablemente y suponer un fuerte impedimento, por lo que el

¹³ En esta gráfica la línea roja (campana de saturación) delimita el área de vapor húmedo del refrigerante. Las líneas azules son líneas de temperatura constante, y las líneas verdes de volumen constante. By Neurotronix (Own work) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons.

empleo de este tipo de bombas suele estar limitado a aeropuertos emplazados en zonas con inviernos suaves. El uso de otras fuentes como la energía geotérmica, el agua subterránea o gases residuales permite paliar este problema.

Existen dos tipos en función del fluido térmico empleado (Galludo y Navarro 2006):

- **Bombas de calor aire-aire.-** Utilizan aire como fluido térmico. Son las más usadas para sistemas de climatización de pequeña potencia, y son normalmente reversibles. A su vez pueden ser unidades compactas o partidas. Pueden ser necesarios ventiladores para impulsar el aire a través de los conductos.
- **Bombas de calor aire-agua.-** El calor se toma del aire y se transfiere a un circuito de agua que abastecerá a los equipos terminales, normalmente radiadores, ventiloconvectores o suelo radiante. Estos sistemas son más eficientes que los sistemas aire-aire, debido a que el uso de agua permite obtener un caudal más reducido para transportar la misma cantidad de calor, por contra estos sistemas resultan más costosos. Además de para calefacción y refrigeración también puede ser usado para ACS.

El sistema de climatización por bomba de calor puede ser monovalente, si se encarga por sí sola de todas las necesidades térmicas del edificio, o bivalente, donde actúa junto a una caldera. En una instalación bivalente puede operarse de forma que, solo a partir de una determinada temperatura exterior, la bomba de calor suministre toda la demanda térmica del edificio, y que por debajo de esta temperatura entre en funcionamiento la caldera de apoyo, que puede funcionar junto a la bomba de calor o de forma independiente; este sistema es llamado funcionamiento bivalente en serie o alternativo y con él se evitan pérdidas importantes de rendimiento en la bomba de calor y una mayor vida útil de la misma (Galludo y Navarro 2006).

- **Subsuelo.-** La energía geotérmica es aprovechada por las bombas de calor geotérmicas en terrenos de baja o muy baja entalpía para aplicaciones de climatización y ACS. En el caso de emplear una bomba de calor reversible, ésta podrá usarse tanto para calefacción como para refrigeración, en cuyo caso el terreno cumplirá la función de sumidero, permitiéndonos así cubrir total o parcialmente la demanda energética necesaria para la climatización de edificios también durante los meses donde la refrigeración sea necesaria. Además, al aportar calor al terreno de esta forma aumentaremos la temperatura del mismo y mejoraremos el rendimiento del sistema cuando sea usado para calefacción (IDAE 2010b).

Ya que en verano el subsuelo suele estar considerablemente más fresco que el ambiente exterior, y a su vez, en invierno, suele estar bastante más caliente que éste, el rendimiento del sistema será considerablemente mayor al esperable si el aire exterior es usado como sumidero. En particular, estos sistemas presentan un COP muy alto, de entre 4 y 6, si los comparamos con los de las bombas de calor convencionales más eficientes, cuyos valores pueden rondar entre 2 y 4.



Imagen 7.- Construcción de la instalación horizontal de captación geotérmica en el Aeropuerto de Juneau (Alaska, EEUU)¹⁴.

¹⁴ Fuente: KTOO Public Media.

- **Agua.-** En general usan el agua subterránea, con la que se puede conseguir mayor eficiencia que con la energía geotérmica, pero que solo es una alternativa en lugares donde sea posible acceder a ésta. También existe la posibilidad de usar tanto el aire exterior como el calor del subsuelo cuando este aire se encuentre a una temperatura demasiado baja, éste es el caso de las bombas de calor híbridas.

Para medir el rendimiento de las bombas de calor se usa el término adimensional COP (Coefficient Of Performance), que se define como:

$$COP = \frac{Q}{W}$$

Donde Q es el calor aportado al foco caliente en calefacción o sustraído al foco frío en refrigeración, y W es el trabajo aportado, generalmente electricidad, que al no ser una forma de energía primaria permite que el COP sea superior a la unidad.

En el caso de usar el aire exterior como foco frío, debido a las importantes variaciones de rendimiento, se suelen utilizar índices estacionales, como el HSPF (Heating Season Performance Factor), que mide la eficiencia media estacional de una bomba de calor en calefacción, o el SCOP (Seasonal Coefficient of Performance), que mide la eficiencia anual.

A efectos medioambientales, ya que las bombas de calor usan electricidad para funcionar, las emisiones generadas dependerán de la forma en que la electricidad suministrada es obtenida, por lo que podrán generarse desde emisiones nulas o muy bajas, en el caso de emplearse energías renovables para su obtención, hasta incluso llegar a constituir una fuente mayor de emisiones que una caldera, si la electricidad es generada mayoritariamente en centrales térmicas de carbón.

3.2.2.1.1.3 Comparación máquinas térmicas para calefacción

A continuación se compararán los equipos analizados hasta ahora:

- **Calderas**

Conforme a lo analizado hasta ahora en cuanto a los tipos de calderas disponibles en el mercado encontramos que un primer factor determinante a la hora de considerar una caldera frente a otra será la potencia necesaria en nuestras instalaciones. En el caso de necesitar un generador de muy elevada potencia, la opción típica será la caldera de agua sobrecalentada, mientras que para potencias medias o altas, en general no superiores al megavatio, las preferidas serán las calderas de condensación por sus excelentes valores de eficiencia.

En el caso de las calderas de biomasa, con propiedades excelentes desde un punto de vista de las emisiones, los modelos más apropiados de entre los analizados para su uso en aeropuertos serán las calderas estándar o las calderas mixtas para potencias medias y elevadas (del orden de los 100 kW o superiores), que ofrecen niveles de eficiencia muy altos. Asimismo, las calderas de pélets de condensación, que ofrecen los rendimientos más altos, serán la opción preferencial si buscamos calderas de potencia media o baja (del orden de los 10 kW). Las emisiones de CO₂ generadas, si bien están en su totalidad o en gran parte compensadas si consideramos el ciclo de vida total del combustible, serán siempre menores a mayor eficiencia del sistema.

Una comparativa en función de los combustibles usados, considerando sus precios en el mercado y sus niveles de emisiones corregidos en función de la eficiencia de los sistemas, es presentada a continuación:

Caldera	AFUE	PCI	Precio ¹⁵ (€/kWh)	Precio (€/kWh _t)	Emisiones (CO ₂ /kWh)	Emisiones (gCO ₂ /kWh _t)	Coste inicial	Potencia ¹⁶
Caldera de gas natural (agua caliente)	0,95	10,83 kWh/Nm ³	0,0411	0,043	204	215	Bajo-Medio	Media
Caldera de propano (agua caliente)	0,95	12,93 kWh/kg	0,081	0,085	233	245	Bajo	Media
Caldera gasóleo	0,9	10,28 kWh/l	0,1	0,111	273	303	Bajo	Alta
Caldera gas natural (agua sobrecalentada)	0,9	10,83 kWh/Nm ³	0,0411	0,046	204	227	Bajo	Alta
Caldera biomasa (pélets)	0,85	4,64 kWh/kg	0,0413	0,049	-	-	Medio	Media - Alta

Tabla 4.- Comparativa de calderas¹⁷.

En la Tabla anterior solo se han considerado los combustibles con posibilidades reales de uso en calderas de media-alta potencia en el mercado español actual, además, en el caso de la biomasa solo se han considerado los pélets ya que, además de ser el tipo de biomasa más utilizada en calderas, sus propiedades y precios gozan de mayor estandarización. También para el caso de la biomasa, las emisiones se han estimado nulas al considerarse el ciclo de vida completo del combustible, del mismo modo, conviene tener presente que, al considerarse el ciclo de vida completo del resto de combustibles, las emisiones resultantes aumentarían considerablemente.

Analizando los datos recopilados vemos que el empleo del gas natural y, por supuesto, de la biomasa, resultan ser las opciones más económicas y más respetuosas con el medio ambiente a día de hoy. Mientras que la biomasa se presenta como la opción medioambientalmente más beneficiosa, el gas natural resulta aproximadamente un 25% más económico (mayor aún si consideramos calderas de condensación). Esta diferencia en los costes tiende, no obstante, a reducirse, ya que el menor incremento interanual del precio de los pélets los hace cada vez más competitivos. Para profundizar en la comparativa entre ambos combustibles convendría tener en cuenta otros parámetros, como por ejemplo, los costes de adquisición y mantenimiento de las calderas, que variarán en función de las necesidades de potencia. Asimismo, habría que valorar el uso de otros tipos de biomasa en el estudio, aparte de los pélets, que puedan resultar más económicos, como residuos industriales o agroalimentarios que además puedan estar disponibles en la zona.

- **Bomba de calor**

Se ha realizado una comparativa de los dos principales tipos de bombas de calor para calefacción en función del foco frío que utilizan:

¹⁵ Precios (Sin IVA): Propano (Canalizado): <http://propanogas.com>
Gas natural y pélets: Ver Anexo de la Tabla 27.

¹⁶ Media potencia 30 - 120KW. Elevada Potencia: >120kW

¹⁷ Fuentes: Energy Star, IDAE, DirectIndustry, www.preciogas.com, AVEBIOM.

Tipo de bomba	HSPF ¹⁸ (adimensional)	Precio calefacción ¹⁹ (€/kWh _t)	Emisiones ²⁰ (grCO ₂ /kWh _t)	Coste inicial	Potencia
Bomba de calor geotérmica	4,2	0,024	154,5	Alto	Todas
Bomba de calor aerotérmica	3,5	0,028	185	Medio	Pequeña-Media

Tabla 5.- Comparativa de bombas de calor para calefacción²¹.

Los valores de eficiencia estacional se corresponden a equipos modernos de gama alta, por lo que los valores medios de estos sistemas serán más bajos a los aquí considerados. Además, éstos variarán dependiendo del lugar geográfico.

A la hora de realizar una comparación con las calderas de la Tabla 4 conviene tener presente que los valores de eficiencia en ella recogidos corresponden a valores anuales. Asimismo, para obtener valores de eficiencia más realistas para las bombas de calor habría que tener presentes las condiciones climáticas y del terreno del emplazamiento concreto en el que sean instaladas.

Aun teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, de los resultados obtenidos en esta tabla se desprende que el uso de la energía geotérmica tiene importantes ventajas medioambientales y económicas frente al uso del aire exterior, ya que presenta un rendimiento significativamente mayor. Asimismo, considerando el precio y emisiones generadas de la electricidad en España, la bomba de calor geotérmica, comparada con las calderas analizadas en la Tabla 4, resulta una opción altamente competitiva tanto por sus reducidas emisiones de GEI, como, y más especialmente, por sus bajos costes de operación. La bomba de calor aerotérmica, por su parte, también presenta un coste de operación reducido para calefacción, sin embargo sus emisiones son relativamente elevadas.

3.2.2.1.2 Equipos de refrigeración

En cuanto a los equipos térmicos empleados para la obtención de aire acondicionado, consideraremos en primer lugar aquellos sistemas que utilizan el ciclo de compresión, que son generalmente los más empleados, y posteriormente introduciremos los sistemas de refrigeración por adsorción y absorción, los cuales gozan de una implantación cada vez mayor, especialmente en instalaciones que requieren de una potencia de refrigeración elevada en las que existan equipos electrógenos que produzcan calor residual u otras fuentes de generación de energía térmica, como la energía solar o la biomasa.

3.2.2.1.2.1 Generador de frío por compresión

Para aire acondicionado de edificios, también llamado refrigeración ambiental, el sistema más empleado es el generador de frío por compresión, el cual funciona de forma similar a la bomba de calor ya explicada, esto es, sometiendo a un fluido refrigerante a un ciclo de compresión (compresión, condensador, válvula de expansión y evaporador). La diferencia reside en que ahora el objetivo es enfriar el foco frío (la estancia a climatizar es ahora el foco frío), y no calentar el foco caliente, como era el caso de la bomba de calor para calefacción. De forma homóloga a como ocurría con bombas de calor pueden ser clasificados en



Imagen 8.- Enfriadora centrífuga de 7000 kW de potencia térmica en el Aeropuerto de Kansai (Japón)²².

¹⁸ Criterio de Certificación Energy STAR.

¹⁹ Iberdrola grandes consumidores.

²⁰ Coeficiente de paso para certificación energética de edificios en España (649 gCO₂/kWh).

²¹ Fuentes: IDAE, Energy Star.

²² Fuente: Heating & Cooling Supply Co., Ltd.

función de la fuente a la que ceden calor, siendo el aire la más usada, aunque también puede cederse calor al subsuelo (bomba geotérmica reversible) o a una masa de agua. En este apartado nos centraremos en aquellos que utilizan el aire como sumidero.

En este caso, otra clasificación fundamental de estos equipos se basa en el fluido que utilizan para extraer calor del condensador. En general, los equipos de menor potencia suelen usar aire directamente (equipos condensados por aire), por lo que disponen de ventiladores para generar un flujo suficiente que permita disipar el calor del condensador. En el caso de máquinas para potencias más elevadas la unidad condensadora suele ceder el calor a una corriente de agua u a otro líquido refrigerante, normalmente R-134a o R-410a. En este caso suelen usarse torres de refrigeración para enfriar de nuevo el refrigerante mediante un proceso de enfriamiento evaporativo (ver pag. 52).

Estos equipos pueden utilizar cuatro tipos de compresores: alternativo, scroll, de tornillo y centrífugo, los cuales pueden ser accionados, bien por un motor eléctrico o bien por una turbina de gas.

Fundamentalmente diferenciamos 4 tipos de estos equipos (Evans 2010):

- **Equipos de ventana o compactos independientes.**- Todas las etapas del proceso están integradas de forma compacta en el mismo equipo, por lo que deben colocarse forzosamente en el cerramiento del local. Además no suelen ser útiles en grandes superficies debido a que la potencia suministrada por estos equipos suele ser pequeña ($< 3\text{kW}$). Por estas razones no serán de gran utilidad en aeropuertos excepto en casos puntuales, como para la climatización de pequeñas estancias a las que sea difícil acceder a través de las redes de distribución en sistemas centralizados y dispongan de algún cerramiento exterior.
- **Equipos partidos (Split o Cassette).**- Están divididos en dos partes, la unidad condensadora, y la evaporadora. En la primera está contenido el compresor, el condensador y la válvula de expansión, y es colocada en el exterior para disipar mejor el calor generado y evitar posibles molestias ocasionadas por el ruido del compresor. En la unidad evaporadora está contenido el evaporador y un ventilador, y es instalada en el interior de la estancia a climatizar, ya sea en una pared o empotrada en un falso techo. Son también equipos independientes para potencias pequeñas, pero más versátiles que los equipos compactos, y, al igual que éstos, pueden ser útiles en aquellas áreas a las que sea complicado acceder mediante un sistema centralizado aunque con la ventaja añadida de que en este caso no tienen por qué poseer paredes que den al exterior.
- **Equipos Roof-Top.**- Son equipos aire-aire de media potencia, ideales para climatizar locales de una sola planta, en los que la unidad condensadora es colocada sobre el techo y un sistema de conductos se encarga de transportar el aire a la unidad evaporativa situada en el interior. Suelen funcionar junto a una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA).
- **Equipos centralizados.** Suelen ser máquinas de refrigeración de compresión de alta potencia o de absorción (éstas se tratarán separadamente ya que el ciclo de compresión de estas máquinas difiere del ciclo de compresión tradicional). En general, uno o más generadores o “grupos de frío” son instalados en una sala de máquinas donde se enfría un fluido térmico, frecuentemente agua (en regiones frías se prefiere el uso de aire como fluido térmico, mientras que en regiones con climas más templados el sistema más aconsejable para instalaciones de gran potencia es



Imagen 9.- Equipo de aire acondicionado de tipo Split²³.



Imagen 10.- Bomba de calor de tipo Roof-Top²⁴.

²³ Fuente: American Pro.

²⁴ Fuente: Acorn Engineering Group Ltm.

el agua, debido a que los costes son menores) en cuyo caso estos generadores son llamados enfriadoras. Más tarde este fluido es transportado a las unidades terminales, que suelen ser climatizadoras o fan-coils. Estos equipos suelen disponer además de sistemas de refrigeración por agua que evacúan el calor a la atmósfera mediante enfriamiento evaporativo, y que permiten obtener eficiencias globales muy elevadas, ya que la temperatura de condensación puede reducirse hasta en unos 15°C, lo que repercute muy positivamente en el rendimiento del ciclo termodinámico, consiguiendo un ahorro energético de entre un 20% y un 30% respecto a los sistemas refrigerados por aire (IDAE 2007). Esta opción será la más frecuente para enfriar grandes instalaciones como los aeropuertos.



Imagen 11.- Enfriadoras de agua en sala de máquinas (Beaverton, Oregon)²⁵.

Cuando estos sistemas usan una bomba de calor aerotérmica reversible (suelen ser equipos de ventana, partidos o Roof-top), es decir, disponen de un modo de calefacción, es habitual referirse a ellos como bombas de calor, coincidiendo éstas con algunas de las bombas de calor ya comentadas en el apartado anterior correspondiente a los equipos de calefacción. Del mismo modo, los tipos de bombas de calor comentadas en dicho apartado también pueden ser usados para enfriamiento, como la bomba de calor geotérmica o la bomba de calor de agua.

3.2.2.1.2.2 Producción de frío por absorción y adsorción

Estas técnicas se basan en la producción de frío usando calor como fuente primaria y eliminando el compresor de los sistemas de vapor convencionales, lo que nos permitirá conseguir una mejor eficiencia energética, reduciendo el consumo de energía primaria mediante el aprovechamiento de calor residual, el cual podremos obtener de energías renovables, como la energía solar o de biomasa. En esos casos el sistema será nulo en emisiones, de cualquier forma, el aprovechamiento del calor residual de otros equipos, nos permitirá conseguir reducciones importantes en emisiones de GEI. En cuanto a su capacidad, estos equipos suelen estar diseñados para producción de frío en instalaciones con alta o muy alta demanda energética, aunque actualmente se están desarrollando máquinas de absorción de menor potencia (< 50 kW) para la climatización de espacios de hasta 200 m² (SOLAIR 2009).

En la actualidad se comercializan máquinas de absorción de simple efecto y de doble efecto, mientras que las máquinas de triple efecto están en fase de desarrollo y su implementación práctica aún está muy limitada.

- **Ciclo de absorción de simple efecto**

Actualmente la mayoría de los equipos de generación de frío por absorción usan el ciclo de simple efecto, debido a que dispone de la tecnología más probada. La fuente de calor en este caso deberá estar a una temperatura de al menos 80°C. El COP obtenido por las máquinas que usan este ciclo esté comprendido entre 0,6 y 0,8.

El funcionamiento del sistema se basa en el ciclo convencional por compresión de vapor (ver pag. 33), con la diferencia de que el refrigerante, al abandonar el evaporador, no es incorporado directamente al compresor, sino que es absorbido en otra sustancia líquida en una máquina llamada absorbedor, formando una solución líquida que se comprime en una bomba hidráulica. Dicha solución a alta presión pasa al generador, donde disolvente y soluto se separan usando calor cedido por una fuente externa, un proceso que es conocido como regeneración. Tras ello, el refrigerante sigue su camino del mismo modo que en el ciclo de compresión convencional, mientras que el líquido absorbente, como solución concentrada en agua, vuelve al absorbedor, aunque no sin antes pasar por un intercambiador de calor para precalentar la solución concentrada a la entrada del generador. Este proceso se entiende más fácilmente con la ayuda del siguiente diagrama:

²⁵ Fuente: Oregon Live LLC.

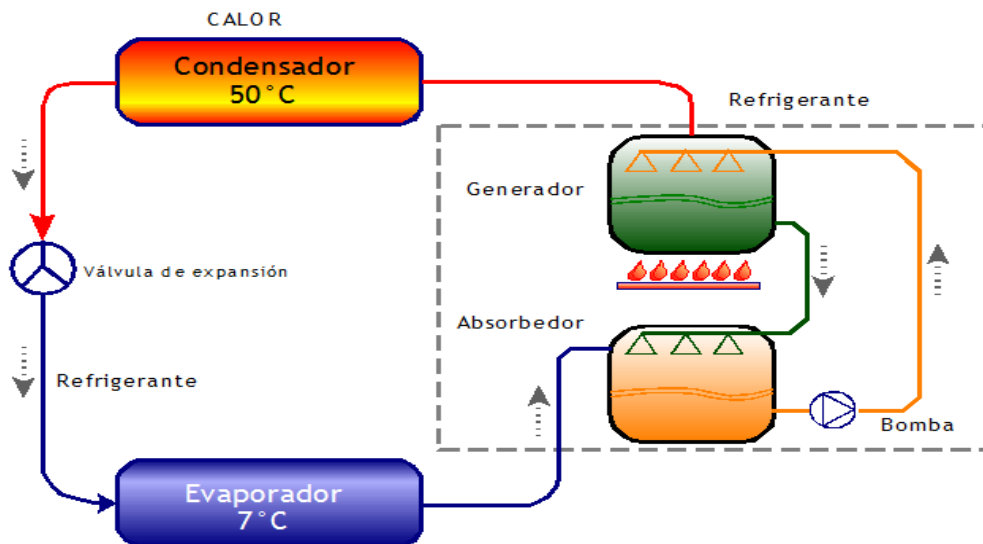


Imagen 12.- Esquema del funcionamiento del ciclo de refrigeración por absorción²⁶.

En la práctica suele utilizarse agua como refrigerante y bromuro de litio como absorbente, dada la elevada capacidad de éste para absorber vapor de agua, y también debido a que se deshidrata al aplicársele calor. En la práctica industrial, sin embargo, se aplica la óptica de que es el agua la que actúa como disolvente y el LiBr como soluto, por tanto a la salida del generador el líquido absorbente se considera solución concentrada (de LiBr en agua) y a la solución obtenida en el absorbedor solución diluida. Aunque también son comunes los sistemas amoníaco-agua, en los que el amoníaco es el refrigerante y el agua el líquido absorbente, éstos suelen emplearse para obtener temperaturas muy frías, como las necesitadas en cámaras frigoríficas.



Imagen 13.- Enfriadora de absorción²⁷.

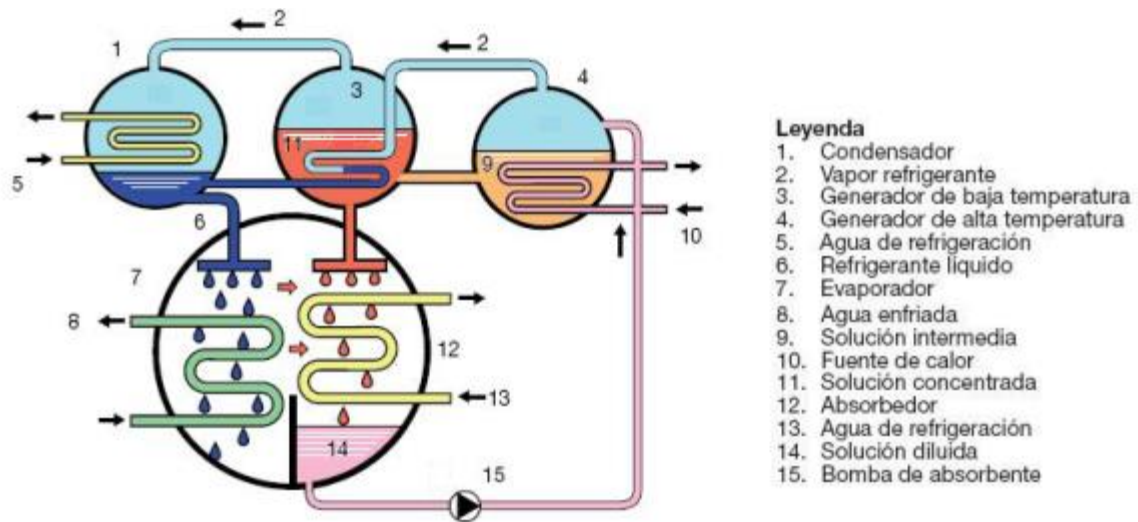
La razón de la mayor eficiencia de este método reside en que el volumen específico de la solución es menor que el del refrigerante en estado gaseoso, por lo que la energía necesaria para su compresión es significativamente menor, de este modo, usando una fuente de calor para aportar calor al generador el compresor puede ser eliminado, y en su lugar solo es necesaria una bomba hidráulica, cuyo consumo energético, coste y mantenimiento son mucho menores a los del compresor. Por el contrario, estas máquinas son más voluminosas y requieren condiciones de inmovilidad, por lo que no podrán ser usadas en vehículos, para nuestro propósito, obviamente, esto no supondrá un obstáculo.

- **Ciclo de absorción de doble efecto**

La nueva generación de máquinas de frío por absorción utiliza el ciclo de doble efecto, el cual solo es aplicable para los sistemas que usan LiBr-H₂O, es decir, para aquellos usados en la climatización de edificios. Una fuente de calor a al menos 140°C es necesaria, pero se pueden conseguir COPs de hasta 1,2. La principal diferencia es que este ciclo incorpora una etapa de alta temperatura a la entrada del generador (de 70 – 90°C se pasa a los 140 – 180°C) donde se obtiene una solución intermedia de LiBr-H₂O y vapor de agua, la cual, antes de pasar al condensador, es usada en un intercambiador de calor en el generador de calor de baja temperatura, en el que la solución diluida de LiBr-H₂O es obtenida (o solución concentrada en la industria) y vuelta a incorporar al absorbedor (Quiroga 2009). Un diagrama que ayudará a entender el proceso es presentado en la Imagen 14.

²⁶ Fuente: Wikimedia Commons (By Czajko (Own work) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)]).

²⁷ Fuente: Reachable Technology Co., Ltd.



- Leyenda**
1. Condensador
 2. Vapor refrigerante
 3. Generador de baja temperatura
 4. Generador de alta temperatura
 5. Agua de refrigeración
 6. Refrigerante líquido
 7. Evaporador
 8. Agua enfriada
 9. Solución intermedia
 10. Fuente de calor
 11. Solución concentrada
 12. Absorbedor
 13. Agua de refrigeración
 14. Solución diluida
 15. Bomba de absorbente

Imagen 14.- Esquema del funcionamiento del ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto²⁸.

• **Producción de frío por adsorción**

Una técnica muy parecida a la absorción es la producción de frío por adsorción, la cual es actualmente menos utilizada, aunque continua en proceso de investigación. Este sistema funciona de forma similar, pero en lugar de usarse un absorbente líquido es utilizado un adsorbente sólido, normalmente sílica-gel. Este sistema no funciona mediante un ciclo continuo sino que tiene una fase de carga y otra de descarga. Su COP, de 0,55 – 0,65 es menor al de la producción por absorción, sin embargo, presenta una gran ventaja, y es que puede aprovechar temperaturas menores de la fuente de calor, lo que la hace más apropiada para emplearse con captadores solares planos (FAEN 2008).

3.2.2.1.2.3 Comparación máquinas térmicas para refrigeración

En la literatura anglosajona es habitual utilizar el término COP solo para bombas de calor funcionando para calefacción, mientras que para refrigeración se utiliza el EER (Energy Efficiency Ratio), y como medida del rendimiento estacional es empleado el SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio), o el SCOP (Seasonal Coefficient of Performance), el cual mide la eficiencia anual.

Una tabla comparativa para algunos de los distintos sistemas de aire acondicionado comentados que utilizan electricidad como fuente energética se muestra a continuación:

Tipo de generador	SEER ²⁹ (adimensional)	Precio refrigeración ³⁰ (€/kWh _t)	Emisiones (grCO ₂ /kWh _t)	Coste inicial	Rango de Potencia
Bomba de calor o generador por compresión (ref. por aire)	4,1	0,024	158	Medio	Pequeña – Media
Bomba de calor geotérmica	5,9	0,017	110	Alto	Cualquiera
Generador de compresión (ref. por agua)	6	0,015	100	Medio	Alta

Tabla 6.- Comparativa de máquinas de frío³¹.

Como vemos también hemos tenido en consideración la bomba de calor geotérmica, pero esta vez, con su

²⁸ Fuente: Ingeniería JMR

²⁹ Eficiencia: Bombas de calor.- Certificación Energy Star (media productos certificados 2014) Enfriadoras refrigerada por agua.- MEP http://industry.gov.au/Energy/EnergyEfficiency/Documents/09_2013/hvac-fs-chiller-efficiency.pdf

³⁰ Iberdrola grandes consumidores (sin IVA)

³¹ Fuentes: IDAE, ENERGY STAR, Department of Industry of Australia.

rendimiento para refrigeración (el cual resulta mayor). Se han empleado valores del SEER correspondientes a equipos modernos de gama alta, por lo que los valores medios serán menores.

En este caso, el coste eléctrico y las emisiones generadas al usar un generador de compresión de alta potencia refrigerado por agua (el rendimiento aumenta con la potencia para estas máquinas) es parecido a los de la bomba geotérmica, sin embargo, el coste de instalar una instalación geotérmica será en general mucho más elevado. No obstante, conviene tener presente que la instalación geotérmica puede ser usada también para calefacción, donde sus costes operacionales resultaron ser también los más reducidos de entre las distintas opciones consideradas, lo que puede suponer, en última instancia, una importante ventaja económica sobre un generador exclusivo para refrigeración. Del mismo modo ocurre en el caso de las bombas de calor, sin embargo, en este caso, el rendimiento es considerablemente menor al de sus competidoras, y por tanto, también las emisiones, por otro lado, su coste de adquisición será considerablemente menor al de la bomba de calor geotérmica.

El generador de frío por absorción, por su parte, no ha sido incluido en el posterior análisis, ya que, aunque su COP comprende típicamente desde 0'6 (correspondiente a los menores rendimientos del ciclo de simple efecto) hasta 1,2 (ciclo de doble efecto), valores estos considerablemente menores a los conseguidos en el ciclo de compresión (entre un 3 y un 5,5), éstos no resultan comparables del modo en que lo hemos venido haciendo hasta ahora. Esto es debido a que mientras en el ciclo de absorción la energía utilizada es principalmente energía primaria en forma de calor, en el ciclo de compresión la energía usada es energía eléctrica (para el compresor), que no es primaria, y que presenta un rendimiento, respecto a la energía invertida en obtenerla, que puede ser muy variable, y que es función, principalmente, del modo en que es generada. Por ejemplo, para centrales térmicas de carbón este rendimiento es de en torno al 33% en los mejores casos, por lo que si consideramos este rendimiento en el cálculo global obtenemos un COP de entre 1 y 1,815 respecto a la energía primaria invertida, valores ahora más parecidos a los del ciclo de absorción. No debemos, sin embargo, limitarnos solo al COP en nuestro análisis de eficiencia, ya que no podemos olvidar que el verdadero ahorro en un sistema de producción de frío por absorción se basa en que la energía calorífica utilizada es, o bien calor residual proveniente de otro proceso, o bien obtenida de fuentes renovables como la energía solar, por lo que, si estos equipos son debidamente diseñados e instalados, el coste operacional se verá reducido considerablemente, así como las emisiones generadas.

3.2.2.2 Climatizador o Unidades de Tratamiento de Aire (UTA)

Un climatizador, o unidad de tratamiento de aire (UTA) es una máquina usada en una instalación de climatización para regular y hacer circular el aire que es incorporado a las zonas habitables del edificio. La UTA acondiciona el aire suministrándole las propiedades de humedad, limpieza y temperatura deseadas para conseguir unas buenas condiciones de confort térmico en el interior.

Aunque a veces pueden incorporar resistencias para calentar el aire, la energía térmica usada en la UTA es suministrada principalmente por la red de distribución (agua o aire) que transporta la energía térmica desde los generadores. En general constan de una entrada de aire exterior, un filtro, un ventilador, uno o dos intercambiadores de frío/calor (también llamadas baterías de frío/calor), un humidificador (para invierno), y un separador de gotas. Pueden estar conectadas a una red de distribución para conducir el aire a las zonas donde sea necesario o actuar directamente como equipos terminales (CARRIER 1974).

La configuración de la instalación centralizada de climatización pueda adoptar varias configuraciones en función del funcionamiento de la UTA, de lo que dependerá la eficiencia del sistema final. Destacamos las siguientes (Galludo y Navarro 2006):

- **Sistema de caudal constante para locales de carga constante.**- La UTA envía el aire a los conductos de impulsión, solo se dispone de un termostato para regular humedad y temperatura. Apropiado solo para edificios donde se esperen pocas variaciones térmicas, no es el caso de los aeropuertos, donde la



Imagen 15.- Climatizador³².

³² Wikimedia Commons.

diversidad de funciones y las diferencias entre los locales dentro de los mismos la convierten en una opción poco viable.

- **Sistema de caudal constante para locales de carga variable.-** La temperatura de cada zona es regulada añadiendo baterías de calor (intercambiadores de calor) regulados por termostatos. Se trata de un sistema muy poco eficiente.
- **Sistemas Multizona.-** Se trata de un sistema de caudal y temperatura variable, la UTA proporciona el aire necesario en las condiciones de humedad y temperatura adecuadas para cada una de las zonas a las que de servicio, por tanto deberá disponer de ventilador y baterías de calor y frío para cada una de esas zonas.
- **Sistema de doble conducto.-** En este sistema el aire es tratado en una UTA y distribuido a los diferentes locales por dos conductos, uno de aire frío y otro de aire caliente, en cada local se realiza la mezcla de aire frío y aire caliente en la proporción adecuada para dotar a cada local de las condiciones térmicas deseadas.
- **Sistema de caudal variable.-** Es el más eficiente de los comentados. En él el aire es tratado de forma centralizada en una UTA y es enviado a cada local haciendo uso de compuertas motorizadas que controlan las condiciones de cada local.

3.2.2.3 Redes de distribución

La red de distribución conecta los equipos generadores de energía térmica con los locales a climatizar. Desde un punto de vista global, esta red se divide en dos subredes:

- **Red primaria.-** Una vez producida la energía térmica ésta debe llevarse a la UTA, intercambiadores de calor (también llamados baterías) intermedios o hasta los terminales finales, mediante agua, aire (climas muy fríos) u otros fluidos refrigerantes. Existen sistemas de 2 tuberías (calefacción y retorno), 3 tuberías (calefacción, refrigeración y retorno) o 4 tuberías (calefacción y refrigeración de impulso y retorno), siendo este último el que más ventajas presenta desde el punto de vista de la eficiencia, ya que permite el dimensionamiento más óptimo para calefacción y refrigeración por separado.

En el caso de redes hidráulicas (las más comunes), ésta se suele dividir asimismo en dos circuitos:

- **Circuito primario.-** Es el que recorre el agua que atraviesa el generador térmico hasta el colector o bypass, que comunica e independiza circuito primario y secundario. Los equipos térmicos suelen funcionar a caudal constante.
 - **Circuito secundario.-** Comunica la unidad terminal (UTA, fancoils, suelo radiante, etc.) con el colector. Este circuito puede ser de caudal constante, de control sencillo pero poco eficiente, o de caudal variable, de control más complejo pero muy eficiente.
- **Red/es secundaria/s.-** El aire tratado en la UTA transporta la energía térmica por estos conductos hasta los locales finales.

Distinguimos 4 tipos de redes de distribución para sistemas de climatización centralizados en función del fluido térmico empleado (Galludo y Navarro 2006):

- **Sistema con refrigerante:** Para sistemas de refrigeración. A principios de ese siglo los CFC y los HCFC fueron prohibidos por sus efectos nocivos en la capa de ozono. Actualmente se utilizan principalmente los HFC, que a diferencia de los anteriores no contienen cloro. La ventilación ha de realizarse por otros medios.
- **Sistema todo aire:** No existe red de agua. El aire se toma del exterior y también es usado el propio aire recirculado del local, ya que en general el caudal mínimo de aire exigido en ventilación suele ser insuficiente para aportar la energía térmica necesaria. Esta operación es realizada mediante rejillas y conductos de aspiración, y seguidamente ambos flujos se mezclan y se procesan en la UTA. Posteriormente el aire tratado se entrega a las zonas a climatizar mediante un sistema de conductos y rejillas o difusores.
- **Sistema agua-aire:** Coexisten dos redes de distribución, una para aire y otra para agua, funcionando en serie o en paralelo.

- **Serie.-** El agua transporta la energía desde el generador hasta equipos de intercambio de calor intermedios agua-aire, en los que también puede existir una UTA completa. El aire es acondicionado en estas plantas intermedias para ser incorporado a las estancias interiores del edificio. Es necesaria una recirculación del aire.
- **Paralelo o sistema aire-agua.-** A los locales llega solo la cantidad exacta de aire necesaria para ventilación, el cual es dotado de las propiedades higrotérmicas necesarias en la UTA. El resto de la demanda térmica es conseguida a través de equipos terminales alimentados por la red de agua. Mediante este sistema se consigue que no sea necesaria la recirculación del aire, por lo que, junto a una menor dimensión de la red, se pueden conseguir condiciones de confort de alta calidad a través de una mejor regulación de los parámetros para cada local; por contra es el sistema más caro de implementar.
- **Sistema todo agua:** El agua fría o caliente obtenida en el generador central es enviada a los equipos terminales ubicados en los locales a climatizar. La ventilación en este caso también deberá realizarse por otros medios. Los equipos terminales están conectados a dos redes independientes de tuberías, una de impulso, procedente del generador, y otra de retorno, que devuelve el fluido al generador.

Por último mencionar que, como es obvio, será necesario proveer del necesario aislamiento a los conductos encargados de la distribución de los fluidos térmicos.

3.2.2.4 Equipos terminales

Son intercambiadores de calor entre el caudal térmico transportado desde los generadores y el aire del local a climatizar. Si el fluido térmico empleado es agua se usan ventiloconvectores (fan-coils) o radiadores (para calefacción). En algunos casos, la energía térmica es suministrada total o parcialmente a través del aire renovado para la ventilación de los locales, o mediante equipos todo aire o agua-aire, en estos casos los equipos terminales son las UTA o intercambiadores de calor que comunican los circuitos primario y secundario, y el aire es incorporado al local mediante dispositivos emisores como rejillas, difusores o aerotermos (López, Banyeras y Barreras 2012).

En general, convendrá disminuir la temperatura al mínimo posible en los radiadores para aumentar la eficiencia en calefacción. Mención especial en este sentido, por las altas prestaciones que ofrece en cuanto a eficiencia y confort, debe ser concedida en este estudio al suelo radiante. Este sistema es alimentado por un circuito de agua, y puede ser usado tanto para calefacción como para refrigeración. Además, debido a que precisa de agua calentada a baja temperatura, será ideal para su uso junto a sistemas de generación como los colectores solares, la bomba geotérmica o la cogeneración. Una descripción más detallada de este sistema se ofrece en el Apartado 3.3.2.2.

3.2.2.5 Sistema de instrumentación y control sobre la instalación.

Estos sistemas están basados en el uso de termostatos, sensores, válvulas, etc., que nos permitirán controlar la operación de las instalaciones de climatización y mejorar el rendimiento de las mismas, así como las condiciones de confort para los usuarios de las instalaciones. Los sistemas usados son variados y complejos, y su descripción poco aporta al objetivo de este proyecto, sin embargo, varias consideraciones en materia de eficiencia energética concernientes a estos sistemas serán realizadas a lo largo del siguiente apartado.

3.3 Medidas de eficiencia energética en climatización

En climatización nos encontraremos muchas oportunidades para conseguir importantes ahorros energéticos y disminuir la Huella de Carbono, más allá de las nociones generales vistas hasta ahora, concernientes, principalmente, a las configuraciones y equipos más eficientes y ecológicos. A continuación se enumeran una serie de medidas que podrán aportar importantes ventajas respecto a las instalaciones de climatización tradicionales:

3.3.1 Medidas generales

Aquellas relacionadas con las características constructivas y de diseño del edificio, o que afectan a la instalación de climatización de forma general.

3.3.1.1 Bioclimatismo

El bioclimatismo, o arquitectura bioclimática, se basa en la adaptación de los edificios al clima local con objeto de reducir en lo posible los consumos de energía, conseguir mejores prestaciones de CH, disminuir el impacto ambiental, evitar una mala calidad del aire en los interiores, emplear materiales más ecológicos, etc.

Entre otras cosas, un buen diseño bioclimático debe poseer una distribución y orientación adecuada de las estancias, en la que se tenga en cuenta el uso y ocupación de éstas, por ejemplo orientando las ventanas al sur en el hemisferio norte (o al norte en el hemisferio sur), para aumentar el calor recibido por radiación en invierno. En este sentido, el aprovechamiento de la radiación es vital en un diseño bioclimático, no solo en la orientación del edificio, sino también en la colocación de las ventanas, por ejemplo, en lugares cálidos será recomendable construir ventanas altas en la parte interior del muro para disminuir la radiación. Un diseño óptimo del aislamiento y la obtención de ventilación natural son otros dos puntos básicos en cualquier diseño bioclimático.

Considerando estos aspectos se han diseñado sistemas que buscan la eficiencia energética del edificio, algunos de ellos son:

3.3.1.1.1 Sistemas solares pasivos

Son sistemas de calefacción con un COP (Coefficient Of Performance) mayor que 50. Constan básicamente de dos elementos, los cuales poseen funciones bien definidas: en primer lugar, una superficie vidriada para la captación de energía solar, y además una masa térmica destinada a almacenar y distribuir el calor. La superficie vidriada estará orientada preferentemente hacia el sur (hemisferio norte) para obtener mayor energía de los rayos solares. Estos sistemas pueden ser empleados tanto para calentar una estancia como para refrescarla.

Podemos diferenciar varios sistemas pasivos (Guillamón 2004):

- **Ganancia directa.-** El espacio habitable se calienta directamente con radiación solar recogida mediante superficies vidriadas colocadas en la fachada, a las que se le pueden añadir voladizos que disminuyan el cantidad de calor recibido en verano. La masa térmica en este caso es el propio edificio.
- **Ganancia indirecta.-** Se usa una masa térmica intermedia, normalmente agua, para acumular calor, que posteriormente se transmite al espacio habitado. Ejemplos de este tipo de sistemas son el muro Trombe, el muro de agua, o los estanques de cubierta, los cuales utilizan una masa de agua situada en el techo del edificio para almacenar calor. También existen otros métodos que no usan agua como almacenador del calor, como los invernaderos adosados.
- **Sistemas de ganancia aislados.-** En los que la superficie de absorción y la masa térmica se encuentran separados del edificio a climatizar. El sistema más común es el de agua caliente por termosifón.

3.3.1.1.2 Cubierta bioclimática

Consiste en la colocación de una cubierta en el techo del edificio que proporciona protección frente a la radiación en verano y evita pérdidas térmicas en invierno. Asimismo, si colocamos equipos de climatización, como una bomba de calor, bajo dicha cubierta, el aislamiento mejorará su rendimiento y además, estará protegida frente a condiciones meteorológicas adversas. Estas cubiertas deberán ser ventiladas siempre que sea posible.

Una opción complementaria es la colocación del llamado “techo verde”, esto es, un techo cubierto total o parcialmente con vegetación, lo que permite obtener importantes beneficios adicionales, como: un mayor ahorro energético al actuar como un, la creación de una barrera acústica, y la absorción de contaminantes y CO₂ del aire. Del mismo modo, también puede considerarse la posibilidad de colocar vegetación en los muros, como hiedras o parras trepadoras. Esta práctica, sin embargo, puede producir problemas al constituir un foco de atracción de aves al aeropuerto, por lo que será necesario realizar un análisis de riesgos, con el que evaluar si su colocación puede suponer un problema para las operaciones de las aeronaves y, en su caso, determinar las medidas, si las hubiese, que podrían ser adoptadas para eliminar estos riesgos (Guillamón 2004).

3.3.1.1.3 Ventilación natural

Estos métodos utilizan la variación de la densidad del aire con la temperatura para crear corrientes de aire, que permitan realizar la operación de ventilación a coste de energía muy bajo o incluso cero. Los principales son:

- Instalación de compuertas con lamas en las cubiertas, que permitan evacuar el aire caliente del edificio por tiro natural.
- La chimenea solar, el cual consiste básicamente, en una chimenea con gran capacidad para captar y

conducir el calor, normalmente pintada de negro, que calienta aire en su interior por simple conducción térmica usando la energía solar, y en la que se crea un efecto de succión para conseguir la ventilación natural del local. Este sistema puede ser combinado con un intercambiador de calor geotérmico como forma de enfriamiento pasivo.

- La torre fría, consistente en una torre de enfriamiento evaporativo con corriente descendente pasiva, en la que la evaporación de una masa de agua permite enfriar el aire incorporado al edificio (ver Apartado 3.3.3.2).

3.3.1.2 Conservación de energía a través de la envolvente térmica del edificio

En general, la envolvente térmica del edificio comprende las paredes, techos, ventanas y aberturas que puedan existir, y que separan el edificio o lo delimitan respecto al exterior. Las mejoras realizadas en la envolvente térmica figurarán entre las acciones prioritarias a considerar para aumentar la eficiencia energética de un edificio. Una envolvente térmica bien diseñada consigue la menor cantidad posible de pérdidas y/o ganancias no deseadas de calor a través de ella. Por el contrario, un mal diseño supondrá una merma en el confort de los usuarios y consumos de calefacción, refrigeración y/o ventilación más elevados (Lau, Stromgen y Green 2010).

Entre otras cosas, es recomendable disponer de un edificio con una elevada inercia térmica, esto es, edificios con gran acumulación térmica o capacidad para almacenar calor, y con un aislamiento bien diseñado para controlar la velocidad con que este calor es absorbido o cedido entre el interior del edificio y el exterior a través de los cerramientos. De esta forma dispondremos de un edificio con gran estabilidad térmica, ya que tardará más en calentarse, si la temperatura exterior es elevada, y mucho en enfriarse cuando es baja, además, estará más protegido frente a cambios bruscos de las condiciones térmicas exteriores.

Para su correcto diseño, habrá que tener en cuenta factores como el clima concreto del emplazamiento, la orientación, los diferentes usos que pueda tener el edificio, sus patrones de ocupación, la transmitancia térmica de los materiales, etc. Los elementos que afectan de forma importante a la envolvente térmica son los siguientes:

3.3.1.2.1 Empleo de materiales reflectantes

Cuando el edificio recibe más radiación solar de la deseada la energía que debemos suministrar para refrigeración aumenta, por lo que en muchas ocasiones nos interesará limitar la cantidad de calor recibida por radiación solar. En estos casos convendrá utilizar colores claros en los materiales o aplicar recubrimientos reflectantes en los cerramientos exteriores, especialmente en el techo (techos fríos), ya que en las terminales aeroportuarias la mayor parte de la envolvente del edificio está ocupada por éste. El uso de techos fríos o de materiales reflectantes, generalmente, es recomendable en lugares donde la carga de refrigeración sea elevada, especialmente en zonas tropicales, pudiendo suponer un perjuicio en zonas frías (PNNL & PECI 2011). Además, en el caso de los aeropuertos, se debería estudiar si la reflexión de la luz puede ocasionar problemas de deslumbramiento a los pilotos. En algunos casos estas medidas pueden proporcionar ahorros en el consumo energético del edificio de hasta el 50% y reducir el pico de demanda de refrigeración entre un 10% y un 15% (Commonwealth of Pennsylvania 2002).

3.3.1.2.2 Acristalamiento

En las terminales de los aeropuertos a menudo nos encontramos grandes superficies acristaladas en los cerramientos exteriores, lo que puede ocasionar ganancias o pérdidas de calor excesivas, disparando el consumo en calefacción y/o refrigeración. Para evitar este problema será conveniente instalar acristalamiento doble con recubrimientos de baja emisividad. Habrá que tener especial cuidado con aquellas cristaleras que miren al sur o al este si existen veranos calurosos.

Otro medio para reducir la ganancia de calor consiste en emplear películas de control solar en los cristales, estas películas se adhieren a la superficie interior del cristal, y utilizan patrones de puntos o bandas, además de material reflectante, para disminuir las ganancias por radiación solar. Los costes derivados de esta actuación son medios, y periodos de recuperación de entre 2 y 5 años han sido documentados (Lau, Stromgen y Green 2010).

Este campo está siendo objeto de nuevos desarrollos tecnológicos que continuarán mejorando las propiedades de aislamiento y adaptación a las condiciones climáticas de ventanas y cristaleras. Algunas de estas innovaciones son (Center for Sustainable Building Research 2007):

- **Acristalamiento múltiple o con cámara.-** Consiste en la colocación de dos o tres cristales o láminas de vidrio, de forma paralela, formando una sola unidad, pero dejando espacios entre ellas para aumentar el aislamiento. En los modelos convencionales estos espacios están rellenos de aire, gas inerte o vacío,

aunque también existen modelos más recientes que utilizan aerogel, estructura de panel de abeja, o tubos capilares, sistemas que, eso sí, pueden empobrecer la calidad de la imagen a través del cristal, haciéndola más difusa. Un beneficio adicional que puede entrañar esta medida es una reducción del ruido, proporcionando mayor confort acústico en el interior.

- **Ventanas inteligentes.-** Estas ventanas utilizan varias tecnologías para adaptar sus características a las del entorno en cada momento, para ello pueden contar con persianas o cortinas automáticas, propiedades electrocrómicas (cambio de las propiedades de transmisión de la luz en respuesta a un cambio de voltaje), fotocromáticas (cambio de color en respuesta a un cambio en la luz incidente), termocromáticas (cambio de color en respuesta a un cambio de temperatura), dispositivos de partículas en suspensión (SPD), etc.
- **Energía fotovoltaica integrada.-** Estos cristales incorporan una delgada película semitransparente que funciona como una célula fotoeléctrica, aprovechando de esta forma parte de la luz recibida para la obtención de electricidad.

3.3.1.2.3 Aislamiento térmico

Aumentar el aislamiento de la envolvente térmica del edificio es una forma de disminuir las pérdidas de energía a través de sus cerramientos exteriores. Además, dependiendo de la forma en que coloquemos el aislamiento podemos modificar la inercia térmica del edificio, por ejemplo, si el aislamiento es colocado en el interior del cerramiento conseguiremos evitar pérdidas de energía de climatización, ya que cederemos poco calor a la masa térmica de los cerramientos durante el día, lo que puede ser recomendable en aeropuertos que no presenten actividad nocturna; por otro lado, si el aislamiento es colocado en el exterior, se consigue que los cerramientos, que se han ido calentando lentamente durante el día, devuelvan gran parte de este calor al interior del edificio durante la noche, lo que puede reportar grandes ventajas en aeropuertos que presten servicio nocturno (Guillamón 2004).

En las terminales aeroportuarias es común que un alto porcentaje de la envolvente esté ocupada por el techo, por tanto, será ésta la superficie de la que podremos sacar mayor beneficio al realizar mejoras en el aislamiento (Seidenman y Spanovich 2008). Es por ello que muchos aeropuertos usan techos de alto rendimiento, pequeña pendiente y larga vida útil. Una sustitución del techo puede ser una reforma muy cara, lo que dependerá de muchos factores, sin embargo, un aumento de su aislamiento puede ser realizado con poca dificultad. Valores de entre un 25% y un 30% de ahorro energético en refrigeración han sido conseguidos con esta mejora en climas templados (Balaras, y otros 2003).

Por otro lado, es importante tener presente que si se colocan persianas como elementos aislantes de la radiación solar, éstas deben colocarse en el exterior del edificio, ya que de lo contrario actuarán como colectores solares realizando una función inversa a la que se pretende.

Otra acción que puede reportar grandes beneficios, especialmente en climas extremos, es el llamado superaislamiento, que consiste en aplicar un aislamiento que supere ampliamente el requerido en la normativa. De esta forma protegemos el edificio ante oscilaciones térmicas, manteniendo la temperatura interior durante más tiempo.

Se espera un coste medio y periodos de recuperación de entre 2 y 5 años para estas medidas (Lau, Stromgen y Green 2010).

3.3.1.2.4 Filtraciones

Reducir las filtraciones de aire, previniendo la salida del aire acondicionado o la entrada de aire exterior mediante una mejora en la estanqueidad del edificio, puede ser la acción más viable de las comentadas en el presente apartado para mejorar el rendimiento de la envolvente. En este sentido, los principales elementos que serán objeto de nuestra atención serán los cierres, las puertas y otras aperturas no deseadas, como las que aparecen en ocasiones cuando existen conexiones de equipos a través de los cerramientos, y que pueden generar filtraciones perjudiciales que deben ser corregidas mediante un correcto sellado de estas aperturas. Estas medidas se traducirán en menores pérdidas térmicas, que supondrá ahorros energéticos que pueden ser significativos.

También es recomendable no dejar ventanas abiertas para ventilar, lo que puede aumentar considerablemente la demanda de aire acondicionado o calefacción. Asimismo, en las zonas de acceso se recomienda la utilización de puertas de cierre automático o puertas giratorias automáticas, las cuales, en lugares donde se espere un alto tránsito de pasajeros, pueden contar con un plazo de recuperación de la inversión de entre 2 y 5 años y coste medio. Otra opción es la colocación de cortinas de aire caliente para evitar el intercambio de aire con el exterior

(Lau, Stromgen y Green 2010).

3.3.1.3 Gestión inteligente de la temperatura y la humedad

Estos sistemas pueden ser auxiliares o estar subordinados a los sistemas BAS (ver Apartado 2.1.1). Los más importantes son (Galludo y Navarro 2006):

- **Sistemas de fraccionamiento de potencia.-** Se trata de un sistema que nos permite regular la potencia generada, con lo que podremos adaptar ésta a las necesidades de nuestra instalación, determinadas por la demanda de energía térmica para cada momento.
- **Sistemas de control automático.-** Basados en la instalación de dispositivos de control de la instalación de climatización que, de forma automática, detectan, mediante sensores, las condiciones de temperatura, humedad y presión de los espacios a climatizar, adaptando el nivel de trabajo de la instalación a las necesidades reales, y evitando así un posible despilfarro de energía ocasionado por sobrecalentar o sobre-enfriar una zona, y proporcionando las condiciones más óptimas de confort posibles.

3.3.1.4 Escalonamiento de potencia

Poseer un buen sistema de regulación de la potencia es indispensable para conseguir un verdadero ahorro energético en climatización en el aeropuerto, no consumiendo más energía de la que realmente es necesaria.

- **Calderas.-** El escalonamiento en este caso puede conseguirse utilizando varias calderas, normalmente de diversos tamaños, y disponiendo de quemadores con escalonamiento de potencia. Este último es el caso de las calderas de marchas o las calderas modulantes, las cuales regulan la relación aire/combustible y pueden trabajar con rendimientos elevados a distintas potencias. Habrá que diseñar el sistema de forma que el funcionamiento de las calderas sea el más continuo posible, es decir, con el menor número posible de paradas y arrancadas (IDAE 2010a).

A partir de 400 kW se deben instalar al menos dos calderas (excepto si éstas son de biomasa) y los quemadores que éstas utilicen deberán cumplir:

Potencia térmica nominal del generador (kW)	Regulación del quemador
$P < 70$	Una marcha o modulante
$70 < P < 400$	Dos marchas o modulante
$400 < P$	Tres marchas o modulante

Tabla 7.- Requisitos mínimos legales de escalonamiento de potencia.

- **Bombas de calor.-** Una forma de escalonamiento de potencia en instalaciones de calefacción con bombas de calor es, como ya se ha comentado con anterioridad, la operación bivalente de estas junto a una caldera (ver pag. 35). A su vez, dentro de las distintas configuraciones de este sistema la más recomendable es el funcionamiento alternativo o en serie (Galludo y Navarro 2006).
- **Grupos frigoríficos o bombas de calor reversibles funcionando en modo de refrigeración.-** En general, las centrales de producción de frío deben diseñarse con un número de generadores tal que permitan cubrir la variación de demanda con una eficiencia próxima a la máxima alcanzada por cada generador. Este escalonamiento puede lograrse con un grupo de compresores de parcialización escalonada o bien con maquinaria de parcialización continua (Guillamón 2004).

3.3.1.5 Recuperación de calor

Las pérdidas de energía térmica en la ventilación de las instalaciones pueden ser reducidas si se disponen sistemas de intercambio de calor entre el aire expulsado del edificio y el aire tomado del exterior, de esta forma, en verano, el aire expulsado podría pre-enfriar el aire tomado del exterior y en invierno podría pre-calentarlo. La norma básica a este respecto está contenida en el RITE, donde es de especial relevancia el IT 1.2.4.5.2, en el cual se establece como obligatoria la instalación de sistemas de recuperación de energía para el aire expulsado al exterior por medios mecánicos en instalaciones de climatización siempre que su caudal sea superior a 0,5

m³/s. Esta exigencia incluirá, en la mayoría de los casos, a las terminales de los aeropuertos (Galludo y Navarro 2006).

Existen diversos tipos de intercambiadores de calor para flujos de aire, siendo los más frecuentes aquellos que usan placas o láminas para separar los flujos de impulsión y extracción, a través de las cuales se produce el intercambio térmico. Estos sistemas serán tanto más ventajosos cuanto más extremo sea el clima, es decir, cuanto más difiera la temperatura interior del local de la temperatura exterior. Su coste es medio y su plazo de recuperación de entre 8 y 10 años (Turner, y otros 2007).

Asimismo, estos sistemas pueden ser usados en calderas para precalentar el agua de retorno, aprovechando el calor residual de los gases de escape, en cuyo caso son llamados economizadores (no confundir con los economizadores de aire). Un tipo especial son los llamados economizadores de condensación, que permiten enfriar los gases de escape por debajo de la temperatura de saturación del vapor de agua y así aprovechar su calor latente (mismo caso de las calderas de condensación). En este caso se producirán condensaciones ácidas, y por tanto deben utilizar aleaciones de aluminio o acero inoxidable para evitar la corrosión.

Otros intercambiadores, como los intercambiadores de calor de placas de alta eficiencia, son usados como componentes de los equipos de refrigeración para climatización. Utilizan un área de transmisión mayor a la de otros intercambiadores, aumentando así la velocidad del proceso. Su coste es medio y el plazo de recuperación resulta menor a un año (Lau, Stromgen y Green 2010).

3.3.2 Medidas para calefacción

3.3.2.1 Mejoras en la caldera

La sustitución de componentes importantes, tanto del sistema de calefacción como del sistema de refrigeración, supone costes significativos para un aeropuerto, sin embargo, suele darse el caso de que, en instalaciones antiguas, las calderas están sobredimensionadas o son ineficientes, casos en los que la sustitución o modernización de éstas reportará grandes mejoras en eficiencia, pero también un importante ahorro energético y de mantenimiento. Este tipo de reformas ofrecen plazos de recuperación y costes variables: la sustitución de la caldera por estar sobredimensionada tiene un plazo de recuperación estimado de entre 6 y 8 años, mientras por motivos de ineficiencia es de entre 8 y 12 años.

Otras mejoras para obtener un mayor rendimiento de la caldera (Galludo y Navarro 2006):

- **Mejoras conducentes a garantizar el aislamiento térmico y la refrigeración de la caldera (calorifugado).**- Orientadas a que se produzca la menor cantidad posible de pérdidas térmicas a través de la envolvente de la caldera.
- **Instalación de turbuladores en los conductos de humos.**- Los turbuladores son dispositivos que consiguen aumentar la turbulencia de los flujos de humos, mejorando así la transferencia de temperatura por el frenado del caudal.
- **Recirculación de humos.**- Consiste en la colocación de una pared en la cámara de combustión que fuerce la recirculación de los humos, de esta forma la llama se hace más homogénea y su temperatura disminuye, con lo que se consigue un aumento del rendimiento de la combustión, una reducción de los inquemados y una disminución de las emisiones de NO_x.
- **Presurización del circuito de humos.**- Los quemadores pueden ser de dos tipos, o bien atmosféricos, en los que el aire se incorpora por efecto Venturi o por convección natural, o bien quemadores de sobrepresión, en los que el aire es incorporado mediante un ventilador. En este segundo tipo de quemador se consigue una mejor quema del combustible y una relación aire/combustible más ajustada, con lo que se pueden alcanzar mayores potencias de trabajo y un aumento del rendimiento de entre un 1 y un 2% (IDAE 2010a).

Valores típicos para los ahorros energéticos que pueden ser conseguidos en calderas son: por regulación, del 10 al 15%, por aislamiento, del 2 al 3%, por mantenimiento, del 5 al 8%, y por cambio de calderas, del 15 al 20% (Guillamón 2004).

3.3.2.2 Empleo de suelo radiante

En estos sistemas el fluido térmico, el cual es normalmente agua o agua mezclada con anticongelante, es

propulsado a través de un sistema de tuberías colocado bajo el suelo de la estancia a climatizar. De entre todos los equipos terminales disponibles en el mercado para instalaciones de calefacción, el suelo radiante destaca por las excelentes prestaciones que ofrece, tanto por su alto grado de eficiencia energética, como por el alto nivel de confort para el usuario que podemos obtener con él, confort que es debido, entre otras cosas, al alto porcentaje de calor intercambio por radiación propio de este sistema.

Aunque es empleado de forma habitual solo para calefacción también puede ser empleado para refrigeración, las características particulares de cada modo de funcionamiento son:

- **Suelo radiante para calefacción.**- Los ahorros energéticos se estiman entre un 15% y un 20% respecto de una instalación convencional (Galludo y Navarro 2006), lo que se debe a muchos factores, siendo los más importantes:
 - Se evita la formación de bolsas de aire caliente en el techo, ya que solo calienta el local hasta unos dos metros de altura. Esto hace que el suelo radiante esté especialmente recomendado para espacios amplios de techo elevado, en los que los usuarios se encuentran cerca del suelo, ya que se evitarán las pérdidas térmicas debidas al calentamiento inútil de zonas elevadas en las que incurriremos al usar otros sistemas. Éste es el caso de muchas áreas dentro de las terminales o incluso los hangares de los aeropuertos.
 - Importancia significativa del mecanismo de radiación en el proceso de calefacción, lo que contribuye a una mayor sensación térmica y a un mayor confort que al usar sistemas convencionales como radiadores, en los que el mecanismo de radiación no es tan importante, siendo casi todo el calor emitido por convección.
 - Las bajas temperaturas a las que es necesario calentar el agua (unos 40°C) reducen considerablemente las pérdidas en las conducciones y además hacen que sea un sistema muy propicio para usar con colectores solares. Otra ventaja de trabajar a estas temperaturas es la proximidad a la temperatura del suelo (no debe superar los 29°C) con las del aire, con lo que se consigue un flujo de energía muy sensible a las variaciones repentinas de las condiciones ambientales, funcionando como un termostato natural.

Las ventajas en cuanto a confort de este tipo de instalaciones de calefacción son significativas. Como podemos ver en la Imagen 6 los sistemas con suelo radiante son los que proporcionan las curvas de temperatura-altura más parecida a la curva ideal de entre los sistemas considerados.

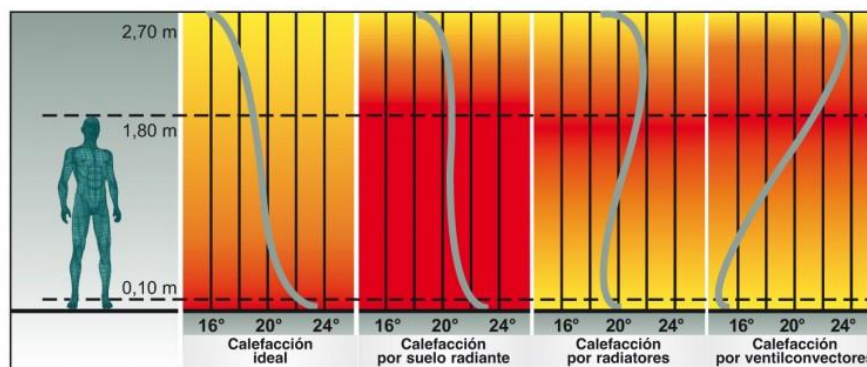


Gráfico 6.- Curva Altura-Temperatura para distintos equipos terminales de calefacción³³.

- **Suelo radiante para refrigeración.**- En este caso es agua fría la que circula por los tubos. Aparecerán nuevas consideraciones a tener en cuenta:
 - El rendimiento de estos sistemas aumenta considerablemente en condiciones de alta radiación solar y/o altas temperaturas de las paredes exteriores (Olesen 2008), como puede ser el caso de los aeropuertos en verano, ya que estos suelen contar de extensas superficies acristaladas en la envolvente del edificio.
 - En estos sistemas puede producirse condensación en la superficie del suelo. Para prevenir que esto ocurra se debe instalar un sistema que controle la humedad del aire, manteniéndola por

³³ Fuente: <http://www.klimacontrol.com.cy>

debajo del 50% (por ejemplo mediante un deshumidificador para el aire exterior), y la temperatura en la superficie del suelo no debe superar el punto de rocío (unos 19°C) (Mumma 2001).

Por último, es importante señalar que estos sistemas ofrecen mejoras relativas a la calidad del aire, ya que permiten el uso de materiales con menos emisiones de VOC (Volatile Organic Materials), que en otros sistemas no pueden ser usados, además, aplicados junto a equipos de deshumidificación, mantienen unas condiciones higrotérmicas más desfavorables para mohos, bacterias, virus y ácaros (Boerstra, Veld y Eijdem 2000).

3.3.3 Medidas para refrigeración

3.3.3.1 Mejoras en el enfriador

Generalmente consistentes en la sustitución o modernización del enfriador. Como las calderas, los enfriadores en muchas ocasiones están sobredimensionados, lo que puede ocurrir, por ejemplo, tras realizarse mejoras en iluminación, como la sustitución de lámparas incandescentes por fluorescentes, que disminuyan la carga térmica del edificio. El coste de estas medidas se considera medio y el plazo de recuperación de entre 8 y 20 años (Turner, y otros 2007).

Es importante comprobar, mediante labores de inspección y mantenimiento, los siguientes elementos en los enfriadores:

- Las presiones de condensación y evaporación y los niveles de subenfriamiento y recalentamiento presentan unos valores adecuados.
- La cantidad de fluido refrigerante es la adecuada, si hay falta de refrigerante se observa que las presiones son bajas y la temperatura del fluido más alta de lo normal y viceversa.
- Evitar la formación de hongos y bacterias en la torre de enfriamiento.
- Limpieza y buen funcionamiento del condensador y su ventilador.
- Las bombas de agua no presenta fugas ni obstrucciones.

Un rango típico de valores, para los ahorros energéticos que pueden ser conseguidos en instalaciones de aire acondicionado, han sido documentados de forma aproximada: por ajustes de regulación, del 1 al 2%, por aislamiento, del 7 al 10%, por mantenimiento, del 3 al 5%, y por cambio del enfriador, del 10 al 15% (Guillamón 2004).

3.3.3.2 Enfriamiento evaporativo

Esta técnica es comúnmente empleada para la refrigeración de máquinas frigoríficas, generalmente enfriadoras condensadas por agua. Para ello se emplean torres de refrigeración o condensadores evaporativos, ya que permiten evacuar entre 2 y 4 veces mayor energía calorífica con caudales de aire en movimiento de entre 2 y 3 veces menores que equipos refrigerados por aire, y permiten obtener ciclos mucho más eficientes energéticamente reduciendo el consumo eléctrico entre un 30% y un 50% respecto a estos sistemas (IDAE 2007). Sin embargo, en el caso de que el aire exterior sea suficientemente seco y su temperatura húmeda suficientemente baja (<13°C) se puede emplear el enfriamiento evaporativo para enfriar agua y refrigerar así un edificio incluso sin necesidad de máquina frigorífica. El agua así enfriada es más tarde usada en una batería agua-aire en la UTA, para enfriar el aire de impulsión a los locales.

El enfriamiento del agua en estos equipos se produce de dos formas: por la evaporación (calor latente) de una pequeña cantidad de agua, lo que hace necesario un aporte continuo de agua y, en menor medida, por convección térmica de la corriente de aire.

La principal desventaja que presentan estos sistemas reside en el peligro sanitario ocasionado de no realizar un correcto mantenimiento de los mismos, en cuyo caso, se corre el riesgo de permitir la proliferación de la legionella, bacteria que entraña graves riesgos para la salud humana. Otra desventaja, desde el punto de vista medioambiental de estos sistemas, reside en el consumo de agua que generan, el cual depende del tipo de instalación y su capacidad. Este consumo, sin embargo, se ve compensado por el ahorro eléctrico que pueden proporcionar respecto a otros sistemas, el cual, de forma indirecta, permite reducir el consumo de agua en las grandes centrales eléctricas, donde los vertidos pueden comportar mayores riesgos medioambientales.

Los principales tipos de torres de refrigeración según el sistema de convección son (Grimms y Rosaler 1996):

- **De tiro natural.-** Este tipo de torres no precisan de ningún elemento mecánico para crear el flujo de aire a través de la torre. Las hay de dos tipos: torres de refrigeración hiperbólicas, las cuales son empleadas mayoritariamente en centrales de generación eléctrica para caudales y cargas térmicas muy grandes; y por efecto Venturi, para potencias pequeñas y medianas, las cuales resultan poco fiables y eficientes, y son de uso muy limitado.
- **De tiro mecánico.-** El flujo de aire puede ser controlado mediante uno o varios ventiladores. Dentro de este grupo existen dos tipos principales:
 - **De tiro forzado.-** El aire es soplado al interior de la torre mediante unos ventiladores centrífugos o axiales colocados en su base. El aire entra a alta velocidad y sale a baja velocidad, lo que las hace susceptibles a la recirculación. Este sistema se encuentra relegado a un segundo plano por el tiro inducido, el cual resulta más eficiente.
 - **De tiro inducido.-** En estos sistemas los ventiladores se colocan en la parte superior de la torre y succionan la corriente de aire. La recirculación no supone un problema tan importante como en las de tiro forzado y presentan menos complicaciones por heladas. Son el sistema mayoritario actualmente.

Mientras que, según el sistema de distribución del agua, éstas se dividen en (IDAE 2007):

- **De circuito abierto.-** En estas torres existe contacto directo entre la corriente de aire y el agua enfriada, a la cual se hace circular a través de un relleno en el interior de la torre. Esto aumenta el ensuciamiento del agua empleada (causante de problemas de corrosión e incrustaciones) y aumenta el riesgo de proliferación de legionella, lo que hace necesario reponer el agua con mayor frecuencia y un mantenimiento cuidadoso y caro. Sin embargo, constituye el tipo más compacto, eficiente, y de menor inversión inicial de entre los existentes.
- **De circuito cerrado.-** El relleno se sustituye por una red de serpentines por los que se hace pasar el agua de proceso o el refrigerante del ciclo de bomba de calor de la enfriadora, lo que permite el intercambio térmico con el aire circulante sin que exista contacto directo, eliminando así gran parte de los problemas de las torres de circuito abierto. Estos tubos son enfriados por un circuito cerrado de agua ubicado dentro del equipo, el cual evacúa el calor al aire del ambiente por enfriamiento evaporativo.
- **Mixtos.-** En estos equipos el líquido a enfriar se hace pasar por serpentines, y es enfriado tanto por el aire circulado por los ventiladores del equipo, como por una corriente de agua sometida a enfriamiento evaporativo, lo que les permite funcionar como condensadores evaporativos en épocas cálidas, o como condensadores aerotérmicos en épocas frías. Poseen propiedades intermedias entre los tipos anteriores, suponiendo una relación de compromiso.

3.3.3.3 Enfriamiento gratuito

La normativa en España en cuanto a estos sistemas aparece en el RITE, IT 1.2.4.5.1. Diferenciamos entre enfriamiento gratuito por aire, denominado comúnmente free-cooling, y enfriamiento gratuito por agua.

3.3.3.3.1 Enfriamiento gratuito por aire (free-cooling)

La técnica de enfriamiento gratuito por aire, o free-cooling, se basa en que, en general, si la temperatura del aire exterior es inferior a la temperatura del aire de recirculación, será más eficiente acondicionar el aire exterior que hacer recircular el aire de retorno, además, esta diferencia de temperatura permitirá que el proceso pueda realizarse por simple convección natural, por lo que, como su nombre indica, los costes operacionales serán nulos o muy bajos. Se trata de uno de los sistemas con los que más ahorro de energía se puede conseguir.

Un empleo típico de este método ocurre al aprovechar el hecho de que las temperaturas nocturnas suelen ser menores que las diurnas, de este modo, si por la noche introducimos aire exterior a la vez que expulsamos el aire que ocupó la zona durante el día, es posible ventilar el edificio aumentando las condiciones de confort y calidad del aire, a la vez que reducimos el consumo de climatización. Otro empleo representativo se da en verano, cuando se pueden aprovechar las bajas temperaturas del aire a primeras hora de la mañana para reponer totalmente el aire interior del aeropuerto, de esta forma podemos retrasar la operación de la máquinas de producción de frío varias horas (Guillamón 2004).

Asimismo, en invierno hay locales que, por sus características específicas, poseen un elevado aporte térmico (por iluminación, ocupación, radiación) que les lleva en ocasiones a necesitar refrigeración en lugar de

calefacción. En estos casos, aprovechando las bajas temperaturas del exterior conviene usar el aire exterior en lugar de poner en funcionamiento un equipo de refrigeración (IDAE 2012). Este puede ser el caso de aeropuertos en climas templados en hora punta.

Para poder utilizar el sistema de enfriamiento gratuito por aire es necesario que las UTA estén equipadas con los adecuados sistemas de control, ventiladores y compuertas (economizadores de aire) que nos permitan utilizar el aire exterior solo cuando cumpla unas ciertas especificaciones. Estos dispositivos presentan mayores beneficios en zonas con climas fríos o templados y sin altas condiciones de humedad. En aeropuertos tendremos que controlar, y en su caso limpiar el aire exterior incorporado debido a la posible presencia de sustancias nocivas u olores desagradables provenientes de la combustión en las aeronaves (Lau, Stromgen y Green 2010). Estos sistemas presentan un plazo de recuperación de entre 4 y 8 años (Turner, y otros 2007).

3.3.3.3.2 Enfriamiento gratuito por agua

Comentaremos las técnicas más importantes dentro de este campo: baterías, refrigeración pasiva geotérmica, torre de refrigeración y migración del refrigerante.

3.3.3.3.2.1 Batería adicional

En aplicaciones de climatización por agua pueden emplearse baterías adicionales para enfriar el agua de retorno antes de su enfriamiento en la máquina de compresión, aunque solo en el caso de que la temperatura del aire exterior sea inferior a la temperatura del agua a enfriar. Este método solo es aplicable en climas fríos y en aplicaciones intensivas con una demanda frigorífica considerable. Los sistemas de refrigeración que presenten temperaturas de retorno elevadas podrán beneficiarse en mayor medida de esta técnica (IDAE 2012).

En los casos en los que la temperatura del aire es inferior a la temperatura de retorno, pero no es suficientemente baja como para cubrir el total de la carga frigorífica, se usa una batería de free-cooling para preenfriar el agua antes de su entrada en el evaporador. Por el contrario, cuando la temperatura del aire exterior desciende lo suficiente como para poder cubrir el total de la carga frigorífica, el ciclo de compresión ya no es necesario y en el agua puede enfriarse al nivel deseado solo mediante la batería de free-cooling (IDAE 2012).

Este sistema solo tiene sentido en sistemas de climatización todo agua, ya que si el sistema es agua-aire resulta más económico y sencillo usar solo free-cooling. En tal caso, solo si existiesen complicaciones técnicas para instalar los conductos necesarios para el enfriamiento gratuito por aire, será necesario plantearse este sistema (IDAE 2012).

3.3.3.3.2.2 Refrigeración pasiva geotérmica

Este sistema suele ser usado a principios de verano cuando la temperatura del subsuelo se encuentra a baja temperatura por el efecto del invierno, de esta forma, si esta temperatura es suficientemente baja, podemos enfriar una corriente de agua, que propulsada por una simple bomba hidráulica, es enviada al interior de los locales a climatizar, de los que se extrae el calor necesario para mantenerlos a la temperatura deseada. Este sistema nos permite mantener el compresor de la bomba de calor apagado (se produce transvase de energía de un foco caliente a un foco frío), proporcionándonos un importante ahorro de energía. Sin embargo, durante la mayor parte del año este sistema será insuficiente para cubrir la demanda de climatización. Los países con clima mediterráneo serán los que mayor uso pueden hacer de esta técnica (IDAE 2012).

3.3.3.3.2.3 Refrigeración por evaporación

Es un proceso de transferencia de calor y de masa que ocurre al poner en contacto aire no saturado y agua. Se basa en la conversión del calor sensible del aire en calor latente a medida que éste aumenta su humedad y su temperatura disminuye. Este fenómeno puede ser fácilmente visualizado usando un gráfico psicrométrico: eligiendo un punto inicial para el aire, si mantenemos su entalpía y aumentamos su humedad vemos que la temperatura seca de éste disminuye. En condiciones adiabáticas el proceso continúa hasta que el aire alcanza el estado de saturación, igualándose la temperatura del agua con la del aire en un valor que es denominado “temperatura de saturación adiabática” o “temperatura de bulbo húmedo”. Cuando el agua se encuentra a esta temperatura, lo que ocurre especialmente en situaciones en las que el agua es recirculada, ésta puede mantenerse a una temperatura aproximadamente constante, sin embargo, en la mayoría de los casos su temperatura será distinta a la de saturación adiabática y se intercambiará calor sensible entre el agua y el aire. Este sistema necesita un consumo de agua constante e igual al aumento de la humedad del aire (IDAE 2012).

El nivel de enfriamiento que es posible conseguir con esta técnica viene limitado por la capacidad que presenta el aire de aumentar su humedad (el calor latente sensible eliminado no puede ser superior al calor latente necesario para saturar el aire), es por ello que este sistema será más ventajoso cuanto más seco se encuentre el

aire. Para hacernos una idea, en condiciones de aire exterior a 35°C, con humedad relativa del 15%, esta técnica nos permite obtener aire, siguiendo una evolución adiabática, a una temperatura de 23°C y una humedad del 58% (IDAE 2012).

Este sistema solo tiene sentido en aquellos casos donde no sea posible la utilización del free-cooling, ya que éste último que resulta más económico y requiere de un mantenimiento más sencillo. Existen varios tipos de aparatos de enfriamiento evaporativo para el acondicionamiento de locales que clasificaremos como sigue (IDAE 2012):

- **Sistema directo.-** El agua es recirculada, el aire enfriado y su humedad aumentada. Este aire es impulsado a los locales a climatizar mediante un ventilador. Existen distintos tipos en función del medio de humectación que utilizan: paneles evaporativos, medio rígido, rotativos o pulverización directa. Como ya se ha comentado, será necesario prestar especial cuidado en el mantenimiento de este tipo de sistemas para evitar la aparición de bacterias peligrosas como la legionella, de hecho es tal el peligro que conlleva el uso de estos sistemas que su aplicación en edificios es muy reducida, usándose principalmente en aquellos donde no corra riesgo la salud de las personas, como las granjas de animales.
- **Sistema indirecto.-** Existen dos corrientes de aire, una secundaria, que produce la evaporación de agua mientras es enfriada, y una primaria, que es a su vez enfriada por la corriente secundaria en un intercambiador y posteriormente es impulsada a los locales a climatizar. De esta forma el aire primario no aumenta su humedad y se impide el peligro de contaminación del aire con legionella, por el contrario la eficacia del sistema queda reducida respecto al sistema directo. Existen 2 tipos fundamentales en función del intercambiador de calor entre el aire primario y el secundario que utilizan, que puede ser un intercambiador de placas (los más utilizados) o un intercambiador tubular.
- **Sistema mixto.-** Compatibilizan los dos casos anteriores, enfriando y aumentando la humedad del aire hasta niveles de entre un 50 y un 70% mediante un sistema directo, normalmente de medio rígido, y proporcionando el resto del enfriamiento requerido mediante un medio indirecto en el que es frecuente usar intercambiadores de placas.

Además de estos sistemas convencionales existen implementaciones más novedosas del enfriamiento evaporativo:

- **Refrigerador evaporativo cerámico.-** Estos aparatos continúan en vías de desarrollo. Constituyen un sistema en el que aire y el agua se encuentran separados por un material cerámico poroso, a través del cual se produce la humidificación del aire, lo que evita la aparición de aerosoles que dispersen la legionella, además la pared porosa actúa de filtro para la propagación de estas bacterias. Pueden comportarse como un enfriador evaporativo directo o indirecto.
- **Refrigeración evaporativa combinada con energía solar pasiva.-** Este sistema puede ser combinado con técnicas bioclimáticas (ver Apartado 3.3.1.1) como el muro Trombe que, en verano, permite la entrada de aire inducido por el efecto chimenea, para que éste sea posteriormente enfriado mediante el enfriador evaporativo. Esta técnica reduce el consumo de energía, ya que se eliminan ventiladores y bombas para mantener en funcionamiento el aire y/o el agua.

3.3.3.2.4 Migración de refrigerante

En equipos de refrigeración convencionales por ciclo de compresión, cuando se alcanza en el exterior una temperatura significativamente baja ($< 5^{\circ}\text{C}$), se produce una inversión de presiones en el circuito frigorífico que provoca que la presión en el condensador sea menor que la presión en el evaporador, permitiendo el efecto de migración natural (sin actuación del compresor) del refrigerante, y siendo solo necesaria la utilización de una bomba para completar el ciclo. Esta técnica solo es de aplicación en localizaciones geográficas con un número elevado de horas al año por debajo de cero grados, y en los que además se necesiten muchas horas de refrigeración en periodo invernal. Al igual que el enfriamiento gratuito por batería adicional, este sistema se ve beneficiado con la utilización de temperaturas de retorno elevadas como las obtenidas con el suelo radiante para refrigeración (IDAE 2012).

3.3.3.4 Almacenamiento de frío

Entendemos almacenamiento de frío como la conservación de cierta cantidad de masa de un determinado material, el cual funciona como almacén térmico, a una temperatura inferior a la del ambiente. El material más comúnmente empleado es agua, en forma líquida o en forma de hielo. La utilidad de esta práctica reside en la posibilidad que ofrece para almacenar energía térmica (entendida como diferencia de temperatura) generada en horas de baja demanda energética (horas valle) para su uso en las horas de mayor demanda (horas pico). De esta forma podemos obtener beneficios económicos aprovechándonos de las tarifas eléctricas más baratas de las horas valle, y beneficios en el mantenimiento de las instalaciones, ya que conseguimos disminuir la carga máxima (lo que también puede servirnos para retrasar la necesidad de expansión de la instalación) y homogeneizar el nivel de operación a lo largo del día. Además, podemos aumentar la eficiencia global, ya que durante las horas más frescas, como durante la noche o por la tarde, las máquinas de refrigeración funcionan con una mayor eficiencia.



Imagen 16.- Tanque de hielo en el Aeropuerto de Kansai (Japón)³⁴.

El almacenamiento en tanques de hielo posee un volumen considerablemente menor al necesario para sistemas de agua, con un coste total también menor, sin embargo, la cantidad de energía eléctrica que precisan estos sistemas es mayor para la misma capacidad de enfriamiento.

3.3.3.5 Ventiladores de techo

Los ventiladores de techo ponen el aire en circulación, mejorando el intercambio térmico por convección y enfriando a los usuarios del edificio mediante enfriamiento evaporativo. Aunque su principal función es el enfriamiento, también pueden ser usados para calefacción cambiando la dirección del flujo, lo que se puede conseguir cambiando el sentido de rotación de las palas o el ángulo de paso de las palas:

- **Enfriamiento.-** El flujo debe ser propulsado hacia abajo y el enfriamiento es realizado, como se ha dicho, por enfriamiento evaporativo. En ocasiones, los ventiladores de techo también pueden usarse para proporcionar una mejor circulación del aire acondicionado en estancia a enfriar.
- **Calefacción.-** El flujo del aire debe invertirse y la velocidad de rotación se disminuye, de esta forma se fuerza al aire frío de las zonas bajas de la estancia a subir, mientras que el aire caliente, que por su menor densidad se encuentra más cerca del techo, baja para ocupar este espacio. Es importante que la velocidad de rotación sea la menor posible que nos permita generar un flujo de aire, y de esta forma minimizar el efecto del enfriamiento evaporativo.



Imagen 17.- Ventilador en el Aeropuerto Daniel Oduber Quirós (Liberia, Costa Rica)

El tamaño del ventilador y la longitud de su barra dependen fundamentalmente de la altura de la estancia. En aeropuertos a menudo nos encontraremos con techos altos por lo que será beneficioso disponer de ventiladores con elevado diámetro (ver Imagen 17). Dentro de la amplia gama de ventiladores existentes, para un mayor ahorro energético convendrá seleccionar aquellos certificados con las mejores valoraciones de eficiencia (por ejemplo que dispongan de la etiqueta ENERGY STAR®), es decir, aquellos que consigan unas mejores prestaciones térmicas y de confort de los usuarios usando la menor cantidad posible de energía eléctrica, lo cual es conseguido con un diseño óptimo de las palas y con motores de bajo consumo.

La colocación de ventiladores en el edificio terminal y hangares puede reducir la carga de refrigeración anual y mejorar las condiciones de confort térmico extendiendo la zona de confort en un rango de unos 2,8-3,3°C, a los

³⁴ Fuente: Heating & Cooling Supply Co., Ltd.

que corresponde un ahorro térmico de entre el 15 y 18% (Rohles, Konz y Jones 1982). Además, pueden reducir la estratificación térmica en zonas donde este fenómeno no sea deseable.

Conviene recordar que, debido a que el ventilador de techo actúa directamente sobre las personas (enfriamiento evaporativo), no tiene sentido dejar estos funcionando cuando no hay nadie en la estancia.

3.3.4 Climatización mediante energías renovables

Los principales sistemas utilizados en la práctica son aquellos basados en la energía solar, principalmente los colectores solares térmicos de baja temperatura, pero también la climatización geotérmica y la energía de biomasa. Junto a estos también pueden ser considerados como energías renovables la cogeneración o trigeneración.

Estas medidas, al igual que las de eficiencia energética, suelen ser beneficiarias de subvenciones. A nivel europeo, dentro del programa IEE, existe un subprograma, el ALTANER, dedicado a la promoción de las energías renovables, no solo para climatización, sino también para la generación eléctrica, aspecto que es tratado posteriormente en el Tema 5 de este documento. Para España, por otro lado, también existen subvenciones, la mayoría proporcionadas por las comunidades autónomas, aunque éstas suelen ir destinadas a pequeñas empresas o particulares.

3.3.4.1 Colectores solares de baja temperatura

Estas instalaciones suelen consistir en una red de captadores solares de placa plana o de tubos de vacío que acumulan y usan la energía procedente de la radiación solar para calentar agua o una mezcla de agua y glicol. Este fluido, el cual circula por pequeños conductos en el interior de las placas, es posteriormente bombeado hacia un intercambiador de calor de alta eficiencia que transfiere el calor al agua de ACS que será usada en el edificio, o como apoyo al sistema de climatización. Las consideraciones realizadas en el Apartado 5.2.1 sobre irradiación e idoneidad de los aeropuertos para la construcción de paneles solares fotovoltaicos también son de aplicación en este caso.

En España, según viene recogido en el CTE desde su modificación de 2006, es obligatoria la implantación de sistemas de ACS por energía solar en los edificios de nueva construcción.

El principal problema del uso de estos dispositivos para climatización es que requieren de buenas condiciones de radiación solar para su funcionamiento, las cuales no suelen darse en los momentos donde mayor carga de calefacción es necesitada, como en días nublados o al anochecer. Por tanto, sus aplicaciones más viables en aeropuertos serán la obtención de agua caliente sanitaria o su uso como sistemas para derretir la nieve, aunque a menudo podrán ser usados como un suplemento a las calderas para calefacción (DOE 2003).

Los costes de esta tecnología han disminuido considerablemente, y se han conseguido grandes aumentos en eficiencia energética y fiabilidad, sin embargo, al no ser dispositivos tecnológicamente complejos, su margen de evolución es limitado. Plazos de recuperación de entre 2 y 5 años han sido obtenidos con esta medida (Lau, Stromgen y Green 2010).

3.3.4.2 Climatización geotérmica

Considerada como una fuente de energía renovable, la energía térmica contenida en la corteza terrestre, principalmente, aunque también la de las aguas subterráneas o los lagos, está siendo aprovechada exitosamente para aplicaciones como la climatización y el ACS, o la generación eléctrica.

Este tipo de energía proporciona gran estabilidad en los sistemas que utilizan, consecuencia de la elevada inercia térmica que poseen. En general, a partir de una profundidad de unos tres metros, la temperatura del subsuelo se mantiene constante a lo largo del año en valores que varían en función del terreno y la latitud, lo que permite conseguir una buena eficiencia estacional. Además, la temperatura aumentará con la profundidad con un gradiente medio de 3°C/100m, existiendo a unos 500 metros de profundidad una temperatura media de unos 30°C.

Las aplicaciones de la energía geotérmica varían en función del potencial entálpico del terreno: cuando éste es de baja temperatura, como es el caso de la mayor parte de la península ibérica, puede ser empleado para climatización, mediante el uso de una bomba de calor, mientras que si éste es de media o alta temperatura puede ser empleado para calefacción de distrito. En el caso de que el subsuelo se encuentre a mayor temperatura que

la estancia a climatizar (o foco caliente), se puede emplear un sistema por simple convección térmica. En general, los sistemas más habituales serán los de baja o muy baja entalpía, es decir, aquellos en los que la temperatura del terreno es inferior a los 25°C, en los que se puede emplear una bomba de calor para generar energía térmica para climatización. Por otro lado, para temperaturas más elevadas, de entre 30 y 90°C, su uso para climatización y ACS es directo (se necesita tan solo una bomba hidráulica), y para temperaturas mayores la energía geotérmica puede ser utilizada para generar frío por absorción (ver pag. 40) o para generación eléctrica, lo cual solo es posible en lugares geográficos muy concretos (Trigo y Ángulo 2013).

Aunque las bombas de calor geotérmicas, en la mayoría de los casos, precisan de energía eléctrica para su funcionamiento, éstas son consideradas como bombas renovables si superan un valor mínimo de rendimiento, el cual es fijado por la normativa correspondiente. Este valor corresponde a aproximadamente un COP de 2,5 según lo establecido en la Directiva 2013/114/UE.

Una clasificación importante de las instalaciones geotérmicas puede realizarse en base al tipo de circuito de captación empleado. Éstos están formados por tubos de PVC, propileno o polietileno pero su disposición puede realizarse en base a distintas configuraciones (Trigo y Ángulo 2013):

- **Circuito cerrado horizontal.-** En este sistema se excavan zanjas que alcanzan una profundidad de unos 2 metros, con lo que disminuye los costes de construcción y mantenimiento. Su principal limitación es la gran superficie de terreno que precisa este sistema, lo que lo hace inviable en muchas aplicaciones. En general los aeropuertos poseen extensas áreas disponibles que podrían ser empleadas para esta instalación.
- **Circuito cerrado vertical.-** Sistema preferido cuando se dispone de poca superficie de terreno para colocar la instalación. Consiste en realizar pozos de pequeño diámetro (~10 cm) llamados sondas geotérmicas, hasta una profundidad de entre unos 100 y 150 metros en los que se introducen los tubos por los que circula el líquido térmico. En estos sistemas influye considerablemente el gradiente geotérmico del terreno, el cual puede variar considerablemente de un lugar a otro. La conductividad térmica del terreno también jugará un papel primordial, siendo ésta función, principalmente, del perfil litográfico, y estando favorecida por la presencia de aguas freáticas superficiales.

Un caso especial de este tipo de circuito es el realizado bajo el edificio a climatizar, en el que las sondas geotérmicas actúan a modo de cimentación, y es denominado cimentación geotérmica. Obviamente este tipo de construcción solo suele ser viable en la fase de construcción del edificio.

- **Circuito abierto.-** Esta opción puede emplearse si se dispone de pozos de agua, mares, ríos o lagos cercanos al lugar de ejecución del proyecto. El agua que circula por la bomba es captado de estos recursos hídricos permanece en constante renovación.

Un ahorro en el consumo de energía de entre un 25% y un 30% puede ser conseguido (Lau, Stromgen y Green 2010), y al tratarse de una energía renovable puede beneficiarse de las subvenciones existentes a este respecto, sin embargo, la inversión inicial que es necesario realizar al instalar estos sistemas suele ser muy elevada y son esperables plazos de recuperación de hasta 13 años (Turner, y otros 2007).

Otras ventajas son la elevada vida útil de la instalación, su escaso gasto de mantenimiento, su menor nivel de ruido, o sus menores riesgos sanitarios. Además, se complementan a la perfección con los paneles solares térmicos, los cuales pueden ser usados para la obtención de ACS.

3.3.4.3 Climatización por biomasa

La climatización por energía de biomasa consiste, principalmente, en la utilización de calderas de biomasa para climatización, las cuales han sido explicadas con anterioridad (ver Apartado 3.2.2.1.1.1). Para más información acerca de la tecnología de biomasa se recomienda consultar el Apartado 5.4 dedicado a la generación de energía eléctrica mediante energía de biomasa.

3.3.4.4 Cogeneración y trigeneración

La generación de energía eléctrica in situ puede proporcionar importantes ventajas en eficiencia, ya que se evitan las pérdidas por el transporte y la transformación, que son inevitables si dicha electricidad es suministrada por la red eléctrica. Por otro lado, la opción de autogeneración más común, es decir, la obtención de energía eléctrica en ciclos termodinámicos que usan combustibles como energía primaria, presenta rendimientos bajos del orden del 35%, esto es así ya que es necesario desprenderse de gases a alta temperatura que contienen gran valor

exergético, gases que podrían ser aprovechados para cubrir las demandas de climatización y/o ACS, y así aumentar la eficiencia del sistema global hasta alcanzar rendimientos del orden del 80% (Guillamón 2004). Ésta es la principal mejora conseguida con los sistemas de cogeneración, o CHP (Combined Heat and Power), y trigeneración, o CHCP (Combined Heat Cooling and Power), es decir, sistemas que obtienen energía eléctrica (o mecánica) y energía térmica para su aprovechamiento a partir de la misma fuente de energía primaria. Estos equipos, en general, presentarán rendimientos menores a los proporcionados por generadores eléctricos y calderas o máquinas de frío trabajando separadamente, pero el rendimiento global será sustancialmente mayor. Por supuesto, este importante aumento de eficiencia conllevará una disminución de las emisiones y, finalmente, también un importante ahorro económico puede ser obtenido frente a los sistemas tradicionales.

En instalaciones donde se usen sistemas de cogeneración o trigeneración, es común disponer de conexión a la red pública, la cual puede servir de apoyo en momentos donde la demanda exceda la capacidad del sistema. También podemos vender la energía eléctrica a la red en los momentos en que se produzca más de la necesaria.

Una instalación de trigeneración se compone fundamentalmente de los siguientes tres sistemas:

- **Sistema de transformación de la energía primaria.-** Depende de la energía primaria utilizada, y su función será, en general, la obtención de energía térmica a partir de esta energía primaria, la cual estará contenida en combustibles fósiles, como el gas natural, o biocombustibles, en cuyo caso este sistema estará formado por una o varias calderas. No obstante, la energía primaria también puede ser calor residual procedente actividades industriales o energías renovables como la energía solar.
- **Sistema motriz primario o equipo de cogeneración.-** En este sistema se produce la electricidad más el calor residual aprovechable. Se emplean diferentes tecnologías, entre las más frecuentes las turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna y las pilas de combustible. En la siguiente tabla se recopilan las características típicas de los sistemas de cogeneración para estos sistemas:

Tecnología	Turbina de vapor	Motor de combustión interna	Turbina de gas	Microturbina	Pilas de combustible
Eficiencia eléctrica	15% - 38%	22% - 40%	22% - 45%	18% - 27%	30% - 63%
Eficiencia total	80%	70% - 80%	70% - 85%	65% - 75%	55% - 80%
Rango de capacidad (kW_e)	500 – 250.000	10 – 5.000	500 – 250.000	30 - 250	5 – 2.000
Funcionamiento a carga parcial	Bueno	Bueno	Malo	Bueno	Muy bueno
Coste de capital (€/kW)	395,6 – 1.012	1.012 – 2.024	892,4 – 1.196 (5 – 40 MW)	2.208 – 2.760	4.600 – 5.980
Costes de O&M (€/kWh)	Menos de 0,0046	0,0083 – 0,020	0,0037 – 0,01	0,011 – 0,023	0,029 – 0,035
Combustibles	Todos	Gas natural, biogás, propano.			Hidrógeno, gas natural, propano, metanol.
Usos de la energía térmica	Vapor a alta o baja presión.	Calefacción, ACS, refrigeración por absorción y vapor a alta o baja presión.	Calefacción, ACS, refrigeración por absorción y vapor a alta o baja presión.	Calefacción, ACS, refrigeración por absorción y vapor a baja presión.	Calefacción, ACS, refrigeración por absorción y vapor a alta o baja presión.

Tabla 8.- Características de los principales sistemas de cogeneración³⁵.

³⁵ Fuente: EPA: www.epa.gov/chp/basic/catalog.html (February 2011). Cambios de dólar a euro realizado mediante 1\$=0,92€

En casos como en los aeropuertos, en los que se espere un funcionamiento continuo y prolongado del generador, los más utilizados son las turbinas de gas, si por el contrario se espera que trabajen en régimen de paradas y arranques continuados se emplearán motores alternativos, normalmente de ciclo diésel.

- **Sistema de generación de frío.-** Aunque pueden utilizarse ciclos convencionales por compresión, los más utilizados son los sistemas de producción de frío por absorción o adsorción (ver pag. 40). Como fuente de energía se usa el calor residual proveniente de la generación de electricidad o proveniente de la generación de la energía primaria.

En la Imagen 18 se muestra un esquema de un sistema de trigeneración en el que se usa combustible como fuente de energía primaria.

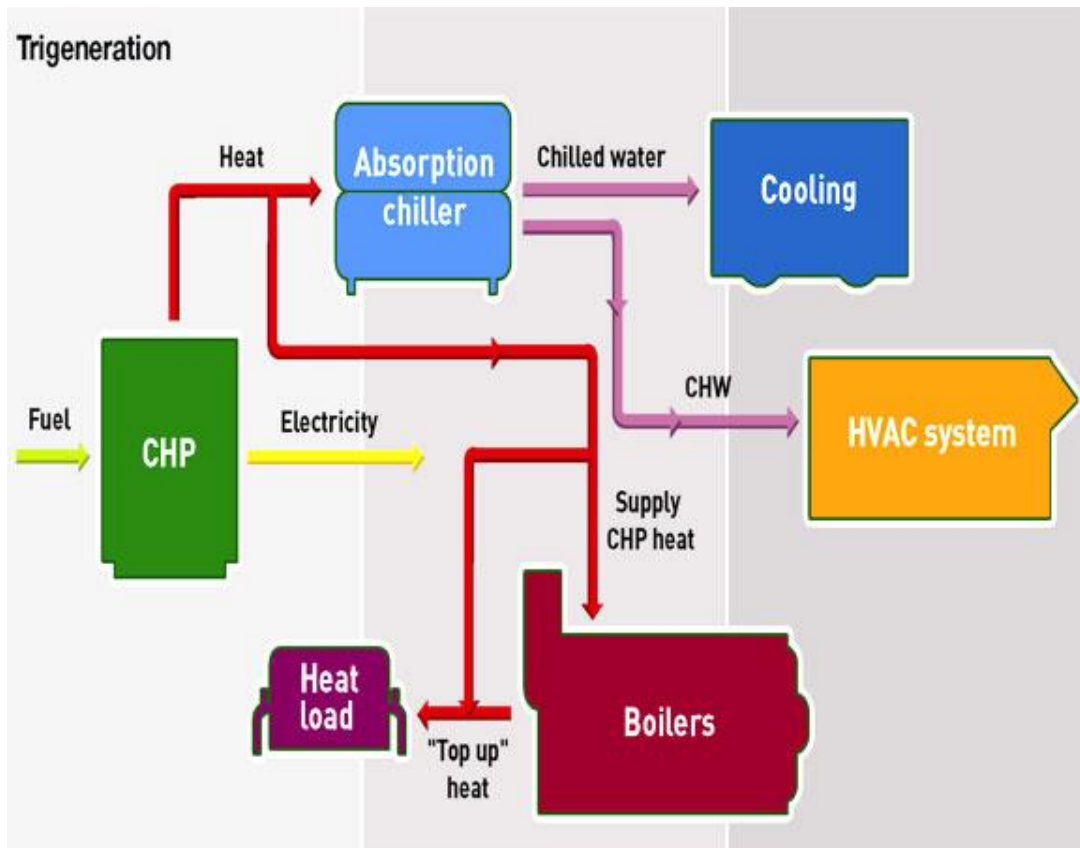


Imagen 18.- Esquema de un sistema de trigeneración³⁶.

Los sistemas de cogeneración y trigeneración son instalados en edificios en los que se prevé un gran número de horas anuales de utilización y elevados consumos eléctricos (>1MWh) y de climatización. Los aeropuertos son, pues, edificaciones muy propicias en las que implementar estos sistemas, ya que a estos motivos se suma, además, la importancia que supone para estas instalaciones disponer de un sistema autónomo de generación eléctrica, ya que para muchas de sus funciones es necesario garantizar una alta seguridad del suministro y a veces pueden presentar una localización geográfica que dificulte el suministro eléctrico externo.

La demanda energética en los aeropuertos puede variar considerablemente de un año a otro, por lo que a la hora de diseñar una planta CHCP conviene adoptar un enfoque modular, lo que también permite aumentar la fiabilidad del suministro. Otra consideración importante es la distribución de la demanda a lo largo del año: cuando dicha distribución sea aproximadamente regular, caso típico de los grandes aeropuertos, se favorecerá la viabilidad del sistema, mientras que una demanda irregularmente distribuida o estacional, propia de aeropuertos pequeños, será un impedimento para su rentabilidad y eficiencia operacional. Es por ello que estos sistemas presentan mayor aplicación en aeropuertos grandes, que precisan de una mayor capacidad y ofrecen una distribución más regular de la demanda, sin embargo, habrá casos en los que su instalación en aeropuertos pequeños también puede ser recomendable, especialmente si las tarifas eléctricas son elevadas. En cualquier

³⁶ Cycle" by Jonnathan McForlan - Own work. Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 via Wikimedia Commons

caso, habrá que estudiar cada caso concreto separadamente.

3.3.4.4.1 Viabilidad técnica

Cuando se realiza la mejora de la instalación de climatización convencional, generalmente basada en un sistema centralizado (o varios) de caldera o bombas de calor y máquina frigorífica, mediante la instalación de un sistema CHCP, una forma de integrar los antiguos sistemas con los nuevos y así reducir gastos, es el uso de aquellos como sistemas adicionales para cubrir los picos de demanda. Además, en caso de que exista un sistema de climatización centralizado, las tuberías del mismo pueden ser utilizadas en el nuevo sistema siempre que el aislamiento y distribución permitan que las pérdidas de calor no superen las máximas permitidas, siendo este requisito más exigente en el circuito de refrigeración.

En general, una planta de trigeneración requiere un espacio mucho mayor que una convencional y debe colocarse lejos de la torre de control y la zona de maniobras para evitar que se produzcan interferencias electromagnéticas.

3.3.4.4.2 Viabilidad económica

La rentabilidad de la planta dependerá de muchas variables, principalmente relacionadas con el diseño y las condiciones de operación, además de las tarifas eléctricas o los precios de los combustibles, o de posibles subvenciones que puedan estar disponibles. En el caso de emplear combustibles fósiles como fuente de energía primaria, el primer parámetro para medir la viabilidad económica es el llamado spark-spread (SP) que expresa la conveniencia de producir electricidad a partir de estos combustibles, viene definido por:

$$SP = \frac{E_p}{\eta_{e,gen} \frac{3,6}{PCI} F_p}$$

Donde: E_p es el precio de la electricidad (€/kWh)

$\eta_{e,gen}$ es la eficiencia en la generación de la energía

PCI es el poder calorífico inferior (MJ/kg o MJ/m³)

F_p es el precio del combustible (€/kg o €/m³)

Como vemos, el SP es un término adimensional y a mayor SP más rentable será generar energía eléctrica a partir del combustible considerado y viceversa.

Para hallar el sistema motriz primario más apropiado, el parámetro determinante resulta ser la capacidad del sistema: para aeropuertos con una demanda de entre 500 kW_e y 30-40 MW_e enfoques modulares usando motores alternativos o turbinas de gas son preferibles, mientras que solo para demandas mayores es recomendable usar turbinas de vapor.

Por otro lado, la relación entre la energía eléctrica y el calor útil generados o demandados viene determinada por el PHR (Power to Heat Ratio). En el caso de que el PHR obtenido en el sistema motriz primario (PHR_{CHP}) sea mayor que el necesitado (PHR_{aer}) la energía eléctrica sobrante puede ser vendida a la red.

3.3.4.4.3 Cogeneración/Trigeneración con energías renovables como fuente primaria

En un sistema de cogeneración/trigeneración, si recurrimos a fuentes de energía renovables podremos obtener electricidad, calor/calor y frío y/o agua caliente de forma independiente de la red eléctrica y sin recurrir a combustibles fósiles. Esto reduce la dependencia del exterior, proporcionando seguridad de suministro e independencia energética a los usuarios. Existen instalaciones de cogeneración/trigeneración que utilizan biomasa, energía solar térmica, energía geotérmica, e incluso combinaciones de varias de ellas como energía primaria. Esta técnica tiene potencial para abastecer a un edificio del total de su demanda energética con emisiones de GEI nulas o muy reducidas e incluso existe la posibilidad, si la legislación lo permite, de aportar la energía eléctrica sobrante a la red, lo que ayudará a reducir el plazo de recuperación de la inversión.

4 REDUCCIÓN DE EMISIONES EN ILUMINACIÓN Y OTRAS CARGAS ELÉCTRICAS

La iluminación en los aeropuertos supone una parte importante del total del consumo eléctrico en los mismos, pudiendo llegar hasta el 40%, y presentando consumos medios de en torno a 20 W/m² (Guillamón 2004) En la práctica existen multitud de medidas para lograr mejoras significativas de eficiencia energética en iluminación, que dado el peso de ésta dentro el consumo energético total, supondrán un importante ahorro energético y económico importante y, dependiendo del modo en que se haya generado la electricidad, también una disminución de las emisiones considerable, ya sea de forma directa en el propio aeropuerto, o de forma indirecta al tratarse de electricidad comprada a un suministrador externo. En aeropuertos pequeños, las mejoras en iluminación son, tras las de O&M, las que mayor potencial de ahorro energético y, generalmente, menor coste conllevan (Lau, Stromgen y Green 2010).

El ajuste óptimo y la correcta elección de la cantidad, distribución, y tipos de luminarias utilizadas, así como de los sistemas de instrumentación y control empleados para gestionar la operación de éstas, serán los principales factores que nos permitirán obtener un sistema de iluminación que cumpla con las necesidades funcionales de las instalaciones aportando, además, un alto grado de eficiencia energética. Es por ello que, en primer lugar, debemos realizar un análisis comparativo de las distintas lámparas disponibles en el mercado que sean de aplicación en aeropuertos, para más tarde abordar las distintas opciones disponibles para reducir el consumo dentro de las distintas áreas en las que dividiremos la iluminación dentro del aeropuerto, incluyendo medidas de instrumentación y control. La distribución de las luminarias, por otro lado, será función de las características concretas de cada estancia, las cuales pueden ser muy variadas, a este respecto, se recomienda seguir la norma vigente en la materia, la cual tiene en consideración criterios de eficiencia a la hora de establecer los requisitos y recomendaciones en la distribución de luminarias.

En general podemos clasificar los sistemas de iluminación de un aeropuerto en base a la zona del mismo a la que prestan servicio: zonas interiores, exteriores y área de maniobras. En cada una de ellas su función será distinta y los requisitos, por tanto, también variarán:

- **Iluminación interior.-** Es la que encontramos en el interior de los edificios que conforman el aeropuerto, principalmente las áreas terminales y hangares, y constituye generalmente la segunda fuente más importante de gasto energético.
- **Iluminación exterior.-** Entendemos por iluminación exterior en el aeropuerto aquella usada para iluminar los viales de acceso, los aparcamientos, y las zonas de movimientos de vehículos terrestres excluyendo la zona de maniobras de aeronaves.
- **Iluminación del aeródromo.-** Comprende los sistemas de iluminación y ayudas visuales necesarios en pistas, calles de rodaje y plataformas para el movimiento y estacionamiento de aeronaves. Más adelante convendrá diferenciar entre la iluminación de plataforma, cuya función es la iluminación de los amplios espacios abiertos que conforman las plataformas de los aeropuertos durante las horas nocturnas o de mala visibilidad; y la iluminación correspondiente a las luces de superficie y ayudas visuales, y que cumple funciones esencialmente de asistencia a los pilotos en las operaciones de aterrizaje, despegue y taxi, delimitando pistas y calles de rodaje, participando en los sistemas de control del tráfico, indicando la localización de peligros u obstáculos, y proporcionando información de las condiciones ambientales en el aeródromo.

4.1 Legislación básica sobre iluminación

De nuevo usamos la distinción ya comentada para los distintos tipos de iluminación dentro del sistema aeroportuario:

- **Legislación para Iluminación interior**

La legislación a este respecto viene recogida en la sección HE-3 del CTE, en la que se establecen unas reglas y procedimientos que permiten satisfacer las siguientes exigencias básicas:

Los edificios dispondrán de instalaciones de iluminación adecuadas a las necesidades de sus usuarios y a la vez eficaces energéticamente disponiendo de un sistema de control que permita ajustar el encendido a la ocupación real de la zona, así como de un sistema de regulación que optimice el aprovechamiento de la luz natural, en las zonas que reúnan unas determinadas condiciones.

En base a esto último se hace necesaria la Guía Técnica para el Aprovechamiento de la Luz Natural en la Iluminación de Edificios.

- **Legislación para iluminación exterior**

Para España será de aplicación el RD 1890/2008, de 14 de noviembre, y su guía técnica, ésta de carácter no vinculante.

- **Legislación para iluminación del aeródromo**

En este caso existe una fuerte regulación debido a la importante componente en materia de seguridad que posee este tipo de iluminación. La distribución y colocación de las luces en el aeródromo, así como los requisitos en cuanto a las propiedades de las luminarias, sistemas de abastecimiento eléctrico, etc., vienen determinadas en las normas correspondientes realizadas por las autoridades aeronáuticas competentes.

La legislación más importante sobre la materia viene determinada en el Anexo 14 de ICAO. También son importantes las especificaciones al respecto elaboradas por otras autoridades aeronáuticas internacionales o nacionales con validez legal en el país en el que se encuentre el aeropuerto, por ejemplo, para los países de la UE, serían de aplicación las Especificaciones de Certificación de EASA (European Aviation Safety Agency) para el diseño de aeródromos.

4.2 Conceptos básicos y estado del arte de los dispositivos de iluminación

En términos de eficiencia energética, el principal parámetro que diferencia unas lámparas de otras es el rendimiento luminoso, definido como la relación entre el flujo lumínico (o la cantidad de luz producida) y la potencia eléctrica consumida, y expresado en lm/W. Está claro que, para el propósito de este proyecto, nos interesan lámparas con el mayor rendimiento luminoso posible, aunque también deberán ser tenidos en cuenta otros factores, como la vida útil, definida como el tiempo medio que puede funcionar una lámpara hasta que deja de ser operativa o su flujo lumínico alcanza un determinado porcentaje del que poseía inicialmente; o el índice de representación del color (IRC), valor comprendido entre 0 y 100, que es función de la temperatura de color, e indica la capacidad de una lámpara para reproducir los colores del mismo modo que lo haría la luz del sol (valdría 100 en este caso). Todos estos factores serán determinantes a la hora de elegir el tipo de lámpara más conveniente para cada cometido. Tampoco hay que olvidar que, a la hora de diseñar la instalación de iluminación de una zona concreta, además de la función concreta de esta iluminación, también será necesario conocer bien otras características de la zona, como sus dimensiones o los coeficientes de reflexión de las superficies que la componen.

Algunas de las lámparas más importantes del mercado, cuyo uso podremos considerar dentro del aeropuerto, se enumeran a continuación:

4.2.1 Lámparas incandescentes

Basadas en el efecto Joule aplicado sobre un filamento metálico. Poseen un rendimiento luminoso muy bajo, por lo que son extremadamente ineficientes, y generalmente no constituyen una opción para la iluminación de zonas amplias. Por otro lado, emiten una luz con un IRC de 100, es decir, con la misma calidad de representación del color que la luz solar. Usando filtros de color podemos obtener lámparas incandescentes para cualquier color que se desee, sin embargo, el uso de éstos disminuye considerablemente la eficiencia de la lámpara en valores que varían de un 30% a un 95%, dependiendo fundamentalmente del color del filtro (Fox y Michael 2003).

4.2.2 Lámparas halógenas

Es una variante de las lámparas incandescentes. Poseen un filamento de tungsteno dentro de un gas inerte con una pequeña cantidad de halógeno (comúnmente yodo o bromo). Presentan rendimientos luminosos algo superiores a las incandescentes y una temperatura de color bastante efectiva, aun así continúan siendo bastante ineficientes comparadas con otros tipos de lámparas que se encuentran actualmente en el mercado.

4.2.3 Lámparas de vapor de sodio

La luz se obtiene por la ionización de sodio, proceso en el que se produce radiación luminosa dentro del espectro visible. Estas lámparas desprenden poco calor y su rendimiento luminoso es considerablemente mayor al proporcionado por las bombillas incandescentes, sin embargo su IRC es bajo. Son muy usadas en exteriores, especialmente para iluminación de viales. Sus propiedades dependen de la presión a la que se encuentra el gas:

- **Baja presión.-** Emiten luz en un espectro de frecuencia muy concreto, de color amarillo intenso, concretamente aquel al que es más sensible el ojo humano. Esta propiedad les otorga rendimientos lumínicos muy altos, aunque también un IRC muy bajo. Necesitan de un tiempo de calentamiento de varios minutos. Se emplean en funciones donde no sea necesaria una buena calidad de iluminación.
- **Alta presión.-** La más usada para la iluminación de las calles. Suponen una mejora respecto a las de baja presión, presentando un rendimiento luminoso menor a cambio de un IRC más aceptable. La vida útil también es mejorada. Necesitan de un balasto, el cual puede disminuir considerablemente su eficiencia.

4.2.4 Lámparas fluorescentes

Son un tipo de lámpara de descarga de baja presión. En ellas se produce la ionización de vapor de mercurio a baja presión, lo que genera radiación ultravioleta, que al incidir sobre ciertas sustancias las hace emitir luz visible mediante una reacción de fluorescencia. Además de los tradicionales modelos tubulares, actualmente existen dispositivos compactos que las hacen adecuadas para un mayor número de aplicaciones.

Para iniciarse y mantenerse funcionando necesitan de balastos que encarecen su precio. Tradicionalmente se han usado balastos electromagnéticos, sin embargo, actualmente se recomienda el uso de balastos electrónicos en su lugar, los cuales impiden el efecto de parpadeo asociado a la iluminación fluorescente y aceleran el proceso de encendido, además, disminuyen el consumo, incrementan la vida útil hasta el 50% y reducen la carga térmica, corrigen el factor de potencia a 1 (Salgado y Navarro 2011).

Tienen un rendimiento luminoso alto y una vida útil muy larga, además presentan un buen IRC, lo que las hace muy apropiadas para interiores. Su coste ha disminuido significativamente en los últimos años y, comparadas con las lámparas incandescentes, consumen hasta un 75% menos de energía eléctrica y duran bastante más. Esto hace que el plazo de recuperación de la inversión por la sustitución de lámparas incandescentes por fluorescentes sea habitualmente menor a 2 años (Lau, Stromgen y Green 2010).

4.2.5 Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)

En ellas la descarga se realiza mediante un arco eléctrico entre dos electrodos de tungsteno. Como las lámparas fluorescentes, requieren de un balasto que adecúe los parámetros de la corriente eléctrica para producir la emisión de luz, lo que disminuirá la eficiencia final de la luminaria. Se caracterizan por poseer una alta eficiencia e intensidad.

- **Vapor de mercurio.-** Son bastante eficientes y disponen de una vida útil muy larga, por lo que son usadas en iluminación de calles y grandes áreas como parques o gimnasios.
- **Halogenuros metálicos.-** Combinan alta eficiencia y alto IRC, se emplean en la iluminación de grandes áreas como estadios o aparcamientos, su luz es tan brillante que presentan problemas de contaminación lumínica en exteriores.

4.2.6 Dispositivos LED

Los dispositivos LED (Light-Emitting Diodes) son dispositivos de estado sólido que emiten luz cuando una corriente eléctrica de características determinadas los atraviesa. El color de la luz emitida depende del material empleado y, en menor medida, de la temperatura alcanzada. Su uso para iluminación aún no está muy extendido, aunque debido a mejoras técnicas constantes y a una disminución progresiva de los precios, su utilización está creciendo rápidamente para multitud de aplicaciones en el campo de la iluminación.

La luz emitida por los LEDs posee un estrecho ancho de banda en el espectro de frecuencia, lo que se traduce en colores más saturados o mejor definidos que aquellos que se obtendrían colocando filtros de color a bombillas incandescentes. Los modelos más modernos a día de hoy tienen un rendimiento luminoso importante, que depende en gran medida del color emitido, pero además, la gran direccionalidad que poseen (aunque también existen modelos omnidireccionales), puede aprovecharse para concentrar la iluminación allá donde interese, haciendo posible un aumento de eficiencia adicional si se realiza un buen diseño de la instalación.

Debido a las constantes mejoras en la tecnología LED, se continúa aumentando año a año la eficiencia de estos dispositivos. En el Gráfico 7 se muestra una estimación realizada con los datos obtenidos por el Departamento de Energía de los EEUU (Navigant 2010) de esta evolución hasta el año 2030.

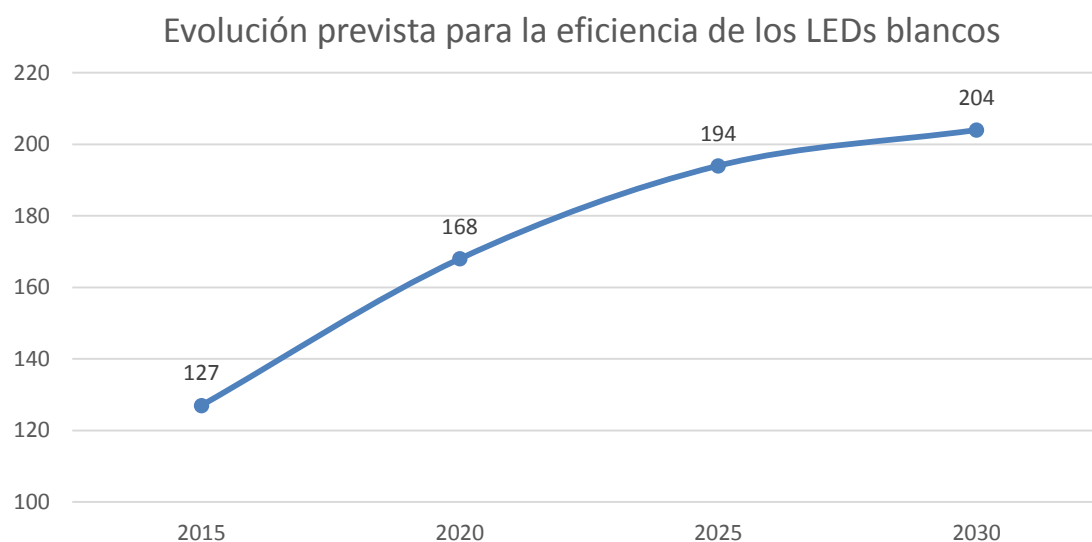


Gráfico 7.- Evolución de la eficiencia para los LEDs blancos.

Examinando esta figura vemos que, en 15 años, se espera aproximadamente doblar los valores de 2015. Además, a partir de 2030, como se puede apreciar por la evolución de la pendiente de la curva, se espera que este aumento disminuya, y que estos valores de eficiencia se vayan estabilizando en torno a cifras algo superiores a los 200 lm/W.

La calidad de iluminación que pueden alcanzar, propiedad ésta esencial para aquellos dispositivos destinados a tareas de iluminación en la que se persiga una representación lo más clara posible del entorno y de los objetos circundantes, se sitúa en torno a un IRC de 70 para los LEDs blancos.

La cantidad de luz emitida por los dispositivos LED disminuye a lo largo de su vida útil. El final de ésta es fijado para distintas fracciones de su flujo lumínico inicial dependiendo de su aplicación: estos valores suelen ser de 0,7, cuando es necesaria una buena calidad de la iluminación, como es el caso de las aplicaciones en aeródromos, o bien 0,5 si su función es meramente decorativa. Pese a ello, y en cualquier caso, la vida útil de estos dispositivos presenta valores muy elevados de entre unas 25.000 y 100.000 horas, que dependen fuertemente de la temperatura que alcanzan y de la tensión que se les suministra (Bullough, Issues with Use of Airfield LED Light Fixtures 2012).

4.2.7 Resumen de la comparativa

A continuación se presenta una tabla comparativa de los distintos tipos de lámparas comentados:

Lámparas		Eficiencia (lm/W)	IRC	Vida útil (horas)	Coste
Incandescentes (blanco)		8 - 24	100	750 – 1000	Muy bajo
Halógenas		10 - 35	100	1.700 – 2.500	Bajo
Fluorescentes		46 - 105	74 – 90	10.000 – 45.000	Medio – Alto
Descarga de vapor de sodio	Baja presión	100 - 190	44	18.000	Medio
	Alta presión	80 - 140	20 - 80	24.000	Medio
Descarga de alta intensidad	Vapor de mercurio	30 - 60	20 - 60	24.000 – 175.000	Medio
	Halogenuros metálicos	65 – 115	60 – 90	10.000 – 20.000	Medio – Alto
LED Blanco		28 - 150	70	25.000 – 100.000	Alto

Tabla 9.- Comparativa de lámparas³⁷.

4.3 Ahorro en iluminación de interior

Más allá de la utilización de lámparas eficientes, las medidas que deben gozar de mayor prioridad en este campo serán aquellas orientadas al mayor aprovechamiento posible de la luz natural. En España, para conseguir las mejores condiciones de luz natural en nuestro aeropuerto, se recomienda el uso de la Guía Técnica de Aprovechamiento de la Luz Natural en Edificios. Además, deberá disponerse de una iluminación mínima conforme a la legislación vigente, pero cuidando que la cantidad de luminarias colocadas no sea superior a las realmente necesarias, lo que sucede en muchos casos dando como resultado niveles de iluminación indeseables.

Para considerar de manera conjunta la eficiencia propia de la luminaria y la eficiencia derivada de la obtención de la intensidad apropiada para cada estancia, la cual dependerá principalmente de la actividad llevada a cabo en la misma, en la práctica se utiliza el Valor de Eficiencia Energética de la Instalación (VEEI) definido como:

$$VEEI = \frac{P_{lum} \times 100}{S \times E_m}$$

Donde P_{lum} = Potencia de la luminaria (W).

S = Superficie iluminada (m²).

E_m = Iluminación media mantenida (lux).

Los procesos llevados a cabo en los aeropuertos difícilmente se constituirán como elementos aislados del sistema global, sino que, en general, presentarán interrelaciones. Una interrelación importante es la existente entre la iluminación interior y la climatización, la cual da lugar a que a través de ciertas modificaciones o mejoras en iluminación se pueda lograr una reducción de la demanda o mejoras operacionales en climatización, multiplicando el beneficio de las mejoras realizadas. Del mismo modo habrá que evitarse que esta interrelación tenga un efecto pernicioso por las modificaciones llevadas a cabo (Lau, Stromgen y Green 2010).

En iluminación interior, las propiedades más importantes exigidas a las lámparas son, en general, una buena eficiencia y un IRC elevado. En base a la comparativa realizada en el apartado anterior, se concluye que las mejores opciones en interiores serán las lámparas fluorescentes o bien los dispositivos LED, más caros pero con una vida útil mucho mayor y un futuro prometedor. Además, en estancias especialmente amplias dentro de las terminales, como puede ser la sala de mostradores de facturación, o en el interior de hangares, puede ser

³⁷ Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Edison Tech. Center.

recomendable el uso de lámparas HID de halogenuros metálicos.

4.3.1 Empleo de lámparas fluorescentes

Suponen un ahorro económico respecto al resto de alternativas (si bien pueden ser superadas por los sistemas LED en un futuro). Se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Utilizar preferentemente lámparas fluorescentes compactas (CFL).**- Especialmente en lugares donde se realice trabajo de oficina, ya que son más eficientes y presentan mejor IRC que las tubulares. Además, se recomienda la sustitución de todas las bombillas incandescentes convencionales por CFLs, ya que las prestaciones de éstas superan ampliamente a las de aquellas, y su sustitución se realiza de forma directa en la mayoría de los casos, dado que ambas suelen disponer de casquillos de rosca estandarizados.
- **Uso de lámparas fluorescentes tubulares.**- Por otro lado, en lugares amplios donde no importe tanto la calidad del color, puede ser preferible el uso de lámparas fluorescentes tubulares, que por su mayor tamaño proporcionan mayor iluminación por unidad.
- **Emplear balastos electrónicos modernos.**- La función de estos dispositivos en los tubos fluorescentes es de vital importancia: por un lado suministrando la tensión necesaria para el encendido y limitando la corriente que los atraviesa, y por otro, eliminando el parpadeo propio de este tipo de lámparas, al aumentar la frecuencia de trabajo de los 100 Hz (el doble de los 50 Hz de la corriente alterna suministrada en España) hasta los 20 kHz (lo que además lleva aparejado un considerable aumento del rendimiento). Además, se recomienda encarecidamente el uso de balastos electrónicos T-5 y T-8 en lugar de los anticuados balastos T-12. La sustitución de estos por los anteriores presenta un ahorro de entre un 20% y un 25%, coste bajo, y un plazo de recuperación no superior a 5 años (Lau, Stromgen y Green 2010).

Por otro lado siempre debemos recordar que las lámparas fluorescentes requieren un tratamiento especial cuando vayan a ser desechadas, ya que por su contenido de mercurio suponen un peligro ambiental si no se procesan debidamente.

4.3.2 Empleo de lámparas HID

En iluminación interior es requerido generalmente un IRC elevado para conseguir una iluminación de calidad, por lo que las lámparas HID de vapor de mercurio, al igual que sus primas de vapor de sodio, caracterizadas por poseer un IRC bajo, no serán apropiadas, en general, para su uso en interiores.

Sin embargo, a diferencia de éstas, las lámparas HID de halogenuros metálicos sí poseen un IRC suficiente para su empleo en iluminación interior. El uso de este tipo de lámparas es una opción a tener en cuenta para la iluminación de grandes estancias de techo elevado ya que, debido a la elevada potencia para la que son construidas, y a la buena calidad de iluminación que proporcionan, unos pocos de estos dispositivos pueden sustituir a un buen número de dispositivos incandescentes, fluorescentes, o incluso de vapor de sodio, lo que unido a su excelente nivel de eficiencia, los pueden convertir en una opción ventajosa no solo desde el punto de vista energético, sino también económico.

4.3.3 Empleo de dispositivos LED

La evolución de la tecnología en dispositivos LED para interior está en constante evolución y sus propiedades compiten ya, y en algunos casos incluso superan, a las de los tubos fluorescentes (en cuanto a vida útil son muy superiores). Si bien aún presentan precios de adquisición altos, su empleo puede suponer un ahorro energético, y, a largo plazo, también económico, si se aprovecha la direccionalidad de la luz emitida por estos dispositivos, característica que nos permitirá usar lámparas de menor potencia, ya que podremos concentrar la mayor parte de la luz emitida en las zonas donde ésta sea necesaria. Por esta razón, son una opción de obligado estudio para su implantación en aeropuertos.

La gran versatilidad de estos dispositivos permite que puedan emplearse tanto para iluminación de pequeñas estancias, a través de lámparas LED de pequeña potencia, como para la iluminación de grandes espacios (como

el interior de los hangares), haciendo uso de dispositivos de mayor potencia, y sustituyendo a dispositivos más tradicionales en este tipo de aplicaciones como son las lámparas HID.

4.3.4 Control inteligente

Se estima que entre un 15% y un 45% de ahorro energético anual puede conseguirse si controladores para iluminación son apropiadamente instalados, conservados y operados (Benya, y otros 2003). En general, estas consideraciones también serán de aplicación en la iluminación exterior.

Algunos de estos controladores y sensores que posibilitan prácticas de eficiencia energética son:

4.3.4.1 Controles temporales de iluminación

Consiste en el uso de temporizadores que permitan el encendido o apagado de las luces de forma automática, o de sensores que realicen esta función midiendo la cantidad de luz natural mediante fotorresistencias. Además, en aquellos lugares donde exista aportación de luz natural, deberán emplearse balastos electrónicos regulables (caso de lámparas fluorescentes), lámparas LED de intensidad variable, u otros sistemas de regulación, que permitan ajustar el nivel de iluminación al requerido en cada momento. Se trata de medidas de bajo coste con periodos de recuperación de la inversión cortos (Lau, Stromgen y Green 2010).

4.3.4.2 Conmutación bi-nivel o multinivel

Otra práctica de bajo coste consiste en la configuración de la instalación de iluminación de una estancia de forma que permita el control de distintas luminarias dentro de un mismo circuito. Con la implementación más sencilla de este método, la conmutación bi-nivel, podemos conseguir 4 niveles de iluminación usando dos interruptores, mientras que mediante sistemas más elaborados, como la conmutación multinivel, en la que se emplean fotorresistencias para controlar las luminarias de forma automática, podemos conseguir un nivel de iluminación prácticamente constante, que se ajuste automáticamente en todo momento a los cambios en la iluminación exterior. Este sistema es de más fácil implementación en caso de existir sistema BAS (Benya, y otros 2003).

4.3.4.3 Sensores de ocupación

Estos sensores determinan cuando una estancia se encuentra ocupada mediante la detección de movimiento o sonido. Conectados al circuito eléctrico permiten el apagado automático cuando la estancia se considera desocupada, y por tanto la iluminación no es necesaria. Se emplean en espacios que están ocupados de forma intermitente y no predecible, como servicios, pequeños almacenes, etc. Se recomienda fijar un tiempo de inactividad pequeño, de unos dos o tres minutos máxime, para el apagado automático de las luces, de esta forma se maximiza el ahorro que estos sensores nos pueden aportar. El coste de estos sistemas es pequeño y el plazo de recuperación no superior a 5 años. Ahorros típicos de estos sistemas se sitúan entre el 35% y el 45% (DOI 2008).

4.3.4.4 Iluminación Central Automatizada

Un control centralizado de las instalaciones de iluminación permite la monitorización de las áreas de actividad, un control eficiente de éstas y una más fácil identificación de los problemas. Periodos de recuperación variables de entre 1 y 10 años han sido documentados y un coste típico bajo-medio (Lau, Stromgen y Green 2010).

4.4 Ahorro en iluminación exterior

Recordamos que, según la revisión realizada, la iluminación del aeródromo no se considera en este apartado. Así pues, la función principal de esta iluminación será la iluminación de los viales que permiten el acceso al aeropuerto. Las principales medidas de ahorro energético serán el empleo de lámparas eficientes, su correcta distribución, y una programación eficiente de las mismas, evitando su encendido cuando la iluminación natural aún sea suficiente para una buena visibilidad.

Las principales cualidades buscadas en una lámpara para iluminación exterior son un buen nivel de eficiencia y una vida útil suficientemente larga, ya que las tareas de mantenimiento suelen tener, en este caso, mayor

dificultad que en iluminación de interiores, y la implicación en materia de seguridad es ahora mucho mayor. El IRC pasa ahora a un segundo plano. En base a estos criterios, las mejores opciones serán, en primer lugar, las lámparas de vapor de sodio, que presentan niveles de eficiencia muy altos y una vida útil bastante aceptable, o en su defecto, la lámpara HID de vapor de mercurio, con peores prestaciones de eficiencia, pero con una vida útil mayor. En caso de que también se diese importancia a la calidad de la iluminación, las lámparas HID de halogenuros metálicos serían la mejor opción.

Por otro lado, las lámparas basadas en tecnología LED para iluminación exterior pueden ser una opción a tener en cuenta, ya que aunque en principio son menos eficientes, la direccionalidad de los LED y la alta iluminación efectiva (alto IRC) que ofrecen, permiten que dispositivos de potencia considerablemente menor puedan ser usados. Como ejemplo de lo anterior, actualmente se están sustituyendo lámparas de vapor de sodio de 120 W por lámparas LED de unos 60 W ofreciendo condiciones de visibilidad similares. Además, poseen una vida útil comparable a la obtenida por las lámparas de vapor de mercurio (Bullough, Issues with Use of Airfield LED Light Fixtures 2012).

4.5 Ahorro en iluminación en el aeródromo

Como hemos comentado, debido a las distintas funciones y requisitos que la iluminación del aeródromo presenta, conviene realizar una primera subdivisión de ésta en iluminación del área de maniobras (luces de superficie y ayudas visuales) e iluminación de las plataformas.

4.5.1 Ahorro en luces de superficie y ayudas visuales

Los sistemas de iluminación a los que aquí nos referimos comprenden principalmente:

- **Luces de pista, rodaje y plataforma.-** Identifican posiciones concretas dentro del aeródromo, comprenden una amplia lista de subcategorías: luces de borde, eje y extremo de pista, de identificación de umbral, de zona de toma de contacto, de zona de parada y de barra de parada, de borde, eje y extremo de calle de rodaje, etc.

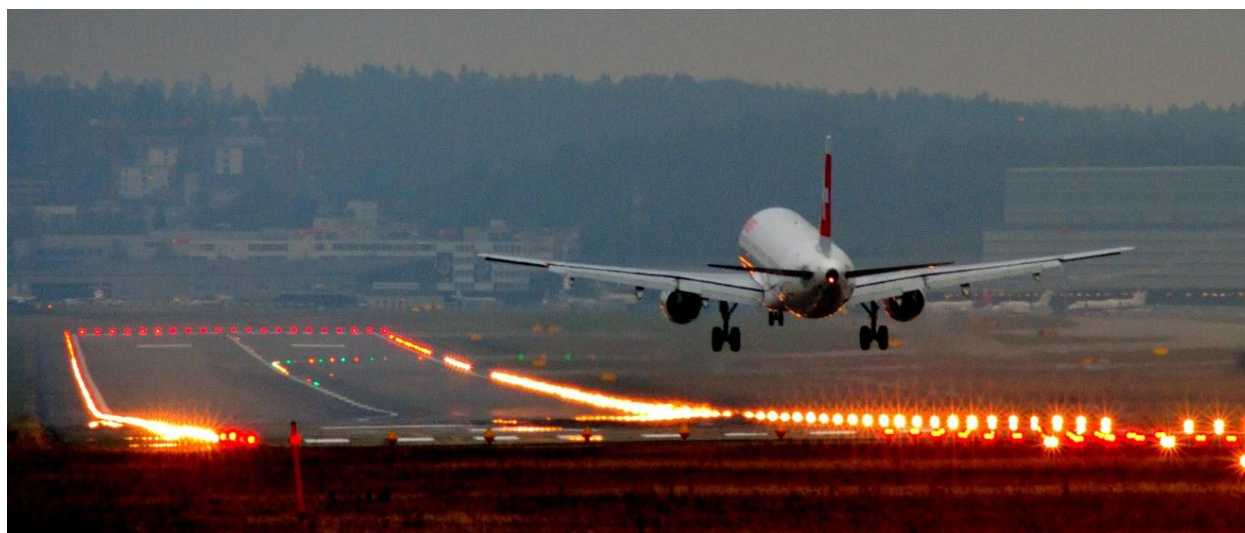


Imagen 19.- Vista de las luces de pista en el Aeropuerto de Zurich (Suiza)³⁸.

- **Luces de aproximación.-** Presentan configuraciones más o menos complejas, que aportan información de emplazamiento y distancia respecto al inicio de la pista de vuelo durante la maniobra de aproximación. A su vez podemos diferenciarlos en sistemas para vuelo visual y de aproximación por instrumentos (CAT I o CAT II/III).
- **Indicadores de pendiente y trayectoria de aproximación.-** Pueden ser de varios tipos, principalmente los sistemas VASI (Visual Approach Slope Indicator), PAPI (Precision Approach Path Indicator) y sus

³⁸ Fuente: By kuhnmi (DSC_3711_2) [CC BY 2.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>)], via Wikimedia Commons.

derivados.

- **Balizas para señalización de obstáculos.-** Usadas para la identificación de obstáculos, su color y patrón de funcionamiento dependen del tipo y peligrosidad de los obstáculos.
- **Iluminación de señales.-** Las señales que permiten la orientación visual de los pilotos en el área de maniobras deben poseer sistemas de iluminación para que puedan ser leídas en condiciones de poca visibilidad.



Imagen 20.- Luces de Aproximación³⁹.



Imagen 21.- Sistema PAPI⁴⁰.



Imagen 22.- Baliza de señalización de obstáculos con LED y autoabastecimiento solar⁴¹.



Imagen 23.- Letrero retroiluminado⁴².

Las propiedades más importantes que deben cumplir las lámparas en este caso son una buena definición del color y una alta fiabilidad. Las lámparas usadas convencionalmente son de tipo incandescente o halógeno con filtros lumínicos para los colores necesarios. Los colores solicitados por la ICAO son blanco, verde, amarillo, rojo y azul.

El ahorro más evidente sería la sustitución de estas lámparas incandescentes por dispositivos LED, los cuales están siendo cada vez más usados en aplicaciones relacionadas con la seguridad, como son las señales de salida de emergencia, los semáforos, las luces de automóviles y, el caso que nos ocupa, la iluminación de aeródromos. Estos dispositivos no son solo mucho más eficientes, sino que además presentan importantes ventajas operativas que los hacen idóneos para esta aplicación:

- **Menor uso de energía.-** La mayor eficiencia de los dispositivos LED será causa de una disminución considerable en la energía consumida. La Tabla 10 muestra una comparativa de los valores típicos de eficiencia alcanzados por bombillas incandescentes y dispositivos LED para iluminación de aeródromos para distintos colores de operación.

³⁹ Fuente: <http://www.airport-technology.com>

⁴⁰ Fuente: By Original uploader Tswgb. Edit by Abuk SABUK [Public domain], via Wikimedia Commons.

⁴¹ Fuente: Shanghai Reddot Electronics Co., Ltd.

⁴² Fuente: <http://reflectives.averydennison.com>

Color	Bombillas incandescentes (lm/W)	LED (lm/W)	Eficiencia LED/Eficiencia bombillas
Blanco	15	90	6
Verde	5	90	18
Rojo	5	55	11
Amarillo	8	55	6,9
Azul	<1	35	<35

Tabla 10.- Comparativa LEDs de distintos colores⁴³.

Como vemos, en el caso de las bombillas incandescentes, la eficiencia disminuye drásticamente al usar filtros de color, mientras que en la utilización de LEDs de distintos colores no aparecen mermas tan dramáticas de eficiencia. Este hecho queda claro al examinar la columna correspondiente a la relación de eficiencias para LEDs y bombillas incandescentes de cada color, en la que comprobamos que es precisamente para el color blanco donde esta relación es menor, 6, siendo el verde y especialmente el azul los colores para los que existe mayor diferencia, en concreto, resulta increíble comprobar como una bombilla incandescente con filtro azul consume al menos 35 veces más que un LED azul que podría ser empleado para la misma función. Estos bajos niveles de consumo, además de suponer un ahorro económico, suponen un aumento en fiabilidad y en seguridad de los trabajadores al trabajar con menores tensiones (U.S. Fed News Service 2006).

- **Disminución de los gastos de mantenimiento.-** Debido a que la vida útil de los dispositivos LED es mucho mayor a la de sus competidores incandescentes, los intervalos de mantenimiento necesarios disminuirán considerablemente, y con ellos los gastos de mantenimiento. De hecho, se estima que la mayoría del beneficio económico conseguido con esta sustitución proviene del ahorro de mantenimiento, el cual aún resulta difícil de medir, no existiendo datos muy fiables del mismo (Bullough, Issues with Use of Airfield LED Light Fixtures 2012).
- **Mejor visibilidad.-** Los tiempos de apagado y encendido de las señales LED intermitentes son prácticamente instantáneos, lo que contribuye a un menor tiempo de respuesta al efecto de éstas. Además, por la mayor saturación de color que estas luces proporcionan, resulta más fácil para los pilotos su correcta identificación, disminuyendo la probabilidad de error. En concreto, usando luces incandescentes sin filtros (blancas), suele ocurrir que estas son identificadas como luces amarillas, circunstancia que no ocurre con los dispositivos LED. Del mismo modo, se ha constatado que, usando dispositivos LED, las luces blancas, verdes y azules resultan más brillantes que las obtenidas de una fuente incandescente para el mismo flujo luminoso (Bullough, Yuan y Rea 2007).
- **Compatibilidad de los dispositivos LED con la instalación eléctrica existente.-** Al sustituir los dispositivos antiguos basados en bombillas incandescentes por dispositivos LED no suele ser necesario un cambio de la instalación eléctrica, si bien puede ser recomendable realizar algunas modificaciones, ya que la potencia consumida habrá disminuido considerablemente. Para adaptar el antiguo circuito a esta circunstancia será conveniente, por ejemplo, la instalación de transformadores de aislamiento para menores potencias, con lo que conseguiremos un mayor aumento de eficiencia, vida útil y fiabilidad de las luminarias del que conseguiríamos en el caso de simplemente sustituir éstas.

En general, con la sustitución de las lámparas podemos esperar un nuevo consumo de entre un 30% y un 50% del existente anteriormente usando los antiguos dispositivos incandescentes, mientras que cambiando también los transformadores éste puede llegar a ser de entre un 20% y un 30%. Finalmente, en caso de que el circuito al completo sea modificado, se puede esperar un consumo de entre un 2% hasta un 13% del anterior (Rainey 2007), sin embargo, una reforma de estas características supondrá un aumento de la inversión inicial y una recuperación de la inversión a más largo plazo, a cambio de lo que obtendremos un ahorro energético considerablemente mayor y un mayor ahorro económico a largo

⁴³ Elaboración propia a partir de datos de (Bullough, Issues with Use of Airfield LED Light Fixtures 2012)

plazo.

Algunas posibles desventajas o problemáticas han sido señaladas respecto a la utilización de dispositivos LED en aeródromos, entre ellas:

- **Baja temperatura.-** El poco calor emitido por estos dispositivos puede ser un problema en condiciones de baja temperatura, en las que puede resultar útil el calor emitido para derretir nieve o hielo que podrían bloquear la luz generada (Marsh, y otros 2008). No obstante, este problema puede ser solucionado sin dificultad en muchos casos, ya que estos dispositivos pueden ser rediseñados para generar mayor cantidad de calor, que puede ser a continuación evacuado y usado para solventar este posible contratiempo. Otra medida puede ser la colocación de pequeñas resistencias (Bullough 2012).
- **Alto precio.-** Como ya se ha señalado anteriormente, el principal inconveniente de estos dispositivos es su alto precio respecto a sus competidores, sin embargo, debido al constante avance en el campo de la tecnología LED, el precio de estos dispositivos disminuye rápidamente. El periodo de recuperación de la inversión, aunque muy variable de un caso a otro, no suele ser superior a 10 años, con valores típicos de unos 4 o 5 años (Bullough 2012).

4.5.2 Ahorro en la iluminación de las plataformas

En este caso se buscan lámparas de gran potencia que proporcionen una iluminación eficiente con un mínimo de calidad, por lo que generalmente se emplean lámparas de vapor de sodio de alta presión, muy eficientes y con IRC aceptable, o lámparas HID de halogenuros metálicos, que disponen de un IRC excelente y son también una opción energéticamente eficiente, aunque también más cara. Junto a éstas, otra opción de reciente aparición son las lámparas LED para aplicaciones de exterior de grandes potencias, opción que destaca por su buen conjunto de prestaciones: eficiencia, vida útil, calidad del color...

4.6 Otras cargas eléctricas

Además del gasto en iluminación, otras causas importantes de consumo de energía eléctrica en las terminales son las pantallas de información, las instalaciones para el transporte de equipajes o pasajeros, o los equipos de ofimática. Éstos equipos, y otras fuentes de consumo eléctrico que disponen de un gran potencial para conseguir mejoras de eficiencia se explican a continuación:

4.6.1.1 Pantallas de información

Comprenden las pantallas usadas para proporcionar información de vuelos y equipajes, publicidad o entretenimiento, así como las usadas por el personal del aeropuerto. Apagar estas pantallas cuando no sean de utilidad, de forma manual o automática, es una medida básica de coste cero.

Por otro lado, se recomienda la utilización de tecnologías más eficientes y modernas, como las pantallas LED en lugar de las anticuadas pantallas de tubo de rayos catódicos. Junto a una reducción del consumo sustancial (una pantalla de 24" LED consume tres veces menos que una de rayos catódicos) lograremos una reducción del calor generado, del peso y aumentaremos la calidad de imagen. Esta mejora de calidad puede tener beneficios indirectos importantes, ya que, facilitando a los pasajeros la lectura de información importante relacionada con los vuelos, podemos reducir el retraso en la salida de éstos causado por el retraso de los pasajeros (Ackerman 2009). Esta medida tiene coste bajo aunque el tiempo de recuperación de la inversión puede llegar a ser elevado.

4.6.1.2 Instalaciones de transporte

Medidas de eficiencia energética en estas instalaciones incluyen la instalación de cintas de alta flexibilidad y bajo rozamiento para los sistemas de transporte de equipajes, lo que demandará menor potencia de los motores; el apagado de escaleras mecánicas o de cintas desplazadoras que no sean necesarias, o el control de los motores de estas cintas mediante detectores de carga. Ahorros de entre un 30% y un 40% pueden derivarse de la implantación de mejoras en las cintas de equipajes o el uso de detectores de carga (Lau, Stromgen y Green 2010).

4.6.1.3 Equipos electrónicos de oficina

En cuanto al equipo de oficina empleado por el personal, las mejores prácticas para conseguir un ahorro energético son:

- Mantener los aparatos encendidos sólo cuando se estén usando y para periodos de inactividad largos (varias horas), así como mantenerlos apagados en lugar de en modo de espera.
- Utilizar aparatos con certificados de eficiencia energética como ENERGY STAR®. Esta medida también será de aplicación en otras áreas como climatización o iluminación.

4.6.1.4 Señales de salida emergencia

Una medida que ha resultado ser altamente rentable consiste en la sustitución de las señales de salida de emergencia antiguas, que resultan poco eficientes, por modelos modernos que empleen tecnología LED. Estas modificaciones presentan paybacks de entre 6 meses y 2 años (Turner, y otros 2007).

5 REDUCCIÓN DE EMISIONES EN LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

5.1 Consideraciones generales, legislación y emisiones

La mayor parte de la energía consumida en los aeropuertos es en forma de electricidad, la cual suele ser comprada a la red eléctrica en media tensión y, en casos excepcionales, generada en el propio aeropuerto por motivos de seguridad de suministro (especialmente en instalaciones imprescindibles para la seguridad de las operaciones, como la iluminación del aeródromo). En este último caso, suelen usarse grupos electrógenos, normalmente alimentados con diésel.

La autogeneración mediante energías renovables, por otro lado, se trata de una forma limpia de generación eléctrica, con la que además, podemos olvidarnos de los constantes aumentos de precio y fluctuaciones del mercado eléctrico. Pese a ello, el principal obstáculo de esta alternativa suele aparecer precisamente del lado de la rentabilidad, ya que aunque estas tecnologías están continuamente disminuyendo de precio y aumentando en eficiencia, en muchos casos aún continúan siendo una opción poco competitiva, necesitada de inversiones de capital elevadas y que presenta plazos de recuperación largos. A esto hay que añadir una especial inquietud por parte de las autoridades acerca de las implicaciones que algunas de estas instalaciones pueden presentar en materia de seguridad en las operaciones. En la actualidad, pese a todo, cada vez son más los aeropuertos que confían en estos sistemas para obtener al menos una parte de la energía eléctrica que necesitan (Koroneos, Xydis y Polyzakis 2010).

Por otro lado conviene observar que, y aunque la reducción de emisiones conseguidas con el empleo de energías renovables en sustitución de los combustibles fósiles, como el diésel o gas natural, es en general un valor fácilmente computable e independiente del lugar en el que se produce, para los casos en los que sistemas de generación de electricidad basados en energías renovables fuesen usados para proporcionar una energía, que, de otro modo, sería suministrada por alguna compañía eléctrica, los beneficios ambientales conseguidos dependerían entonces del mix eléctrico existente en la red, pudiéndose dar el caso de que, si el peso en éste mix de las energías renovables fuese muy elevado, el ahorro en emisiones conseguido fuese inexistente.

En el caso de la red eléctrica en España, la generación de energía eléctrica es cada vez menos contaminante. En el año 2013, un 42,2% de la energía demandada en la península fue cubierta mediante energías renovables, lo que supuso un aumento de un 30% respecto del año anterior, además, existe un peso significativo de energía nuclear (21,2% de la demanda de dicho año), lo que también contribuye a reducir las emisiones (REE 2014a). En el año 2014 el porcentaje de renovables se ha mantenido en valores similares (REE 2015). Este aumento de las renovables en la electricidad generada en nuestro país está fomentado en la actualidad por el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables PANER 2011-2020, motivado por la Directiva Europea 2009/28/CE de Abril de 2009, la cual fija como objetivos para el año 2020 la consecución de un 20% del consumo final bruto de energía consumida en la Unión Europea procedente de energías renovables.

Pese a todo, en 2013, el factor de emisión medio asociado a la generación de energía eléctrica fue de unos 249 g/kWh_e (REE 2014b) de CO₂ lo que continua siendo un valor relativamente alto comparado con otros países de nuestro ámbito geográfico, como por ejemplo Francia, cuyas emisiones en 2014 fueron de 20,75 g/kWh_e (RTE 2014).

A nivel europeo, el programa de subvenciones más importante, ya comentado anteriormente al hablar de la utilización de energías renovables para climatización, es el programa ALTANER, enmarcado dentro del IEE, el cual ayuda en la financiación de proyectos que aumenten el porcentaje de electricidad producida de fuentes renovables. A nivel nacional, las subvenciones son gestionadas por las comunidades autónomas u otras agencias regionales.

En España, el autoconsumo mediante energías renovables de instalaciones aisladas no presenta problemas legales, sin embargo, cuando se desee consumir electricidad de forma simultánea con la red pública, el procedimiento administrativo es más complicado, especialmente en el caso de que se desee verter el excedente

eléctrico a la red. Esta opción que además carece de incentivos económicos para nuevas instalaciones desde el Real Decreto-Ley 1/2012, lo cual provoca que actualmente el precio de venta de la electricidad resulte bastante menor al precio de compra. En un futuro, sin embargo, la previsible aparición de una ley de Balance Neto, que permita al consumidor-productor recuperar el excedente eléctrico vertido a la red, podrá suponer un importante impulso al autoconsumo en nuestro país.

5.2 Instalaciones para energía solar

La fuente de energía en la que más esperanza se está depositando para sustituir a los combustibles fósiles en los aeropuertos, y en última instancia, permitir la independencia energética de éstos, es la energía solar, la cual es normalmente aprovechada para la obtención de electricidad mediante los paneles solares fotovoltaicos, o bien mediante colectores solares térmicos combinados con una turbina de vapor.

La colocación de paneles solares en los aeropuertos resulta una posibilidad muy favorecida por la presencia de extensas superficies techadas en terminales, hangares o parkings, y de grandes extensiones de terreno relativamente llanas y disponibles para la construcción de nuevas instalaciones. Además, posibles obstáculos o inconvenientes para el correcto funcionamiento de estos sistemas, como podría ser la presencia de alta vegetación, o edificios que puedan bloquear la luz solar, difícilmente estarán presentes. Además, si estos paneles son construidos sobre estructuras ya existentes, su impacto ambiental queda reducido al mínimo, ya que, además de un consumo de agua muy bajo y emisiones de GEI nulas o muy reducidas, el impacto producido por el uso de relativamente amplias extensiones de terreno es eliminado.

Un factor geográfico esencial para hallar la viabilidad de estos dispositivos es la irradiancia solar media, es decir, la potencia media en forma de radiación solar incidente por unidad de superficie, en la Imagen 24 se representa dicho valor para toda la superficie terrestre. Otro valor importante, muy relacionado con el anterior, es la irradiación o insolación, que mide la energía recibida por una superficie en un periodo de tiempo determinado. Obviamente, a mayores niveles de irradiación registrados en el aeropuerto, mayor rentabilidad será esperable de la colocación de paneles solares.

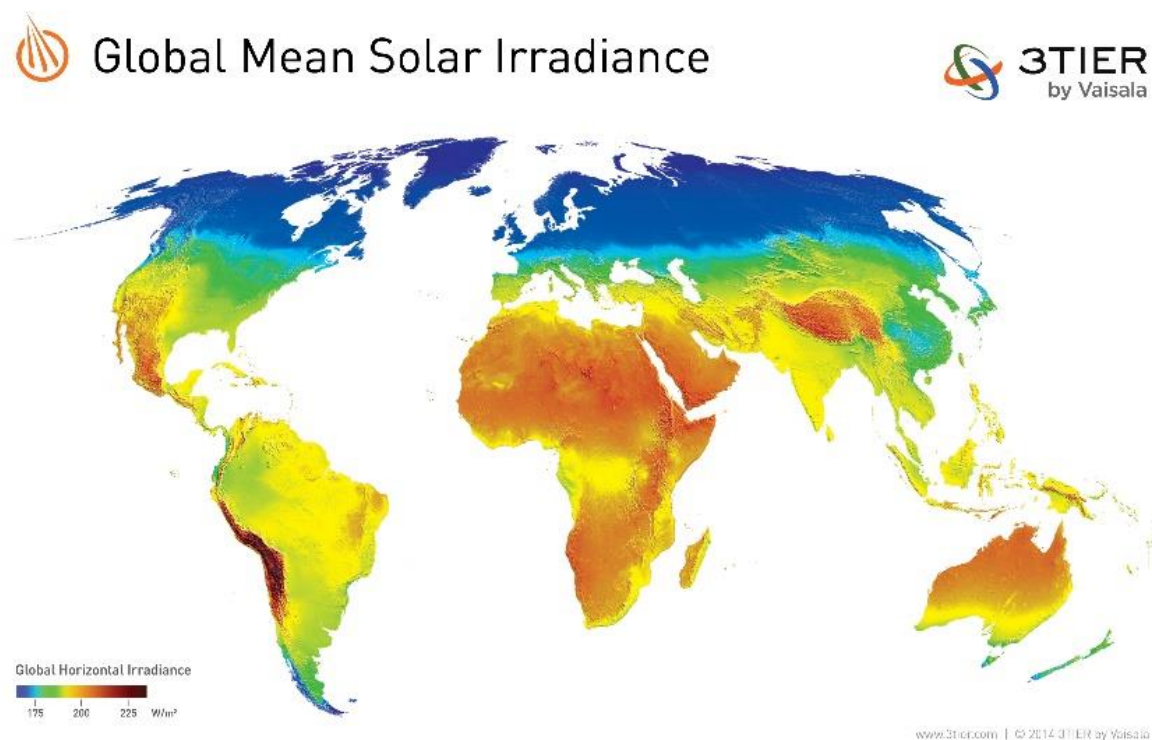


Imagen 24.- Mapa de irradiancia solar media.

5.2.1 Paneles solares fotovoltaicos

Son sistemas que permiten obtener corriente eléctrica a partir de la luz solar mediante el efecto fotovoltaico, el

cual convierte luz (fotones) en electricidad (voltaje), y es producido en las llamadas células o módulos fotoeléctricos. En particular, cuando la radiación solar incide sobre la célula fotoeléctrica, ésta es absorbida por el material semiconductor (similar al utilizado en los microchips de los ordenadores) con el que están fabricadas, y se liberan electrones del material, los cuales “circulan” por el mismo creando la corriente eléctrica.

La eficiencia en la generación eléctrica de una célula fotoeléctrica depende fuertemente de variables externas como la radiación solar o la temperatura de funcionamiento. Por esta razón, la potencia que es capaz de obtenerse con esta tecnología suele expresarse en valores pico, esto es, bajo unas condiciones estándar de funcionamiento de 1 kW/m² de radiación solar, 25°C de temperatura y Masa de Aire (AM) de 1,5.

Las células fotoeléctricas se agrupan formando paneles, los cuales van montados sobre estructuras o marcos metálicos, generalmente de aluminio. A su vez éstos son asegurados en otras estructuras existentes, como tejados, o colocados sobre soportes ubicados sobre el terreno. Los paneles están cubiertos por finas películas de cristal protector y están adheridos a substratos de cemento que atrapan el calor producido y evitan el sobrecalentamiento de los módulos. Por último los paneles se agrupan en filas o series, que a menudo funcionan como una única unidad generadora, y éstas, a su vez, se agrupan en “matrices” o grupos, que forman la instalación o “huerta” solar. Estas instalaciones pueden estar formadas de solo unos pocos paneles o series de éstos que pueden proporcionar electricidad a uno o varios edificios, o pueden llegar a abarcar miles de paneles en parques solares que generan electricidad para su incorporación a la red eléctrica.



Imagen 25.- Paneles fotovoltaicos⁴⁴.

Las instalaciones fotovoltaicas para autoconsumo pueden clasificarse en 2 tipos principales:

- **Aisladas.-** Usadas generalmente para proporcionar energía a una instalación alejada de la eléctrica. Usualmente usan baterías para almacenar la energía generada en los momentos en los que ésta sea inferior al consumo. Estas instalaciones suelen ser fijas y estar diseñadas para maximizar la producción en invierno. Una opción que puede ser muy ventajosa es su funcionamiento en paralelo con generadores eólicos en instalaciones híbridas, ya que de esta forma podremos aumentar considerablemente la disponibilidad energética.
- **Conectadas a la red.-** Instalaciones que funcionan en paralelo con la red pública. El punto de acceso a la red interna de distribución es fijado por la compañía eléctrica. En este caso tenemos la opción de verter el exceso energético a la red, opción que aunque muy ventajosa desde el punto de vista de las emisiones, no reportará muchos beneficios económicos, ya que en España, el consumo con balance neto aún no está regulado, y las primas por realizar esta actividad se encuentran actualmente suspendidas con objeto de aliviar el déficit tarifario del sistema eléctrico español.

En este caso el objetivo es generar la mayor cantidad de energía posible, por lo que los paneles pueden contar con un mecanismo, o “seguidor”, que les permita modificar su orientación y así captar la mayor cantidad de radiación solar posible, estos seguidores pueden ser de eje azimutal, de eje horizontal o incluso de dos ejes.

Las emisiones de GEI generadas durante la operación de la instalación fotovoltaica son mínimas o nulas, estando éstas principalmente ocasionadas durante su fabricación, transporte, instalación y mantenimiento. Este sistema de generación de energía eléctrica no presenta partes móviles para su operación, más allá de las necesarias para la rotación de los paneles, que nos permitan obtener la orientación más óptima respecto a los rayos solares, por lo que precisan de poco mantenimiento, y disponen de una vida útil de hasta unos 30 años con posibilidad de ser recicladas tras este tiempo (Wybo 2013).

Se han empleado en aplicaciones especializadas desde hace más de 50 años, y como plantas de generación para la red eléctrica desde hace más de 20 años, por lo que poseen una tecnología fiable, aunque siempre en continua evolución. El rendimiento de las células fotovoltaicas disponibles en el mercado es amplio, con valores típicos de un 15%, siendo los valores más altos de entorno a un 20%, aunque rendimientos superiores al 46% han sido

⁴⁴ Fuente: DOE/NREL.

obtenidos en el laboratorio (Buckley 2014). En los últimos años se ha producido un crecimiento excepcional del uso de la energía solar fotovoltaica en todo el mundo, como puede comprobarse en la siguiente gráfica.



Gráfico 8.- Evolución y prognosis de la capacidad fotovoltaica mundial instalada.⁴⁵

En España, el documento básico HE-5 del CTE establece una contribución fotovoltaica mínima en el consumo eléctrico de edificaciones con elevado consumo eléctrico y gran superficie, sin embargo, los aeropuertos no pertenecen al ámbito de aplicación de dicha normativa, por lo que la implantación de paneles fotovoltaicos en ellos no es obligatoria.

5.2.1.1 Los paneles solares fotovoltaicos en los aeropuertos

El uso de plantas solares fotovoltaicas en aeropuertos cada vez es una práctica más extendida, ya que éstos ofrecen una localización en principio muy ventajosa para la construcción de parques solares, es decir, amplias zonas llanas, seguras, y cercanas a líneas de transporte. Sin embargo, además de las limitaciones y obstáculos legislativos contemplados para el caso de España en el apartado anterior, existen importantes limitaciones adicionales para la implantación de esta tecnología en los aeropuertos:

- **Alto coste.-** Actualmente esta alternativa aún continúa siendo relativamente cara, siendo viable en aeropuertos solo en ciertos casos y/o lugares donde se reciba gran cantidad de energía en forma de radiación solar, las alternativas resulten caras, y/o existan incentivos fiscales o subvenciones. Sin embargo, la constante aparición de nuevos avances tecnológicos, como en el campo de los materiales, y la disminución de los costes de instalación, favorecen que cada vez sea una opción más rentable, haciendo que en muchos lugares sea ya una opción de obtención de electricidad más barata que las convencionales por combustibles fósiles (Lau, Stromgen y Green 2010). En el caso de las células de silicio cristalino comerciales, su precio ha descendido desde los 76,67 \$/W en 1977 hasta los 0,74 \$/W en 2013 (Carr 2013), y aun actualmente mantienen un ritmo de abaratamiento excepcional, con un precio medio en 2014 de 0,36 \$/W (EnergyTrend 2014). Además, se espera un descenso de su precio aún mayor en el futuro, ya que éste sigue la llamada ley de Swanson, la cual establece una reducción de costes del 20% cuando la capacidad de fabricación de la industria es doblada. Desarrollos tecnológicos que están a la espera de ser incorporados, aseguran que esta tendencia se seguirá cumpliendo al menos durante los próximos años (Carr 2013).

Por último conviene hablar de una práctica que, de estar disponible, puede facilitar la instalación de estos sistemas en cubiertas de edificios como las de los aeropuertos. Consiste en un modelo de arrendamiento en el que es una empresa privada la que posee, instala, opera y mantiene los equipos, alquilando el espacio al propietario del edificio y vendiéndole a su vez la energía generada. Esta práctica es una forma de aprovechar cubiertas infrautilizadas que dispongan de una superficie considerable para

⁴⁵ Fuente: EPIA (datos de 2014).

la instalación de estos dispositivos. Aunque se evitan muchos gastos directos, estos acuerdos son legalmente complicados, y exigen compromisos para la compra de energía a un precio fijo durante periodos de al menos 20 años (Coughlin 2009).



Imagen 26.- Instalación fotovoltaica en el Aeropuerto de Atenas (Grecia)⁴⁶.

- **Riesgos para las operaciones.**- Existe la preocupación por parte de los gestores aeroportuarios y las autoridades competentes de que la instalación de paneles solares pueda entrañar una serie de riesgos para la seguridad operacional. Los más importantes de estos riesgos son (Wybo 2013):
 - Pueden suponer una fuente de atracción para aves, ya que proporcionan posaderos y sombra, además, al reflejar luz polarizada pueden atraer insectos y éstos a su vez aves insectívoras. Estudios recientes, sin embargo, han demostrado que los paneles solares fotovoltaicos tienen menor capacidad para atraer aves peligrosas para las operaciones de las aeronaves que superficies cubiertas de hierba u otras cubiertas vegetales usadas en aeropuertos (DeVault, y otros 2013).
 - Peligro de descargas eléctricas durante las tareas de mantenimiento.
 - Peligro de generación de FOD (Foreign Object Debris) en las pistas.
 - Peligro de fuego de la aeronave, y dificultades en la evacuación y operación de los equipos de rescate en caso de que una aeronave que se haya salido de la pista durante las operaciones de despegue o aterrizaje invadiese el parque solar.

En principio estos riesgos no tienen por qué aparecer en todos los casos, y de aparecer, no deben suponer un impedimento definitivo para la colocación de los paneles solares, sino que, una vez evaluado cada riesgo, y si se considera necesario, se pueden implementar una serie de medidas preventivas para eliminar cada uno de ellos o reducirlos a unos niveles admisibles, de entre estas medidas destacamos (Wybo 2013):

- Desarrollo de un sistema electrónico integrado que sea capaz de detectar aperturas en el circuito eléctrico y cortocircuitarlo inmediatamente, lo que reduce la posibilidad de descargas eléctricas o la generación de chispas o arcos eléctricos que puedan producir un incendio.
- Incorporar refuerzos estructurales, para que, sin merma de su fragilidad, permitan asegurar la integridad de los paneles en caso de choque y la formación de restos o FOD.
- Utilizar estructuras frangibles.
- Disponer de espacios para la circulación de vehículos o personas dentro del parque solar.

⁴⁶ Fuente: <http://www.ethnos.gr>

Además, otro riesgo al que se ha prestado mucha atención, es la posibilidad de que los paneles puedan producir deslumbramiento a los pilotos, ya que, aunque éstos están diseñados para reflejar la menor cantidad posible de luz (aproximadamente un 2% de reflectividad), suelen estar constituidos por superficies especulares, lo que provoca una reflexión más concentrada de los rayos solares (Barrett y Devita 2011). Un deslumbramiento así generado podría desembocar en un accidente, sin embargo, estudios recientes han identificado este riesgo como insignificante, o como máximo, comparable al producido por superficies acuosas como la de los lagos (Riley y Olson 2011).

5.2.2 Colectores solares para la generación de electricidad

Los sistemas de energía solar de concentración usan espejos reflectores alineados en largas filas con el objetivo de concentrar los rayos solares en un objeto determinado. El calor así obtenido es usado para generar vapor de agua, que posteriormente servirá para generar electricidad en una turbina de vapor. Estas instalaciones suelen construirse para potencias eléctricas elevadas y pueden ser de varios tipos:

- **Colectores solares cilíndrico-parabólicos.-** Es el más común, los colectores tienen una forma cilíndrico-parabólica que les permite concentrar un alto porcentaje de los rayos solares en una tubería colocada exactamente en la línea focal, por cuyo interior circula el agua del circuito primario. Disponen de un eje de rotación que les permite modificar su orientación para disminuir en lo posible la inclinación de los rayos solares sobre el eje de simetría parabólico.
- **Reflectores Fresnel.-** Están contruidos con espejos planos que concentran la energía solar en tubos, a través de los que cuales es bombeado el líquido de trabajo.



Imagen 28.- Colector solar cilíndrico-parabólico⁴⁷.



Imagen 27.- Reflectores Fresnel⁴⁷.



Imagen 29.- Discos Stirling⁴⁷.

- **Disco Stirling.-** Consisten en reflectores parabólicos independientes que concentran la luz en un receptor posicionado en el punto focal, donde se calienta agua a alta temperatura que es posteriormente empleada en un motor Stirling para la producción de energía eléctrica. Este sistema permite usar dos ejes de rotación para maximizar la energía obtenida de los rayos solares, por ello son los que consiguen mayores eficiencias (cercanas al 32%). Por contra su desarrollo es reciente y aún no existen aplicaciones comerciales de esta tecnología.
- **Centrales solares de torre.-** Estas instalaciones concentran



Imagen 30.- Central solar de torre⁴⁷.

⁴⁷ Fuente: <http://www.kcet.org>

los rayos solares sobre un único punto, colocado en lo más alto de una torre. Este sistema es de difícil inclusión en las proximidades de los aeropuertos debido a que la elevada altura de la torre lo hace incompatible con las superficies limitadoras de obstáculos, también pueden presentar problemas para la visibilidad de los pilotos debido a la intensidad de la luz que es reflejada sobre la torre.

Para finalizar es necesario destacar que estos sistemas no suelen ser usados en aeropuertos, ya que, exceptuando el disco Stirling, el cual se encuentra aún en fase de desarrollo, están pensados para instalaciones de alta capacidad para servir a la red eléctrica pública. No obstante, en un futuro cercano cuando su desarrollo se encuentre en una fase más madura y comience a ser comercializado, el disco Stirling puede ser una alternativa viable que tendrá que podrá ser tenida en consideración.

5.3 Instalaciones para energía eólica

Esta fuente energética podrá ser usada para la obtención de energía eléctrica a partir de la energía cinética del viento mediante aerogeneradores (también llamados turbinas eólicas). Un aerogenerador, en general, poseerá un rotor capaz de convertir dicha energía cinética en un momento torsor aplicado al eje del rotor, un sistema de transmisión (para generadores multi-polos) que nos permitirá aumentar la velocidad de rotación, y un alternador para transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Esta tecnología comenzó a desarrollarse a finales de los años 70, por lo que se trata de una tecnología ya madura si bien en constante evolución.

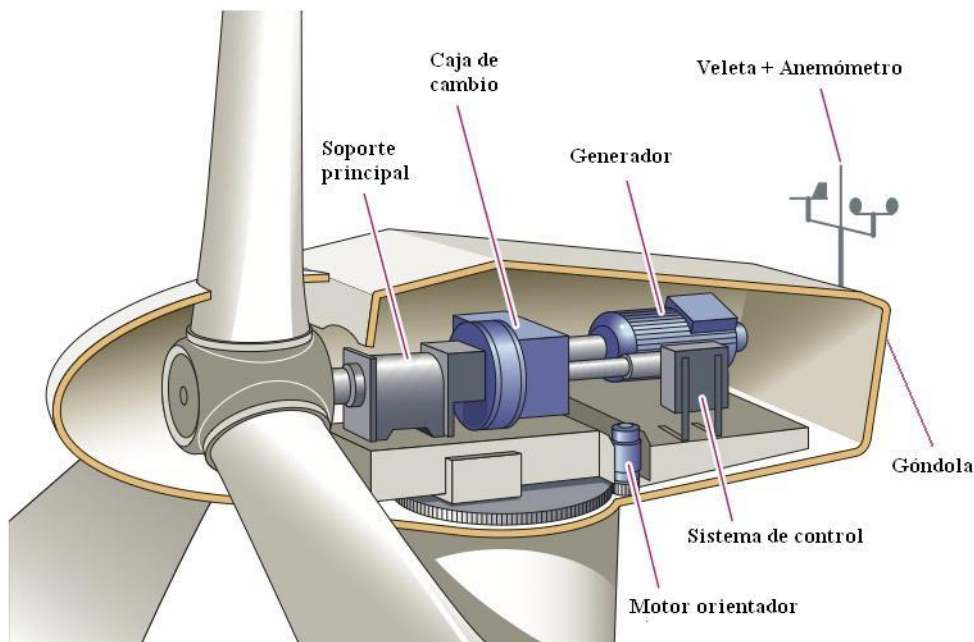


Imagen 31.- Ilustración del interior de un aerogenerador⁴⁸.

La velocidad del viento es el principal parámetro que nos permitirá obtener un buen rendimiento de estas máquinas (la potencia eléctrica conseguida será proporcional al cubo de dicha velocidad), y ya que éste es un factor muy dependiente del lugar concreto en que nos encontremos, el factor geográfico, al igual que ocurría con la energía solar, también será ahora determinante a la hora de considerar la instalación de estos sistemas. Una forma rápida de evaluar la idoneidad de una determinada localización para la operación de aerogeneradores consiste en hallar la velocidad media anual del viento en dicha zona. El mapa de la Imagen 32 muestra dicho valor para la superficie terrestre a una altura de 80m.

⁴⁸ Fuente: <http://renovable.com/>

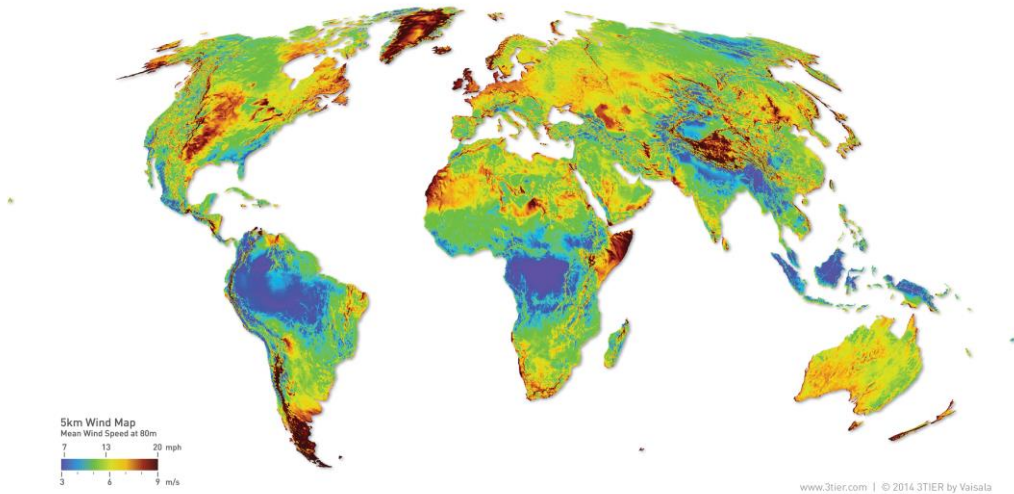


Imagen 32.- Mapamundi de velocidad media del viento.

Por otro lado, del mismo modo que ocurría con la energía solar fotovoltaica, la capacidad eólica instalada a nivel mundial ha sufrido un aumento exponencial en los últimos años (Gráfico 9), y se espera que siga manteniendo esta tendencia, alcanzando porcentajes de entre un 11% y un 31% de la producción mundial de electricidad para 2050 (GWEC & Greenpeace 2014).



Gráfico 9.- Evolución histórica de la potencia eólica global instalada⁴⁹.

A continuación comentaremos dos posibles sistemas para su uso en aeropuertos: los aerogeneradores convencionales, es decir, aquellos comúnmente usados en los parques eólicos; y las micro-turbinas eólicas, que permiten evitar algunos importantes inconvenientes que entraña uso de los primeros en aeropuertos.

5.3.1 Aerogeneradores convencionales

En esta categoría incluimos las torres eólicas convencionales, las cuales pueden ser empleadas en parques eólicos o en unidades individuales. Las torres constan habitualmente de un rotor de 3 palas, cuyo eje entrega la energía mecánica a un motor eléctrico contenido en la góndola. Actualmente, los fabricantes buscan tamaños cada vez

⁴⁹ Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de GWEC.

mayores (pueden llegar hasta casi los 200 metros de altura y las 20 T de peso), lo que permite captar vientos a mayores alturas y por tanto, a mayores velocidades, y además aumentar el diámetro de pala, consiguiendo así mayores potencias y disminuyendo los costes marginales. En 2013 el coste específico por kilovatio de potencia instalada fue de 1,252 €, y se espera que continúe descendiendo moderadamente (GWEC & Greenpeace 2014). Por su parte, el coste de generación eléctrica en parques eólicos resulta en algunos lugares incluso inferior al correspondiente a la utilización de centrales térmicas de carbón o gas (Bloomberg 2013).

El área circundante a los aeropuertos suele presentar buenas propiedades para la colocación de aerogeneradores, ya que, en general, se trata de zonas relativamente poco pobladas, lo que es debido a los altos niveles de ruido que implica la cercanía de pistas de vuelo; y además suelen ser zonas libres de obstáculos que podrían bloquear el viento disminuyendo su velocidad (Geest 2010).

Las desventajas, no obstante, también son importantes, y al igual que ocurría con las torres de concentración solar, también ahora pueden aparecer problemas por la elevada altura de las turbinas eólicas (Barrett y Devita 2011), que en ocasiones pueden penetrar las Superficies Limitadoras de Obstáculos definidas en el Anexo 14 de ICAO. Las superficies que tienen un mayor riesgo de ser invadidas por estas instalaciones son la Superficie Horizontal Interior, la cual cuenta con una altura de unos 45 m, y la Superficie Cónica, cuya altura máxima varía desde los 80 m hasta los 145 m en función de la longitud de la pista. Si esto ocurre será necesario realizar una evaluación de riesgos para demostrar que el obstáculo no afecta a la seguridad de las operaciones en el aeropuerto (Geest 2010).

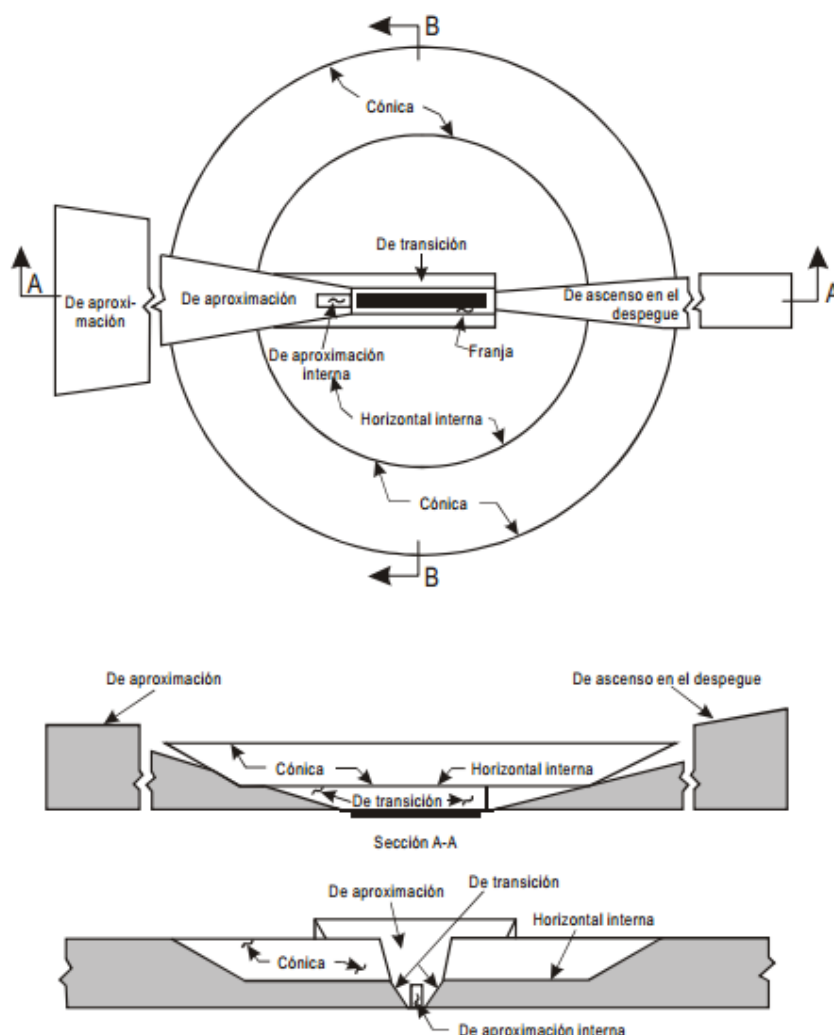


Imagen 33.- Ilustración de las superficies limitadoras de obstáculos⁵⁰.

⁵⁰ Fuente: OACI

Junto a lo anterior, también pueden suponer un obstáculo significativo para el buen funcionamiento de radares primarios y secundarios, ya que pueden provocar señales parásitas o bloqueo de la señal, e incluso pueden suponer un peligro para aviones pequeños volando a baja altura por la turbulencia generada en las palas del rotor. Por todos estos problemas, en la práctica está más extendida la utilización en aeropuertos de micro-turbinas eólicas.

5.3.2 Micro-turbinas eólicas

Actualmente existe una gama relativamente amplia de estos aparatos, que abarca desde pequeños y ligeros generadores domésticos, que pueden ser instalados en el tejado como si de una antena parabólica se tratase, hasta turbinas considerablemente mayores que pueden proporcionar potencias de hasta 10 kW por unidad, o incluso varias decenas. En general se considerarán micro-turbinas aquellas con potencias menores de 100 kW.

Existen 2 tipos principales de micro-turbinas eólicas, las de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbines), y las de eje vertical (Vertical Axis Wind Turbines):

- **Eje horizontal.-** De diseño similar a los grandes aerogeneradores ya comentados. Los modelos más pequeños accionan el generador de manera directa, sin usar caja de cambios, obtienen corriente continua y usan aspas aeroelásticas, rodamientos y una veleta para mantenerse en la dirección del viento, mientras que modelos mayores usan caja de cambios, trabajan a corriente continua y tienen un mecanismo más complejo para orientarse.



Imagen 34.- Aerogenerador convencional en el Aeropuerto East Midlands (Inglaterra)⁵¹.



Imagen 35.- Micro-turbinas eólicas de eje horizontal en el Aeropuerto Boston Logan (Massachusetts, EEUU)⁵².



Imagen 36.- Micro-turbina eólica de eje vertical sobre tejado⁵³.

- **Eje vertical.-** Aunque aún la mayoría de micro-turbinas eólicas son de eje horizontal, estos sistemas están siendo cada vez más empleados. Las versiones más modernas emplean diseños helicoidales para evitar la variación del momento torsor durante la rotación y la generación de grandes momentos flectores en las palas. Las principales ventajas e inconvenientes respecto a los modelos tradicionales

⁵¹ Fuente: Reuters (Darren Staples)

⁵² Fuente: USA Today (Mark Garfinkel).

⁵³ Fuente: By Anders Sandberg from Oxford, UK (Vertical axis wind turbine) [CC BY 2.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>)], via Wikimedia Commons

HAWT se enumeran a continuación:

- **Ventajas.-** Sus principales ventajas son:
 - **Menores costes de mantenimiento.-** Estos aparatos no precisan de eje de rotación adicional para orientar la estructura ni de instrumentos adicionales para detectar la dirección del viento, lo que les permite disponer de un mecanismo más simplificado. Además presentan menores cargas de fatiga por turbulencias y cambios en la dirección del viento. Todo esto redundará en una mayor vida útil de los componentes, lo que disminuye los costes de mantenimiento respecto a los modelos tradicionales HAWT (Jha 2010).
 - **Mayor versatilidad.-** Su eficiencia es muy similar a la de los modelos de eje horizontal, sin embargo, debido a su omnidireccionalidad pueden aprovechar mejor vientos turbulentos o a ráfagas, y presentan menores problemas en lugares con vientos muy variables. Además, estos modelos poseen velocidades de encendido mucho menores, de en torno a 2 m/s, frente a los 4-5 m/s típicos de las HAWT. Estas características los hacen más apropiados para su funcionamiento a menor altura, sin necesidad de usar los altos mástiles usados para turbinas de eje horizontal (AEOLOS s.f.).
 - **Menor ruido.-** El efecto conjunto de la menor velocidad de rotación y menor radio de rotor de los modelos VAWT hacen que el coeficiente de velocidad en la punta del rotor (tip-speed ratio) sea bastante menor para este tipo de aerogeneradores, lo que disminuye considerablemente el ruido generado.
 - **Mayor aprovechamiento del espacio.-** La separación mínima entre rotores, tanto en la dirección del viento dominante, como en la dirección perpendicular a ella, es considerablemente menor que en el caso de los HAWT. Es más, estudios recientes han demostrado que la eficiencia de los rotores en algunos modelos VAWT puede ser aumentada hasta un 20% si estos son colocados en parejas, separados a una distancia aproximada de 1,5 D en la dirección perpendicular al viento principal, donde D es el diámetro del rotor (Mehrpooya 2014).
- **Inconvenientes.-** La mayor parte de los inconvenientes asociados con las VAWT se han ido paliando con el empleo de materiales compuestos y mejoras en el diseño, sin embargo algunos inconvenientes importantes permanecen:
 - **Coste elevado.-** Al tratarse de una tecnología relativamente nueva su precio suele ser bastante superior al de los modelos de eje horizontal. Los plazos de recuperación de la inversión serán por tanto bastante elevados, si es que esta amortización llega a producirse.
 - **Fiabilidad incierta.-** Los diseños de este tipo de aerogeneradores están en constante evolución, lo que los hace propensos a sufrir fallos inesperados, especialmente en modelos muy recientes.

5.4 Instalaciones para energía de biomasa

5.4.1 La biomasa: definición, clasificación y propiedades

La energía de biomasa es una energía renovable basada en el aprovechamiento de la biomasa. La biomasa, por su parte, es un término amplio, cuya definición genérica en materia energética, como viene recogida en la RAE es “*Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía*”.

La biomasa puede usarse de manera directa mediante su combustión, sirviendo como sustituto de los combustibles fósiles en muchas aplicaciones como climatización o generación eléctrica. Además, la biomasa puede someterse a procesos bioquímicos para la elaboración de biocombustibles como el biogás, o el biodiésel y el bioetanol que pueden ser empleados en tipos de vehículos o para climatización.

La biomasa, además, entendida como recurso energético, puede clasificarse como:

- **Biomasa natural.-** Aquella que es producida sin intervención humana, como residuos de explotaciones forestales que no son aptos para emplearse en la industria del papel o la madera.
- **Biomasa residual.-** Aquella que es generada como subproducto o residuo de actividades agrícolas (paja, cáscaras, huesos...), silvícolas (hojas y ramas pequeñas), ganaderas (purines o estiércoles), de la transformación de la madera, de actividades agroalimentarias (grasas), de depuradoras (lodos de depuradora), del reciclado de aceites, o de basura urbana (biogás de vertedero), entre otros.
- **Biomasa procedente de cultivos energéticos.-** Se trata de biomasa obtenida de cultivos o plantaciones donde se produce un tipo de especie vegetal con la única finalidad de su consumo energético, como pueden ser cultivos de remolacha, caña de azúcar, cereales... los cuales suelen destinarse a la elaboración de biocombustibles.

Otra clasificación de la biomasa es realizada en función de su contenido de humedad: si éste es alto se denomina biomasa húmeda (lodos de depuradora, purines, residuos aceitosos, etc.) mientras que si la humedad es reducida se denomina biomasa seca (leña, aserrín, etc.).

El principal beneficio medioambiental de la biomasa reside en que se considera una fuente neutra o muy reducida en emisiones de CO₂, aunque esto no tiene por qué ser así. En general, para lograr emisiones netas nulas debe emplearse biomasa renovable y sostenible, en cantidades a lo sumo iguales a la producción neta de biomasa del ecosistema que se explota, o lo que es lo mismo, el consumo de biomasa debe hacerse más lentamente que la capacidad de la Tierra para regenerarse. También conviene tener presente que durante su proceso de obtención son necesarias otras tareas que también constituyen fuentes de emisiones, como el empleo de maquinaria agrícola, y que aumentan las emisiones de GEI durante el ciclo de vida de la biomasa.

Otros beneficios del uso de la biomasa que vale la pena tener en cuenta son:

- Los gases de la combustión de biomasa suelen estar libres de óxidos de azufre y nitrógeno y de partículas sólidas, por lo que resultan mucho menos nocivos para la salud que los gases generados mediante la combustión de combustibles fósiles.
- En muchos casos la biomasa constituye una forma práctica de eliminar residuos, especialmente en el sector agroalimentario.

Pero como no podría ser de otra manera, la biomasa también posee importantes desventajas:

- Posee una densidad energética pequeña en comparación con los combustibles fósiles, por lo que se requieren mayores volúmenes de almacenamiento y el transporte resulta más costoso.
- Sus características pueden variar considerablemente en función del tiempo y el lugar. Por ejemplo, la humedad contenida en la biomasa vegetal depende generalmente de las condiciones climáticas.
- La humedad suele ser elevada, lo que puede causar problemas de condensaciones.

5.4.2 Sistemas de generación eléctrica mediante biomasa

La generación eléctrica mediante plantas de biomasa es una opción cada vez más popular, ya que es un sistema muy bajo en emisiones y muy competitivo económicamente, debido al bajo precio del combustible. Conviene recordar que, en aeropuertos, además de para la producción de electricidad, la biomasa puede ser usada para las siguientes funciones:

- **Climatización y ACS.-** Es la aplicación más común. La biomasa puede alimentar un sistema de climatización y ACS del mismo modo que si se realizara con gas, gasóleo o electricidad. Esta tarea es realizada principalmente mediante calderas de biomasa (ver Apartado 3.2.2.1.1.1) para calefacción.
- **Combustible para GSE.-** De forma indirecta mediante la transformación de ésta en biocombustibles como el bioetanol o el biodiésel (ver Apartados 6.2.3.1.1 y 6.2.3.1.2).

Para la generación eléctrica pueden emplearse biombras brutas (tal como se recogen en el campo), pretratadas por compactación, astillado o molienda, o a partir de biomasa transformada mediante procesos termoquímicos (syngas) o biológicos (biogás) para obtener un combustible de mayor poder calorífico.

El método más frecuente para potencias elevadas es mediante un ciclo de Rankine usando una caldera de biomasa, una turbina de vapor y un condensador. En este método, la energía térmica conseguida en la caldera de biomasa se emplea para la generación de vapor de agua, el cual acciona una turbina de vapor que a su vez va

unida a un generador. Posteriormente el vapor pasa a un condensador donde vuelve a estado líquido y el ciclo comienza de nuevo. En grandes edificios como los aeropuertos, este sistema suele además formar parte de un proceso de cogeneración o trigeneración, normalmente para potencias superiores al megavatio. Sin embargo, el uso de una caldera de vapor, como ya se ha dicho, solo es factible para la obtención de grandes potencias. En el caso de que la demanda energética no sea suficientemente elevada se necesitarán combustibles con mayor poder calorífico para su uso en otras máquinas, como turbinas de gas o motores de combustión. En este caso será necesario emplear alguna de las siguientes técnicas:

- **Incorporar un proceso de gasificación para la obtención de syngas.-** El proceso de gasificación es un proceso termoquímico en el que a partir de la biomasa se obtiene una mezcla de gases (CO, CO₂, H₂ y metano), que tratados adecuadamente permiten obtener syngas, combustible que puede ser empleado para mover una turbina de gas, más adecuada para un rango de potencias menor al de la turbina de vapor.
- **Incorporando un proceso de digestión anaeróbica para la obtención de biogás y biometano.-** La digestión anaeróbica es un proceso de descomposición microbiana en ausencia de oxígeno que a partir de la biomasa permite obtener biogás, un combustible de alto poder calorífico compuesto principalmente de metano. Posteriormente, mediante un proceso de depuración, puede obtenerse biometano, cuya combustión resulta más limpia (más parecida a la del gas natural) que la del biogás. Estos combustibles pueden ser empleado para calefacción, en motores de combustión, o para la generación eléctrica mediante turbinas de gas, de manera aislada o en sistemas de cogeneración.
- **Empleando otros combustibles derivados de la biomasa.-** También pueden usarse otros combustibles líquidos como aceites de pirólisis o biodiésel, en cuyo caso se podría usar un motor de combustión interna unido a un generador, lo que nos permitiría reducir el rango de potencias hasta varios kilovatios usando motores Stirling o motores de combustión interna.

6 REDUCCIÓN DE EMISIONES EN EQUIPOS DE ASISTENCIA EN TIERRA A LAS AERONAVES

6.1 Los Equipos de Asistencia en Tierra a las Aeronaves.

Los equipos de asistencia en tierra, a los que denominaremos por sus siglas en inglés GSE (Ground Support Equipment), son aquellos equipos usados en el aeropuerto para prestar servicio a las aeronaves que por él circulan y para realizar tareas de mantenimiento u otras tareas operacionales del día a día. Estos vehículos pueden ser propiedad del aeropuerto, en cuyo caso las emisiones generadas pertenecerían al Alcance 1, o pueden ser propiedad de aerolíneas u operadores de handling que operen en el aeropuerto, en cuyo caso estas emisiones pertenecerían al Alcance 3A, y por tanto la influencia sobre éstas del gestor aeroportuario estaría bastante limitada.

De entre todos ellos nos centraremos en aquellos que consumen energía de forma directa, es decir, obviaremos aquellos que consumen energía de forma indirecta solo al ser transportados. A continuación presentamos una primera clasificación de los GSE de este tipo que podemos encontrar en un aeropuerto genérico:

<p>Remolque de aeronaves.</p>	<p>Tractores remolcadores</p> 	<p>Utilizados para mover aeronaves entre distintos estacionamientos o desde un estacionamiento al inicio de la etapa de taxi.</p>
<p>Carga y descarga de pasajeros.</p>	<p>Escaleras/rampas autopropulsadas</p> 	<p>Utilizadas para el acceso/salida de pasajeros a/de la aeronave.</p>
	<p>Autobuses</p> 	<p>Pueden ser modelos normales o especiales para aeropuertos, en cuyo caso suelen ser más anchos y alargados, a veces disponen de cabinas de conductor en ambos extremos y, debido a que los trayectos suelen ser cortos, suelen tener pocos asientos para conseguir una mayor capacidad.</p>
<p>Carga y descarga de correos, mercancías y equipajes</p>	<p>Tractores para el movimiento de equipajes</p> 	<p>Usados para transportar maletas, mercancías o correo de la aeronave al área terminal o viceversa.</p>

	<p>Cargadores de pallets/containers</p> 	<p>Para el movimiento de los pallets o containers.</p>
	<p>Tractores/ transportadores de mercancías</p> 	<p>Usados para el arrastre de remolques para mercancías entre distintos puntos del aeropuerto.</p>
	<p>Cintas transportadoras autopropulsadas</p> 	<p>Para la carga y descarga de equipajes y mercancías.</p>
	<p>Montacargas</p> 	<p>Para el movimiento de mercancías y el apilamiento de éstas en los almacenes.</p>
<p>Carga de combustible</p>	<p>Camiones cisterna para el abastecimiento de aeronaves (refuelers)</p> 	<p>Disponen de un tanque para almacenar el combustible que es necesario aportar a la aeronave. Este aporte se realiza mediante sistemas de bombas, filtros, mangueras y otro equipamiento adicional.</p>
	<p>Camiones hidrantes</p> 	<p>En caso de que se disponga de sistema de suministro subterráneo su función es servir de conexión entre éste y la aeronave.</p>

Suministro de energía eléctrica, hidráulica, de aire acondicionado y encendido de motores.	Unidad de arranque neumático (ASU) 	Posee un motor por turbina de gas que suministra aire a alta presión a los motores de la aeronave para su puesta en funcionamiento.
	Grupo electrógeno (GPU) 	Suministra electricidad a la aeronave, normalmente 28 V de corriente continua y 100 V a 400 Hz de corriente alterna. Existen modelos autopropulsados y otros que necesitan de un vehículo remolcador.
	Unidad de aire acondicionado (ACU) 	Suministran aire acondicionado para ventilar las aeronaves estacionadas. Grandes sistemas eléctricos centralizados de aire acondicionado pueden sustituir a estas unidades.
Drenaje de lavabos, llenado de depósitos de agua, catering, mantenimiento, etc.	Camiones de catering 	Se ocupan de los servicios de catering, como el transporte de comida y bebida para su introducción o retirada de las aeronaves.
	Vehículos de servicio de cabina 	Empleados para la limpieza y mantenimiento de los servicios de cabina.
	Vehículos para el servicio de los lavabos de la aeronave 	Usados para la limpieza de lavabos y retirada de aguas fecales.

	<p>Camiones de agua potable</p> 	<p>Realizan el suministro de agua potable a la aeronave.</p>
	<p>Limpiadores de los hidrantes de combustible</p> 	<p>Utilizados en caso de existir sistemas de alimentación subterráneos.</p>
<p>Mantenimiento de rampas, pistas y otras áreas.</p>	<p>Vehículos de mantenimiento</p> 	<p>Para el mantenimiento de aeronaves, suelen transportar operarios y herramientas.</p>
	<p>Vehículos para el deshielo de las aeronaves</p> 	<p>Vehículos usados para transportar y aplicar líquidos descongelantes a las aeronaves.</p>
	<p>Plataformas o ascensores de mantenimiento</p> 	<p>Vehículos que disponen de una plataforma elevadora para tareas de mantenimiento y reparación.</p>
	<p>Vehículos de limpieza</p> 	<p>Usados para la eliminación de gomas, eliminación de FOD (Foreign Object Debris), recuperación/eliminación de combustible, etc. También pueden ser de utilidad realizando tareas de limpieza en el lado tierra.</p>

	<p>Máquinas quitanieves</p> 	<p>En aeropuertos estos vehículos pueden incorporar, además de la pala delantera típica de las máquinas quitanieves convencionales, un sistema de barrido e incluso un sistema adicional de soplado que permite mejorar las condiciones de la pista.</p>
	<p>Otros</p> 	<p>En muchos casos son camiones convencionales adaptados para el arrastre de maquinaria u otros vehículos, así como para funciones de mantenimiento varias, como cortacésped, etc.</p>

Tabla 11.- Tipos de GSE⁵⁴.

Por supuesto no todos los tipos de GSE anteriores se emplean en todos los aeropuertos, sino que factores como el tipo de aeropuerto, su actividad, los tipos de aviones que por él transitan, la localización geográfica, las infraestructuras existentes... etc., influirán no solo en el tipo, sino también en el número de GSE utilizados.

Los GSE autopropulsados pueden dividirse en dos grandes grupos, con importantes implicaciones desde el punto de vista regulatorio y de emisiones, estos son: “Maquinaria Móvil no de Carretera”, de los que no se espera que circulen por carreteras convencionales, y “Maquinaria Móvil de Carretera”, es decir, aquellos GSE a los que se les permite circular por carretera. A su vez, en cada uno de estos grupos se puede realizar otra importante distinción en función del tipo de motor utilizado, que puede ser de compresión, o de encendido por chispa.

- **Maquinaria Móvil no de Carretera**

Las emisiones de los motores usados por ésta clase de vehículos están regulados a nivel europeo por la Directiva 97/68/EC, la cual ha sido modificada por varias enmiendas, siendo la más reciente hasta la fecha la directiva 2012/46/EU. La definición aportada por dicha ley es: *cualquier máquina móvil, equipo industrial portátil o vehículo con o sin carrocería, no destinado al transporte de pasajeros o mercancías por carretera, en el que esté instalado un motor de combustión interna.*

Los requisitos en materia de emisiones que se aplican a estos vehículos, los cuales emplean diésel principalmente como combustible, son menos exigentes a los aplicados a los de tipo Maquinaria Móvil de Carretera, por lo que suelen ser más contaminantes.

- **Maquinaria Móvil de Carretera**

Muchos GSE pertenecen a esta categoría, y sus motores deben cumplir con la reglamentación aplicable. Sin embargo este grupo es amplio, y los GSE existentes se distribuyen entre varias categorías. Las principales normativas europeas al respecto se presentan en la siguiente tabla:

Vehículos ligeros	CO2	Reglamento 510/2011/CE
	Otros contaminantes	Reglamento 715/2007/CE
Vehículos pesados	Reglamento 595/2009	

Tabla 12.- Legislación aplicable a las emisiones de los GSE en España.

⁵⁴ Fuentes: TRB, www.aljon.com, www.fortbrand.com, www.gssonline.com, www.tld-group.com, www.forkliftmag.ru, www.aerospecialties.com.

6.2 Reducción de emisiones de los GSE

En este apartado se discutirán distintas acciones o medidas cuya implantación debe ser considerada si se pretende conseguir un bajo nivel de emisiones debidas a los GSE en un aeropuerto. Dividiremos estas prácticas en función de si se relacionan con el equipamiento en sí (adquisición, modificación o sustitución), con la operación y el mantenimiento del mismo, o con los combustibles empleados. En general será necesaria la implicación de todos los agentes implicados en las operaciones de GSE en el aeropuerto: operador aeroportuario, aerolíneas, proveedores de los GSE, etc., para que las medidas puedan implementarse de forma efectiva y eficiente.

6.2.1 Medidas relacionadas con el equipamiento

Estas medidas pueden estar basadas en la utilización de nuevos equipos e infraestructuras, el uso de dispositivos para el control de emisiones, o la renovación de los equipos que están siendo empleados.

- **Infraestructuras y equipos.**

Consiste básicamente en la sustitución de ciertos tipos de GSE por sistemas fijos que presten los mismos servicios. Los principales ejemplos son (Pehrson 2012):

- Instalación de sistemas centralizados de distribución y reparto de equipajes, con objeto de eliminar la necesidad de disponer de los GSE necesarios para estas funciones: tractores, cintas transportadoras... etc.
- Uso de sistemas de aire pre-acondicionado (PCAs) y suministro eléctrico fijos en sustitución de los sistemas de abordaje, los cuales necesitan la energía proporcionada por la APU para funcionar, el cual genera una elevada cantidad de GEI. Estas instalaciones pueden ser de tres tipos (Sikorski 2010):
 - **Centrales.-** Instalaciones incorporadas en las pasarelas de acceso a las aeronaves. Generalmente consisten en la instalación de una ACU y un sistema de abastecimiento eléctrico en cada pasarela, con los sistemas de distribución de aire y el cableado necesario. La electricidad usada suele proceder de la red local de la cual se abastece el aeropuerto, luego será necesario usar un convertidor de frecuencia para obtener los 400Hz empleados en los sistemas de abordaje.



Imagen 37.- Sistema central para electricidad y aire acondicionado⁵⁵.

- **Point-of-use.-** Mientras que el anterior es el preferido en Europa, este sistema es más empleado en América y Asia, y es el único posible en estacionamientos alejados de la terminal. Se basa en el empleo de pequeños tractores o camiones los cuales transportan las unidades ACU y GPU y su equipamiento adicional hasta las aeronaves. En caso de emplear este sistema es preferible la utilización de vehículos eléctricos o de baja

⁵⁵ Fuente: www.istinox.ch

emisión de GEI.

- **Sistemas subterráneos.-** Mediante una infraestructura construida bajo la plataforma el aire acondicionado y la electricidad necesaria es distribuida a todos los puntos de estacionamiento de aeronaves, además también puede emplearse para el abastecimiento de agua potable, recogida de aguas fecales, etc., lo que nos permite prescindir de los pesados vehículos normalmente usados para estos propósitos.
- Uso de sistemas de abastecimiento de combustible subterráneos en lugar del uso de camiones cisterna, lo que además repercutirá muy positivamente en la seguridad de las operaciones. En este caso será necesario el empleo de camiones hidrantes y limpiadores del sistemas de abastecimiento subterráneos, que aunque también consumen energía, en ningún caso es de esperar que este consumo supere al generado por los camiones cisterna.



Imagen 38.- Conexión a sistema de abastecimiento de combustible subterráneo con hidrante de combustible⁵⁶.

Es importante señalar que las instalaciones subterráneas a las que nos hemos referido, en general, forman una única instalación la cual proporciona todos los servicios comentados. A grandes rasgos, están formadas por una red de túneles que comunican la terminal con los distintos puntos de estacionamiento de las aeronaves, situadas en las plataformas adyacentes a ésta, y en los que se incorporan un conjunto de tuberías para aire acondicionado, servicio de aguas o abastecimiento de combustible, así como cables para el suministro eléctrico u otros servicios. Finalmente estas tuberías cuentan con puntos de acceso, a menudo equipos retráctiles como los mostrados en la Imagen 39, colocados en cada punto de estacionamiento de aeronaves.



Imagen 39.- Conexiones autoelevables de agua y aire acondicionado para un sistema subterráneo⁵⁶.

Como puede suponerse, estas instalaciones suponen una inversión considerable, siendo ésta más asumible si su diseño e implementación se realiza como parte de un diseño nuevo de terminal o una remodelación importante de ésta, más que como una reforma de una ya existente, en cuyo caso sería sensato suponer un aumento del coste, además de una merma en la capacidad operativa del aeropuerto durante el tiempo que duren las obras (Pehrson 2012).

• Dispositivos de control de emisiones.

Se trata de dispositivos que tratan los gases resultantes de la combustión del motor para eliminar sustancias nocivas para el medioambiente o disminuir su concentración. Estos dispositivos han sido usados ampliamente en vehículos de carretera convencionales, en los que son obligatorios por ley en Europa. Ejemplos de estos dispositivos son los siguientes (Pehrson 2012):

- **Catalizadores de la reacción de oxidación.-** Aumentan la eficiencia del proceso de oxidación de hidrocarburos y CO para la generación de CO₂ y agua.
- **Catalizadores de triple vía.-** Su función es la misma del caso anterior, pero además reducen los óxidos de nitrógeno (NO_x), separándolos en nitrógeno y oxígeno. Su implementación solo es aconsejable en motores de ignición por chispa.
- **Filtro de partículas.-** Usados en motores diésel con muy bajo contenido en sulfuros. Este dispositivo elimina las partículas de hollín de los gases de combustión convirtiéndolas en CO₂ (menos dañino para la atmósfera) y agua.

En general, los motores usados en los GSE del tipo “Maquinaria Móvil no de Carretera” no disponen de sistemas

⁵⁶ Fuente: <http://stkelectronics.com.my>

de retroalimentación para optimizar la relación combustible/aire de la combustión, por esta razón sólo los catalizadores para el proceso de oxidación son usados en estos equipos. Si estos motores son modificados introduciéndoles dichos sistemas de retroalimentación, los catalizadores de triple vía también podrían ser usados, aunque esto también puede traer consigo una reducción en la potencia obtenida del motor. Además, muchos de estos sistemas de retroalimentación requieren que los ciclos de trabajo no sean demasiado cortos, ya que ha de alcanzarse una temperatura mínima, lo cual no suele ser una condición favorable en estos vehículos.

- **Renovación de los modelos utilizados.**

La normativa relativa a las emisiones para Maquinaria no de Carretera es relativamente reciente y ha aumentado en exigencia rápidamente, por lo que modelos modernos pueden incorporar mejoras tecnológicas importantes, que se traducirán en emisiones significativamente menores a las de modelos más antiguos.

6.2.2 Medidas relacionadas con la operación y el mantenimiento de los GSE

Se basan en el seguimiento de una serie de “buenas prácticas” en cuanto al mantenimiento y utilización de los GSE (Pehrson 2012):

- **Disminución del tiempo funcionando a ralentí.-** La mayoría de los GSE suelen utilizarse durante cortos periodos de tiempo, permaneciendo entre tanto apagados o en ralentí. El empleo del ralentí es una práctica común, ya que resulta práctica para continuar la tarea de un modo más rápido una vez el motor es puesto a funcionar de nuevo. Sin embargo, cuando un motor se encuentra funcionando a ralentí sigue emitiendo sustancias contaminantes (si bien con menor intensidad), es por eso que un buen modo de disminuir el total de emisiones es limitar la cantidad de tiempo que un GSE puede estar trabajando en este régimen, lo que puede conseguirse tanto de un modo manual por parte del operario, como mediante el uso de dispositivos anti-ralentí automáticos.
- **Correcto Mantenimiento de los equipos.-** Será necesario un plan de mantenimiento que contemple un control sobre las emisiones de los GSE en el aeropuerto.
- **Optimización de los planes de utilización.-** Consiste en la optimización del uso de los vehículos mediante una mejor planificación de las tareas a realizar (lo que nos permitiría reducir el número de vehículos necesarios al mínimo).
- **Conducción eficiente.-** Conviene proporcionar instrucción a los operarios sobre conducción eficiente y operación de los vehículos GSE, lo que además de una disminución en las emisiones supone un ahorro de combustible y una disminución del riesgo de accidentes.

6.2.3 Medidas relativas al combustible

6.2.3.1 Uso de combustibles alternativos y motores eléctricos

En este apartado estudiaremos el empleo en motores de combustibles alternativos menos contaminantes a los combustibles derivados del petróleo comúnmente empleados (principalmente la gasolina y el diésel). Explicaremos solo muy brevemente algunos de estos combustibles cuya implantación en GSE es poco factible y haremos mención especial a los motores alimentados con batería eléctrica.

6.2.3.1.1 Bioetanol

El bioetanol es alcohol etílico obtenido a partir de la fermentación de semillas ricas en azúcares y la posterior purificación del etanol fermentado. Puede usarse como combustible para automóviles sólo o mezclado con gasolina (gasohol), y es empleado cada vez con más frecuencia como añadido para oxigenar la gasolina normal, reemplazando al éter metil tert-butílico, muy contaminante para el suelo y las aguas subterráneas. El etanol usado como combustible es obtenido de la biomasa procedente de cultivos como el maíz, el trigo, la remolacha o la caña de azúcar, por lo que también se denomina bioetanol. Los principales productores a nivel mundial son Brasil y EEUU.

Su empleo mezclado en pequeñas proporciones con gasolina está muy extendido actualmente, de hecho la gasolina convencional suele contener siempre un cierto porcentaje de bioetanol, siendo éste de hasta un 10% en EEUU o hasta un 20% en Brasil. Se usa una notación abreviada para indicar el porcentaje de volumen de bioetanol en la mezcla, que abarca generalmente hasta la máxima concentración empleada, el E85 (85% de etanol y 15% de gasolina). Normalmente porcentajes de hasta un 15% pueden ser usados sin modificación del

motor pero para mezclas mayores se necesitarán vehículos adaptados, llamados vehículos Flexi-Fuel. Las principales características del bioetanol son:

- **Disminución de emisiones.-** Durante su ciclo de vida el bioetanol proporciona un ahorro de emisiones frente a la gasolina que depende fuertemente de la fuente de obtención de este carburante. De esta forma puede llegar a generar emisiones similares a las de la gasolina, o por el contrario reducirlas en valores cercanos al 90% (IDAE 2008).
- **Precio.-** Aunque la diferencia con el precio de la gasolina fluctúa considerablemente y varía dependiendo del lugar geográfico, en muchos lugares, como en EEUU o Europa, el bioetanol mantiene un precio muy competitivo con el de la gasolina, y se espera que siga disminuyendo. Conviene matizar que en el precio no solo debe considerarse el precio por litro de combustible, sino que también debe considerarse que el kilómetro por litro realizado con esta mezcla disminuye al aumentar el porcentaje de bioetanol, siendo para el E85 de entre un 15 y un 25% menor al de la gasolina (West, y otros 2007).
- **Eficiencia energética.-** Se trata de un combustible con buena eficiencia energética, ya que su balance energético es aproximadamente 1,25, lo que significa que es necesario suministrar una cantidad de energía para la obtención de bioetanol menor a la obtenida posteriormente como resultado de su combustión (Pehrson 2012).
- **Problemática.-** Actualmente existe un importante debate que afecta al modo en el que se obtiene la biomasa de la que se genera el bioetanol (cultivos dedicados de maíz, trigo, remolacha o caña de azúcar). Voces críticas opinan que la producción de bioetanol a gran escala provocará deforestación, ya que será necesario talar amplias zonas forestales para crear nuevos campos de cultivo, y a su vez provocará el aumento de los precios de los alimentos al usar terrenos agrícolas para la producción del combustible. Sin embargo, otros argumentan que mediante el cultivo de zonas en desuso se frenará la erosión y la desertificación de estas áreas (Pehrson 2012).
- **Expectativas de futuro.-** La producción de bioetanol ha aumentado considerablemente en los últimos años a nivel global, junto al desarrollo de la tecnología necesaria para su uso como combustible en automóviles. En Europa, aunque con retraso, están teniendo lugar fuertes inversiones en el desarrollo del bioetanol como sustituto a los combustibles fósiles. Sin embargo, actualmente, se vive un momento de incertidumbre, ya que la producción en EEUU pasa por malos momentos debido a las últimas sequías y los altos precios del maíz. En Europa se espera un crecimiento limitado, con la polémica ya comentada que rodea a este combustible como principal obstáculo para su desarrollo. Como dato ilustrativo comentar que la Directiva 2009/28/EC fijó un objetivo para 2020 de un 10% de la energía consumida procedente de fuentes renovables (biocombustibles, hidrógeno y electricidad) para el transporte en la UE, del cual, un 8'5% del mismo debía ser conseguido con la expansión de los biocombustibles, no obstante, en 2012 la Comisión realizó una propuesta para limitar este porcentaje hasta un 5%.
- **Otras características (Pehrson 2012):**
 - Posee un alto octanaje, lo que aumenta la potencia y el rendimiento. Además ayuda a evitar el picado de bielas y permite una relación de compresión mayor.
 - Posee menor eficiencia energética que la gasolina. Un litro de E85 posee aproximadamente un 30% menos contenido energético que un litro de gasolina.
 - Un combustible rico en etanol debe ser cambiado con mayor frecuencia debido al carácter higroscópico (capacidad para absorber agua) de éste.

6.2.3.1.2 Biodiésel

El biodiésel es una mezcla de ésteres metílicos de diferentes ácidos grasos, que se obtiene mediante la esterificación del aceite extraído de semillas oleaginosas (palma de aceite, colza, soja, girasoles, etc.), o a partir de aceites usados. Se suele mezclar con gasóleo, por lo que presenta una notación abreviada según el porcentaje de volumen en la mezcla: B5 para un 5% de biodiésel o B100 si sólo se usa biodiésel. En general presenta características parecidas a las comentadas anteriormente para el bioetanol, aunque a diferencia de éste, la mayoría de los motores diésel modernos admiten la utilización de biodiésel en cualquier concentración, por lo que es posible cambiar de un combustible a otro sin realizar ninguna modificación significativa al motor.

Otras características importantes del biodiésel son:

- **Uso poco eficiente de las tierras.-** Se necesitan grandes superficies para la producción de biodiésel,

mayores a las necesarias para la producción de bioetanol, por lo que la problemática ya comentada para el bioetanol se repiten en este caso con mayor intensidad.

- **Emisiones.-** El uso de biodiésel en un motor diésel reduce considerablemente las emisiones en la combustión de hidrocarburos, CO, sulfuros, hidrocarburos aromáticos y partículas. Aunque la cantidad de NO_x emitido en la combustión puede aumentar, la tecnología de reducción catalítica selectiva puede evitar que esto ocurra reduciendo los niveles de NO_x hasta hacerlos prácticamente nulos. Los estudios realizados sobre todo el ciclo de vida del combustible (producción, almacenamiento, distribución y consumo) estiman una reducción de las emisiones respecto a las del diésel convencional de más de un 75% para el B-100 y de un 15% para el B-20 (DOE 2015).
- **Precio.-** El precio del biodiésel es parecido al del bioetanol, aunque existen importantes diferencias en función del lugar geográfico y ambos fluctúan considerablemente con el tiempo. Se estima que el objetivo de competir con los precios de los combustibles fósiles se encuentra más distante para el biodiésel, puesto que la tecnología desarrollada hasta el momento resulta muy compleja y la reducción de costes se ve muy lejana. Sin embargo, la facilidad para el uso del biodiésel en motores diésel convencionales supone una importante ventaja que habrá que tener en cuenta.
- **Otras (Pehrson 2012):**
 - Debido a su no-toxicidad es menos peligroso para el medioambiente en caso de fugas o derrames. Además, debido a su menor combustibilidad resulta más seguro de almacenar, manejar y transportar.
 - Mejora la lubricidad del combustible y aumenta el índice de cetano.
 - Cabe la posibilidad de que altas concentraciones de biodiésel provoquen problemas de corrosión, ya que pueden actuar como disolventes sobre algunas partes del motor. Esta posibilidad exigirá especial atención en las tareas de mantenimiento.

6.2.3.1.3 Gas Natural Comprimido (CNG) y Gas Natural Licuado (LNG)

El gas natural está compuesto básicamente de metano, el cual es extraído de depósitos de gas, petróleo o carbón, aunque también puede obtenerse de vertederos o plantas de tratamiento de aguas residuales, en cuyo caso se denomina biogás. El CNG es gas natural comprimido a una presión de entre 20-25 MPa y puede ser empleado como combustible en sustitución de la gasolina y el diésel, obteniendo así una reducción en las emisiones de GEI, además es más barato y su precio suele ser más estable que el del petróleo. Sus principales problemas a día de hoy son el alto coste que presentan los tanques de combustible (aunque se prevé que éste disminuya conforme avanza la tecnología) y el considerable volumen de éstos, lo cual es consecuencia de la baja densidad energética del combustible (un 25% de la de la gasolina). Sin embargo, el menor precio del gas natural comprimido lo hace económicamente viable en vehículos que suelen acumular una alta carga de trabajo y que puedan permitirse el aumento de volumen del depósito, como puede ser el caso de los autobuses.

Una variante de este combustible muy prometedora es el LNG o Gas Natural Licuado, el cual se encuentra aún en proceso de prueba, especialmente camiones y maquinaria pesada. Este combustible al estar en estado líquido no presenta los problemas de almacenamiento del CNG, ya que es 2,4 veces más denso energéticamente que éste.

6.2.3.1.4 Propano o LPG (Liquified Petroleum Gas)

Cuando se emplea en vehículos también es llamado autogás. Se trata de una mezcla de butano y propano, los cuales son obtenidos en el refinado del petróleo o del gas natural húmedo (con mayor porcentaje de hidrocarburos pesados). Cuenta con una tecnología bastante desarrollada, pudiendo incorporarse tanto en motores de gasolina como en motores diésel si se realizan algunas modificaciones. Sus características son parecidas a las ya comentadas para el CNG: más barato que diésel y gasolina, energéticamente menos denso (ocupa más volumen para la misma cantidad de energía almacenada), menos emisiones...

6.2.3.1.5 Hidrógeno

El uso de hidrógeno como combustible es una alternativa prometedora a largo plazo, ya que su empleo en el motor genera solo vapor de agua y NO_x (si es quemado en un motor de combustión interna). No obstante su aplicación práctica está muy limitada actualmente debido a obstáculos importantes que una tecnología, relativamente nueva, aún no ha podido salvar: dificultades para su transporte, poca vida útil, baja densidad energética (es tres veces menos denso energéticamente que la gasolina), etc. Además, este sistema aún resulta

muy caro y sus ventajas medioambientales son engañosas, ya que para generar el hidrógeno es necesaria una importante cantidad de energía eléctrica, por lo que solo podremos hablar de una reducción de emisiones global si dicha energía es producida de forma limpia, de lo contrario podría ser una alternativa incluso más contaminante que los motores de combustión interna.

La energía química del hidrógeno puede ser liberada bien mediante un proceso de combustión, o bien mediante una conversión electroquímica para generar electricidad, es por ello que los vehículos que emplean el hidrógeno de esta forma suelen incluirse dentro de los vehículos eléctricos.

6.2.3.1.6 Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos, en su concepción más amplia, son aquellos que hacen uso de un motor eléctrico para conseguir el par motor necesario para su desplazamiento. Existen diversos tipos, clasificados en función de la forma en la que obtienen electricidad, a saber: directamente a través de la red (PEVs), mediante un motor de combustión interna (HEVs) o usando una celda de combustible (FCEVs), como por ejemplo hidrógeno, de la que se obtiene la electricidad por procesos electroquímicos. Aunque existen más tipos para nosotros serán de interés solo los ya mencionados.

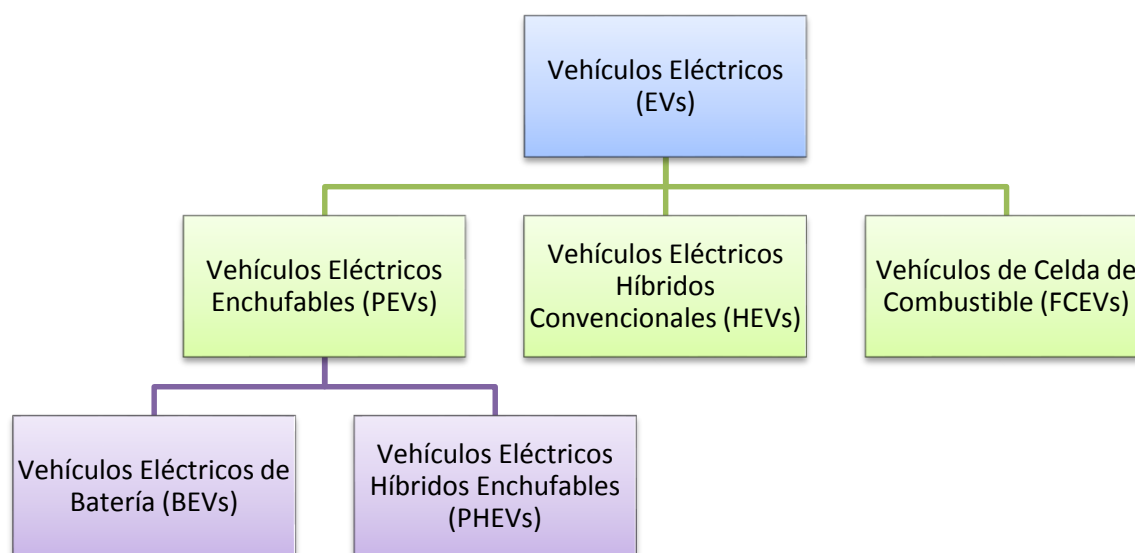


Imagen 40.- Esquema de tipos de vehículos eléctricos.

- **Vehículos Eléctricos Enchufables (PEVs).**- Su funcionamiento es simple: utilizan un motor eléctrico para proporcionar el par necesario y la energía eléctrica requerida para accionar este motor es almacenada en baterías, que se cargan enchufando directamente el vehículo a la red eléctrica. Además, suelen disponer de frenos regenerativos que recuperan parte de la energía cinética perdida en el frenado. Comprenden la mayor parte de los modelos eléctricos disponibles hoy día para las actividades aeroportuarias. Estos a su vez pueden adoptar la siguiente clasificación:
 - **Vehículos Eléctricos de Batería (BEVs).**- Las baterías se recargan directamente de la red eléctrica.
 - **Vehículos Híbridos Enchufables (PHEVs).**- Las baterías pueden ser recargadas, además, mediante un motor de combustión interna de gasolina, aunque es el motor eléctrico el que suministra el empuje necesario, por lo que también son llamados híbridos en serie.
- **Vehículos Eléctricos Híbridos Convencionales (HEVs).**- En estos vehículos tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico proporcionan la tracción, por lo que también son llamados híbridos en paralelo. La principal ventaja de estos modelos es un considerable aumento de la autonomía, lo que los hace útiles en grandes distancias, además, al no necesitar ser recargados mediante conexión a la red eléctrica, se evita el problema de los largos tiempos de repostaje que este proceso conlleva, y la necesidad, en casos como los de los GSE, de disponer de estaciones de carga propias. Como

contrapartida, al disponer de dos sistemas de propulsión con distinta tecnología, el mantenimiento se complica y se hace más caro. También existen modelos intermedios entre los PHEVs y los HEVs llamados vehículos híbridos en serie-paralelo que combinan las características de ambos modelos.

- **Vehículos de Celda de Combustible (FCEVs).**- Utilizan una célula de combustible para alimentar al motor eléctrico. Dicho combustible es generalmente hidrógeno en forma de gas, por lo que este caso ha sido ya explicado (ver Apartado 6.2.3.1.5).

Se hace evidente que para la actividad aeroportuaria, donde la autonomía no es un requisito prioritario, la opción más recomendable dentro de los vehículos eléctricos es siempre la utilización de BEVs (o vehículos 100% eléctricos), ya que para los requisitos de esta actividad serán generalmente más baratos y contaminarán menos. De hecho, después de aquellos propulsados por diésel y gasolina, los GSE 100% eléctricos son los más utilizados, en un porcentaje cada vez mayor conforme disminuyen los precios, aumentan el número de modelos eléctricos disponibles en el mercado, y se potencian las políticas medioambientales en aeropuertos. A continuación analizaremos más en profundidad las ventajas e inconvenientes que implica la utilización de este tipo de vehículos para la actividad aeroportuaria respecto a los vehículos convencionales de combustión interna:

6.2.3.1.6.1 Ventajas BEVs

- Las emisiones provocadas por la generación de la energía eléctrica con la que funcionan dependen del modo en que ésta se haya generado. Para ilustrar lo anterior se ha confeccionado la siguiente gráfica donde se comparan los GEI emitidos, expresados en gCO₂e/km por kilómetro recorrido y litro de diésel equivalente, para algunos países importantes:

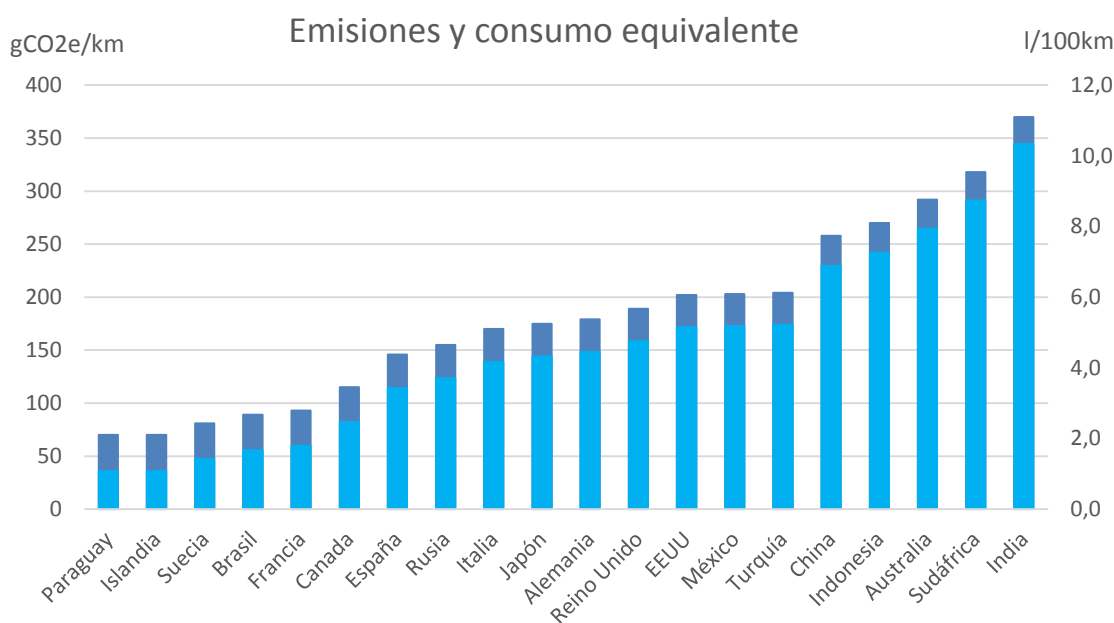


Gráfico 10.- Emisiones y consumo equivalente por países⁵⁷.

Como se desprende de los resultados anteriores, en los países donde existe mayor contribución del carbón o el petróleo, las emisiones derivadas de los coches eléctricos equivalen a las emitidas por los motores diésel actuales más contaminantes, mientras que en aquellos con la electricidad más limpia, el nivel de estas emisiones es varias veces menor al asociado a los motores de combustión interna menos contaminantes. Queda así evidenciada la importancia de la forma en que se obtiene la electricidad utilizada, también llamado mix energético, en la cantidad de GEI emitidos.

En particular, usando el coche eléctrico con el mix energético actual en España, las emisiones del automóvil eléctrico equivaldrían a las de un coche de motor de combustión medio que consumiese aproximadamente 3,4 L a los 100 km, por lo que, en lo que a la disminución de GEI se refiere, los

⁵⁷ Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de (Wilson 2013). Se incluyen las emisiones por fabricación del vehículo (70 gCO₂e/km para coche eléctrico y 35 gCO₂e/km para equivalente diésel) y las emisiones de la red tanto directas como indirectas de 211 Wh/km y 3,24 kgCO₂e/l. para el diésel. Datos de emisiones por países del año 2009.

niveles de emisiones son similares a los conseguidos empleando vehículos híbridos modernos.

En los aeropuertos, un beneficio significativo puede ser conseguido usando vehículos eléctricos alimentados con energía eléctrica generada en el propio aeropuerto a través de fuentes renovables, caso en el que se obtendrían emisiones nulas de GEI.

- Poseen una alta eficiencia energética, ya que un coche eléctrico puede aprovechar hasta un 70% de la energía almacenada en las baterías, mientras que un motor de combustión interna de gasolina solo puede convertir en torno a un 20%.
- Disminución considerable del gasto por distancia conducida. Dicho gasto varía en función de la diferencia de precio entre la electricidad y el precio del petróleo, aunque en general es varias veces inferior para el caso de un coche eléctrico frente a uno diésel o gasolina.
- El precio de la electricidad está menos expuesto a fluctuaciones importantes que el precio de los combustibles sólidos.
- Disminución del gasto de mantenimiento de hasta alrededor de un tercio respecto a vehículos con motores de combustión interna (Sunderland 2012).
- Mayores prestaciones en aceleración, y maniobrabilidad, además de una disminución considerable del ruido emitido.

6.2.3.1.6.2 *Inconvenientes*

- El precio de adquisición de los vehículos, aun teniendo en cuenta los incentivos estatales existentes en muchos países, es considerablemente mayor, lo que se debe principalmente al alto precio de las baterías. Sin embargo el tiempo de amortización de la inversión (por el ahorro en el gasto de utilización) suele ser pequeño, y un rápido avance tecnológico está permitiendo un continuo descenso de los precios.
- El precio de las estaciones de carga también es elevado.
- Pueden presentar problemas para remolcar grandes cargas en largas distancias o en terrenos inclinados.
- Menor autonomía.

6.2.3.2 **Comparación de costes**

6.2.3.2.1.1 *Costes de adquisición del combustible*

La cotización del petróleo, valor representado en los mercados mediante el precio del barril de Brent, ha tenido una tendencia claramente ascendente durante las últimas décadas, si bien ha estado sometido a fluctuaciones importantes. Los precios de los combustibles derivados del petróleo (o formados en parte por ellos) son, por supuesto, muy dependientes del precio de éste, y presentan fluctuaciones similares cuando el mercado está liberalizado. En general, contra menos dependiente sea un combustible del petróleo, más estable será su precio, pero hay que tener en cuenta que, en mayor o menor medida, las variaciones en el precio del petróleo siempre afectan al resto de combustibles, sean o no derivados del mismo. Las siguientes gráficas ilustran lo anterior:

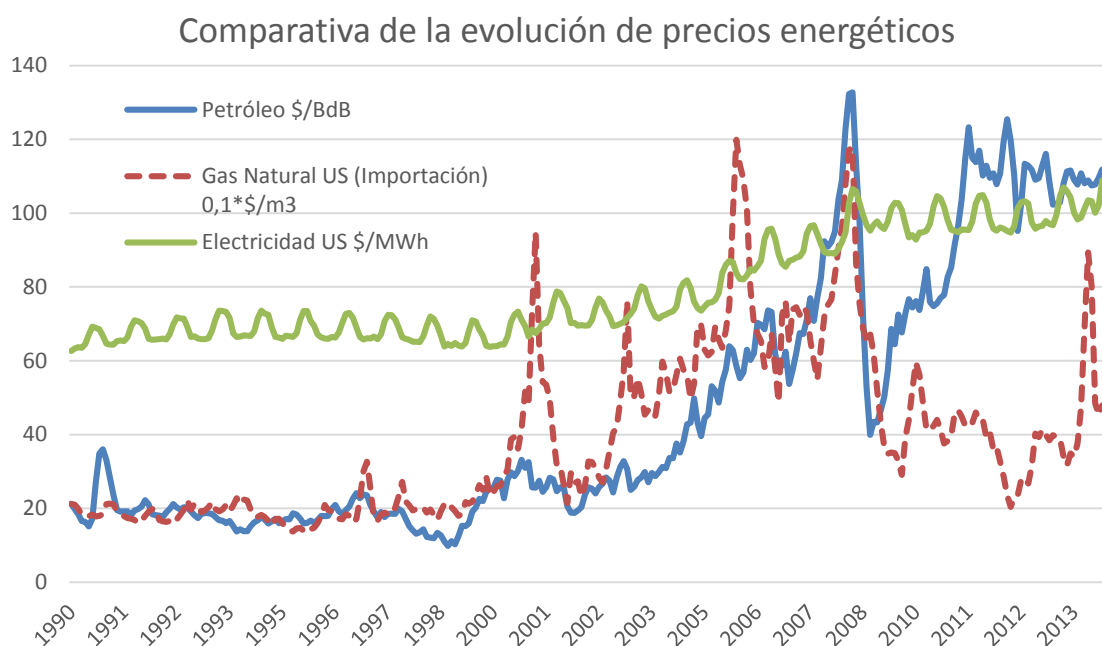


Gráfico 11.- Comparativa de la evolución de precios energéticos⁵⁸.

Vemos como tanto el precio del barril de Brent como el precio del gas natural se encuentran sometidos a fluctuaciones importantes, sin embargo la tendencia al alza del petróleo es superior a la del gas. Por otro lado, el precio de la electricidad es notablemente más estable y sus variaciones anuales son aproximadamente constantes, sin embargo, su media anual presenta un ligero aumento desde inicios de la década pasada, presumiblemente relacionado con el alza en los precios del barril de Brent y el gas natural, al ser éstos combustibles de gran importancia para la generación eléctrica.

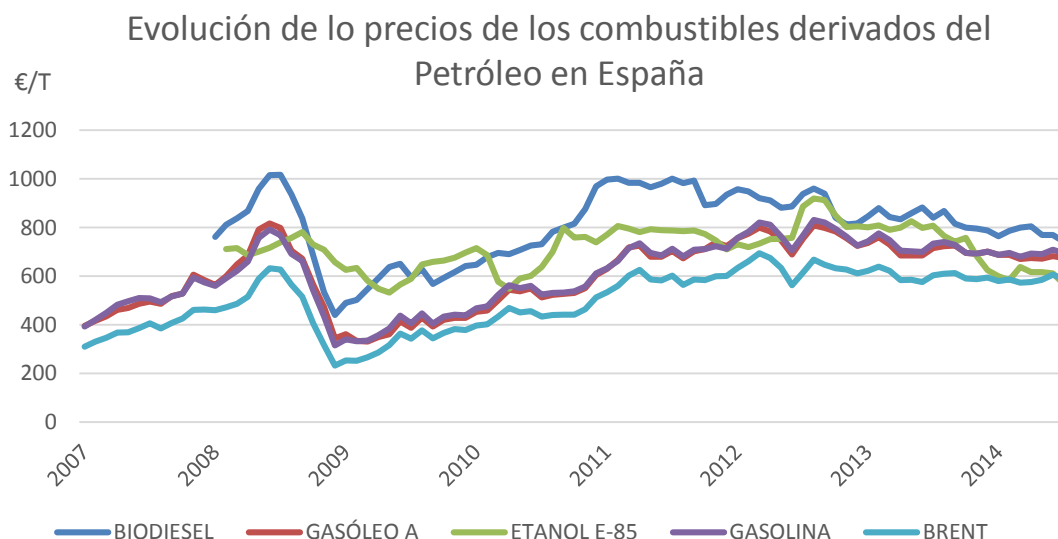


Gráfico 12.- Evolución de los precios de los combustibles derivados del petróleo⁵⁹.

En la tabla anterior se ve con claridad la estrecha relación entre el precio del petróleo y el precio de los combustibles derivados del mismo, vemos como esta relación pierde intensidad para el biodiésel y es aún más difusa en el caso del bioetanol.

⁵⁸ Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Thompson Reuters y EIA.

⁵⁹ Fuente: Elaboración propia a a partir de datos del CNMC.

Precio final de los combustibles

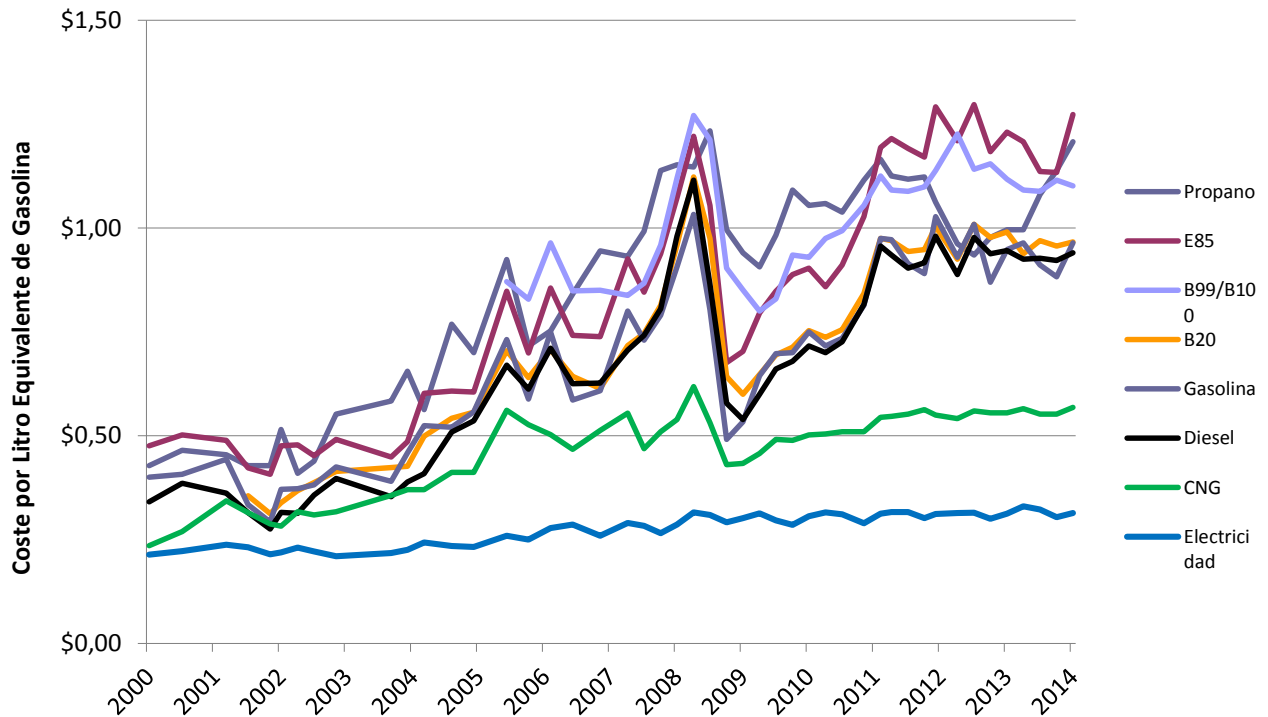


Gráfico 13.- Comparativa para los precios finales de distintos combustibles de vehículos en EEUU⁶⁰.

En la gráfica anterior, se ha representado la evolución del precio de los combustibles en EEUU por Litro Equivalente de Gasolina, esto es, la cantidad de cada combustible que posee una energía equivalente a la contenida en un litro de gasolina. Comprobamos como la opción más barata es, con diferencia, la electricidad, seguida por el CNG. Con un precio de aproximadamente el doble le siguen diésel y gasolina, cuyos precios se han mantenido relativamente parejos (lo mismo ocurría en el caso de España en la gráfica anterior), seguidos del biodiésel y el bioetanol en sus distintas composiciones.

La evolución del precio de los combustibles en un futuro es muy difícil de estimar, lo que es debido principalmente a la incertidumbre existente en cuanto a la evolución del precio del petróleo y el desarrollo de las nuevas tecnologías. Las previsiones, hasta hace muy poco, han sido partidarias de un aumento indefinido de dicho precio más o menos acentuado, sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías de extracción, como el fracking, hace prever ahora un descenso del precio del petróleo en los próximos años (Conerly 2014). Como principales fuentes de incertidumbre, además de las novedades tecnológicas, se añaden otros importantes factores como la inestabilidad política en Oriente Medio o las acciones internacionales que previsiblemente puedan tomarse contra el cambio climático. Todo ello hace muy difícil realizar previsiones precisas siquiera a corto-medio plazo.

6.2.3.2.1.2 Otros costes

Aquellos costes que implica el uso de un determinado combustible, más allá del correspondiente simplemente a su adquisición. Distinguiamos los siguientes (Pehrson 2012):

- **Mano de obra.-** El coste por mano de obra es con diferencia el más abultado de todos aquellos que conlleva la utilización de GSE, es por ello necesario estudiar la influencia de los combustibles utilizados en los costes de mano de obra. Por ejemplo, usar combustibles que mejoren la fiabilidad y el rendimiento de los vehículos puede permitir una reducción de la flota, lo que puede llevar asociado una reducción de la mano de obra.

⁶⁰ Fuente: DOE. Dada la distinta eficiencia del motor de electricidad, el cual es unas 3,4 veces más eficiente que un motor de combustión interna, el precio de la electricidad ha sido dividido por dicho factor.

- **Mantenimiento.-** Incluye tanto los costes de mano de obra de los operarios encargados de las tareas de mantenimiento como los costes de materiales, herramientas o recambio de piezas. En general, los motores de gasolina o diésel suelen presentar elevados costes de mantenimiento durante su vida útil. En caso de utilizar biocombustibles el mantenimiento sería muy similar, pero habría que prestar atención a problemas adicionales que podrían aparecer, como son: la degradación de gomas o el crecimiento de microorganismos o algas en el tanque de combustible, que pueden generar problemas en los filtros, su corrosión e incluso el fallo del motor. Además, se debe controlar que la presencia de agua en el motor no sea muy elevada, y en climas fríos un tratamiento específico de los combustibles para evitar su gelificación puede ser necesario.

En cuanto al CNG, destaca la ventaja de que no es necesario cambiar el combustible con tanta frecuencia como en los depósitos de diésel o gasolina, debido a la limpieza en la combustión del gas, por su parte, el LPG, proporciona una vida útil de unas dos veces la de un motor convencional de gasolina y costes de entre un 5% y un 30% menores.

Pese a todo, el combustible que actualmente presenta mejores prestaciones en cuanto a mantenimiento es la electricidad. Suponiendo iguales costes por hora de mantenimiento para un GSE eléctrico y uno convencional de diésel o gasolina, aquel puede realizar entre un 65% y un 70% más de trabajo con el mismo mantenimiento.

- **Infraestructuras.-** Nuevas infraestructuras pueden ser necesarias si comenzamos a usar combustibles alternativos. Además de los costes directos, será necesario tener en cuenta el terreno necesario para su construcción. Infraestructuras típicas suelen ser estaciones de carga para vehículos eléctricos, CNG o LPG, además de tanques de combustible para CNG, LPG o biocombustibles. En general las estaciones de carga de CNG y LPG suelen ser las infraestructuras de este tipo más caras, y aunque las estaciones para carga de vehículos eléctricos también pueden ser bastante costosas, su instalación no siempre será necesaria, pudiendo aprovecharse otras facilidades del aeropuerto para la carga de vehículos o incluso pudiéndose cargar aquellos que lo permitan a través de la red eléctrica a 120 V (el tiempo de carga será elevado en este caso).

6.2.3.3 Comparativa de emisiones

A continuación mostramos unas tablas comparativas de las emisiones derivadas del uso de cada combustible:

Evaluación de las emisiones de GEI de vehículos pesados (California, LCFS)					
Fuel	gCO ₂ eq/MJ	% Reducción	Fuel	gCO ₂ eq/MJ	% Reducción
Diésel (bajo contenido en azufre)	95	0,0%	Hidrógeno (NG)	75	21,0%
LNG	92	2,5%	Electricidad	46	51,5%
Biodiésel (Soja)	83	12,1%	Biodiésel (Sebo)	39	58,5%
Diésel Renovable (Soja)	82	13,3%	Biodiésel (Grasas)	16	83,3%
CNG	75	20,6%	CNG (vertederos)	13	86,8%

Tabla 13.- Evaluación de las emisiones de GEI de vehículos pesados⁶¹.

⁶¹ Fuente: DOE.

Evaluación de las emisiones de GEI de vehículos ligeros (California, LCFS)					
Fuel	gCO₂eq/MJ	% Reducción	Fuel	gCO₂eq/MJ	% Reducción
Gasolina (California)	95,9	0,0%	Hidrógeno (NG)	61,8	35,5%
Bioetanol (Maíz)	95,7	0,2%	Electric (Calif. Mix)	41,4	56,8%
Bioetanol (Caña de azúcar)	73,4	23,4%	Bioetanol (Madera)	21,4	77,7%
CNG	67,7	29,4%	CNG (Vertederos)	11,3	88,3%

Tabla 14.- Evaluación de las emisiones de GEI de vehículos ligeros⁶².

Donde la magnitud gCO₂eq/MJ tiene en cuenta las distintas eficiencias de las diferentes plantas motoras que utiliza cada combustible, por lo que para un mismo peso del vehículo y velocidad sería equivalente a gCO₂eq/distancia. Para el cálculo de las emisiones se ha tenido en cuenta el ciclo de vida del combustible, es decir, desde aquellas emisiones indirectas ocasionadas por la producción, almacenamiento o distribución del mismo, hasta las emisiones originadas en su consumo en el vehículo. Ya que los resultados están obtenidos a partir de un estudio regional, éstos solo pueden tener un valor orientativo, lo que es especialmente relevante en el caso de la electricidad, por las razones ya comentadas anteriormente.

Teniendo todo esto en cuenta vemos que, los combustibles que generan menores emisiones de GEI en la actualidad son: el CNG, más concretamente aquel obtenido de vertederos (biogás), el biodiésel obtenido de grasas o el etanol obtenido de madera, y la electricidad.

6.2.3.4 Algunas consideraciones económicas

Estudios realizados (Morrow, Hochard y Francfort 2007) para analizar los beneficios económicos derivados del uso de vehículos eléctricos indican como factores determinantes de su rentabilidad el número de horas de utilización de los vehículos y las fluctuaciones del precio del petróleo. En el caso de vehículos que presentan típicamente muchas horas de uso, como tractores o cintas transportadoras de equipajes autopropulsadas se ha determinado que el empleo de modelos eléctricos resulta rentable, por el contrario, es bastante menor para el caso de vehículos remolcadores, por necesitarse una fuerte inversión inicial, y por tener muchas menos horas de uso. Aun así, en caso de existir ayudas estatales su rentabilidad podría aumentar hasta niveles que harían recomendable su uso.

⁶² Fuente: DOE.

7 REDUCCIÓN DE EMISIONES EN LOS ACCESOS AL AEROPUERTO

Las emisiones generadas en los sistemas de acceso al aeropuerto constituyen la segunda fuente de emisiones más importante en un aeropuerto tras las emisiones generadas por las aeronaves. Por ejemplo, en el aeropuerto de London Gatwick éstas comprendieron más del 38% del total de emisiones en el año 2008, mientras que las emisiones debidas a las aeronaves constituyeron el 56% (BAA London Gatwick Airport 2009). Sin embargo, como ya hemos comentado, estas emisiones pertenecen al Alcance 3B, por lo que el gestor aeroportuario no posee control directo sobre las mismas, necesitando muchas de ellas la implicación de terceros, como concesionarios del aeropuerto o gestores de transporte público o carreteras.

Las emisiones en los sistemas de acceso al aeropuerto son originadas principalmente por los desplazamientos de pasajeros y sus acompañantes y por los empleados del aeropuerto. Para ambos grupos, el principal medio de disminución de emisiones es el aumento del número de desplazamientos realizados en transporte público, en detrimento de aquellos realizados en coche particular, el cual constituye el modo de transporte mayoritario en la mayoría de aeropuertos comerciales alrededor del mundo (Kazda y Caves 2008). En particular se estima que, en grandes aeropuertos, el porcentaje de desplazamientos realizados en coche particular ronda el 65%, mientras que para pequeños aeropuertos este porcentaje puede llegar a alcanzar el 99% (Reynolds-Feighana y Button 1999). Esto es debido, entre otras razones, a que los grandes aeropuertos se encuentran a menudo situados cerca de grandes ciudades, y poseen mayor número de pasajeros, lo que ayuda a rentabilizar la construcción de instalaciones de servicios públicos como el tren o el metro. Por otro lado, en el caso de los aeropuertos pequeños, estos pueden estar situados en lugares alejados de ciudades grandes, y no poseer un número de pasajeros suficiente que pueda justificar grandes inversiones en infraestructuras. En estos casos, conseguir un aumento significativo en el uso del transporte público puede ser extremadamente complicado (Tucker y Smith 2007).

Aunque desde un punto de vista medioambiental la opción del transporte público frente al coche particular sea en general la preferida, desde un punto de vista económico puede suponer un perjuicio para el aeropuerto, ya que éste posee un importante interés en maximizar los ingresos del parking, el cual constituye, en muchos casos, la principal fuente de ingresos no-aeronáuticos en aeropuertos (Jacobs Consultancy, Walker Parking Consultants, & Mannix Group and DMR Consulting 2010). Esto hace que nos encontremos con intereses enfrentados, que aumentarán considerablemente la complejidad del problema.

Ambos grupos, sin embargo, presentan características notoriamente distintas, y diferentes medidas podrán ser tomadas para reducir las emisiones de GEI en los accesos del aeropuerto generadas por cada grupo.

7.1 Emisiones ocasionadas por los pasajeros

Las emisiones generadas por pasajeros y acompañantes en sus viajes hacia o desde el aeropuerto dependen principalmente de las distancias realizadas en estos desplazamientos y los medios de transporte empleados y sus características. Los más comunes son los siguientes:

- **Viajes de dejada/recogida de pasajeros (*Kiss-and-fly*).**- En ellos el conductor del vehículo no es un pasajero, y se supone que el vehículo realiza el mismo recorrido 2 veces, por lo que constituye la forma de desplazamiento más contaminante de entre las posibles. Un estudio reciente ha estimado un valor para las emisiones medias de estos viajes por pasajero-kilómetro recorrido de 229 gCO₂/pkm, mientras que, en el caso de que el coche sea estacionado en el parking hasta la vuelta de los pasajeros, las emisiones se han estimado de 75 gCO₂/pkm (Miyoshi y Mason 2013). Por tanto, dada la especial contribución de este tipo de viajes a las emisiones generadas en los accesos de los aeropuertos, y dado que los ingresos por ellos generados, al no usarse el parking o usarse durante periodos de tiempo muy breves, son a menudo bajos o inexistentes, la disminución de los mismos deberá ser una prioridad al diseñar estrategias de reducción de emisiones en los accesos al aeropuerto.

- **Viaje en taxi.-** Se realiza mediante un servicio de taxi. Aunque éstos pueden dejar y recoger pasajeros en un mismo desplazamiento, esto no siempre ocurrirá, por lo que en general se considera el segundo modo de transporte más contaminante (Miyoshi y Mason 2013). Sin embargo, las flotas de taxi a menudo suelen contar con coches de bajo consumo, como coches híbridos, en cuyo caso puede convenir ofrecer facilidades a este modo de transporte.
- **Viaje con aparcamiento.-** El vehículo se mantiene estacionado en el aeropuerto hasta la vuelta de los pasajeros. Para cada pasajero o grupo de ellos el recorrido solo es realizado una vez.
- **Viaje con vehículo alquilado.-** Se realiza con un vehículo alquilado, recogido o devuelto en el aeropuerto o inmediaciones a la empresa de alquiler de vehículos. A efectos prácticos funciona como el viaje con aparcamiento.
- **Viaje en transporte en tren o metro.-** Son, junto a los autobuses, los medios de transporte público que más usualmente prestan servicio en los aeropuertos, a diferencia del resto (excepto en el caso de vehículos eléctricos) funcionan con energía eléctrica, por lo que las emisiones por ellos generadas dependerán del mix eléctrico existente.
- **Viajes en autobús.-** Autobuses tanto públicos como privados que presten servicio en el aeropuerto. Al ser vehículos de alta ocupación las emisiones de CO₂ por pasajero-kilómetro recorrido suelen ser muy reducidas.

En general los dos primeros grupos son los que más emisiones generan, mientras que los autobuses serán normalmente los menos contaminantes. En el caso del tren o el metro las emisiones variarán significativamente de un aeropuerto a otro. Será de vital importancia que exista por parte del gestor aeroportuario un conocimiento claro del porcentaje que cada uno de estos modos de desplazamiento posee dentro del total de desplazamientos realizados por los pasajeros de un aeropuerto.

Los principales factores, desde un punto de vista práctico, que determinan la preferencia por parte de los pasajeros de unos modos de transporte frente a otros son: el tiempo y coste del viaje, la distancia del mismo, y la facilidad para el transporte de equipajes para cada uno de estos modos (Budd, Ison y Ryley 2011). Asimismo, la importancia que típicamente cada uno de estos pasajeros otorga a cada uno de estos factores depende fuertemente del motivo del viaje, por ejemplo, los pasajeros por motivos de negocio suelen otorgar un mayor valor al tiempo que los pasajeros por motivos de ocio (Pels, Nijkamp y Rietveld 2003), pero un mayor valor al coste del viaje (Coogan 2000). Otro fenómeno importante es la mayor preferencia de los pasajeros de líneas low-cost por el uso del transporte público, ya que estos pasajeros suelen otorgar mayor valor al coste del transporte y raramente necesitan transportar mucho equipaje (Budd, Ison y Ryley 2011).

Además de estos factores prácticos, también juegan un peso importante los factores psicológicos. Disponer de información referente a las necesidades compartidas, aptitudes y percepciones presentes en los pasajeros del aeropuerto puede ser de mucha utilidad a la hora de decidir las medidas a tomar, ya que los pasajeros no suelen reaccionar y comportarse de forma similar ante las condiciones externas, es decir, no existe un pasajero estándar, cuya elección de un modo de transporte pueda ser prevista dados unos condicionantes externos o unos cambios en los mismos, sino que éstos, más bien, pueden ser divididos en varios grupos, en los que los pasajeros compartan ciertas necesidades, aptitudes y percepciones parecidas que, dadas unas circunstancias, les harán elegir con mayor posibilidad un modo de transporte frente a otro. La existencia e importancia relativa de estos grupos, sin embargo, variará de un lugar a otro y a lo largo del tiempo. Al disponer de esta información podremos predecir mejor el resultado de introducir estrategias que pretendan variar la elección entre los modos de transporte (Budd, Ison y Ryley 2011).

Otros factores de importancia a la hora de estimar el nivel de emisiones generadas en los accesos de un aeropuerto son los siguientes:

- **El área de influencia del aeropuerto.-** El tamaño de este área, comúnmente entendida como el área geográfica sobre la que un aeropuerto atrae a sus pasajeros locales, es de vital importancia para el cálculo de emisiones, ya que, en general, cuanto mayor sea este área, o cuanto más alejadas del aeropuerto se encuentren las zonas con mayor densidad de población dentro de ella, mayores serán las distancias medias realizadas en los desplazamientos de los pasajeros, con el consiguiente aumento de las emisiones.
- **Las características de los vehículos comúnmente usados dentro de cada modo.-** Las características de los vehículos usados podrán variar de un aeropuerto a otro e influirán en gran medida en las emisiones

que cada modo genere, por ejemplo, si la proporción de vehículos de uso personal antiguos o de elevado consumo es elevada en una zona, es de esperar que las emisiones debidas al uso de vehículos particulares sean más elevadas, del mismo modo, si las flotas de taxis están formadas por modelos híbridos o los autobuses funcionan con CNG las emisiones esperadas serán menores.

Aunque cada caso es especial, debido fundamentalmente a la variación de los elementos anteriores, las medidas generalmente más efectivas, enumeradas de mayor a menor capacidad de acción del gestor aeroportuario, son las siguientes:

- **Favorecer el uso de vehículos poco contaminantes.-** Principalmente destinadas a incentivar el uso de los vehículos eléctricos y su utilización para el acceso al aeropuerto, por ejemplo mediante la colocación de estaciones de recarga, la asignación de plazas reservadas a vehículos eléctricos con emplazamientos preferenciales dentro del parking, la reducción de tarifas de parking para estos vehículos, o bien establecer tasas especiales para vehículos especialmente contaminantes
- **Políticas disuasorias para reducir el uso del coche particular.-** Puede plantearse la creación de tasas de aparcamiento más elevadas o imponer tasas a los coches que realicen viajes kiss-and-fly. Estas medidas desincentivadoras, sin embargo, tienden a generar polémica y descontento entre los usuarios, pudiendo contribuir a la pérdida de competitividad del aeropuerto, por lo que no gozan de gran popularidad entre los gestores de aeropuertos. Como forma de compensación, el dinero recaudado con estas medidas podría usarse para incentivar el uso del transporte público, por ejemplo, rebajando el precio de los billetes. De esta forma, además, lograríamos una mayor aceptación de estas medidas por parte de los usuarios, siempre y cuando se dispongan los medios necesarios para que éstos estén informados de estas políticas. Otra medida importante es la recolocación de las zonas de descarga de vehículos (vehículos particulares y taxis) a lugares más alejados de la entrada a la terminal, acercando las paradas de autobuses u otros transportes públicos. En la práctica, en lugar de este tipo de medidas, puede ser preferible adoptar medidas más “suaves”, como campañas de concienciación en las que se informe a los pasajeros de los perjuicios medioambientales que entraña el uso del vehículo particular, especialmente los del tipo *kiss-and-fly* (Budd, Ison y Ryley 2011).
- **Fomentar el uso de sistemas de transporte públicos.-** Principalmente mediante mejoras en las conexiones de autobuses, trenes o metro, que pueden ir desde la implantación de estos modos de transporte si aún no están disponibles, hasta el aumento del número de enlaces o la frecuencia de éstos. A menudo la única forma de lograr estos objetivos es ofreciendo subvenciones a las empresas gestoras del transporte público, lo que aumentarían la rentabilidad de estos cambios. Esta opción suele ser poco viable en aeropuertos pequeños, que generalmente cuentan con mayores problemas de financiación.
- **Sistemas de acceso y tránsito mejorados.-** Involucran tanto a las zonas de acceso en el interior del aeropuerto como a las carreteras exteriores que permitan el acceso al mismo, se trata de disminuir en lo posible la congestión en estas zonas debido al flujo de vehículos generado, mediante una apropiada distribución de los viales, un número suficiente de carriles, zona de taxis apropiada, etc.
- **Uso de taxis o autobuses propulsados con combustibles alternativos.-** Las emisiones generadas por estas formas de transporte serán en general menores si funcionan con combustibles alternativos, como electricidad o gas natural en el caso de los autobuses, o el empleo de vehículos 100% eléctricos o híbridos en las flotas de taxis. El gestor aeroportuario debería, por tanto, presionar a las compañías de taxis para que incorporen en sus flotas este tipo de vehículos.

7.2 Emisiones ocasionadas por los empleados

Los empleados del aeropuerto generan un número significativo de viajes hacia y desde el aeropuerto cada día, los cuales suponen alrededor de un tercio del total de desplazamientos (Humphreys y Ison 2005) o incluso más, como es el caso de grandes aeropuertos internacionales que sean base de operaciones de alguna gran compañía aérea, o alberguen importantes instalaciones de ingeniería y mantenimiento de aeronaves (Graham 2008). Esta importante cantidad de desplazamientos tiene un impacto significativo en la calidad del aire y en las condiciones del tráfico terrestre en el propio acceso al aeropuerto, en las zonas residenciales que rodean al aeropuerto y en las carreteras que les dan servicio. La existencia de distintas opciones y su uso por parte de los empleados no solo tiene un gran impacto en cuanto a las emisiones y al tráfico generado, sino también en cuanto a la economía del aeropuerto, la calidad de vida de los empleados y la capacidad del aeropuerto para la contratación y

conservación de éstos (Budd, Ison y Ryley 2011).

Este grupo posee muchas características comunes a las ya comentadas para el caso del desplazamiento de pasajeros, sin embargo aparecen diferencias significativas, entre las que destacan:

- A priori existirá mayor control sobre el comportamiento de los empleados por parte del gestor aeroportuario y el resto de empresas ubicadas en el aeropuerto, y en principio un mayor conocimiento de éstos que de los pasajeros (Aldridge, y otros 2006).
- Los empleados no transportan equipajes, luego gozan de mayor facilidad para el uso de ciertos transportes públicos para los que el equipaje supone un inconveniente o incluso una imposibilidad, como el caso de la bicicleta (Aldridge, y otros 2006).
- Los empleados de un aeropuerto representan entre un cuarto y la mitad del total de pasajeros, pero debido a que llegan al aeropuerto en función de sus turnos de trabajo, que suelen comenzar a las mismas horas, el número de plazas de parking que se deben proporcionar es proporcionalmente mayor (Kazda y Caves 2008).

Conforme a lo visto ahora aparecerán nuevas formas en las que el gestor aeroportuario podrá influir en la elección de los modos de transporte usados por los empleados del aeropuerto, y conseguir una reducción de las emisiones generadas. Es por eso que este caso merece una mención separada, ya que medidas adicionales y más específicas a las ya comentadas para pasajeros podrán ser llevadas a cabo. Del mismo modo, otras medidas ya comentadas anteriormente no serán ahora de aplicación, como aquellas destinadas a la reducción de los desplazamientos kiss-and-fly, por razones obvias.

Pese a todo, desde el punto de vista del gestor aeroportuario existen importantes limitaciones respecto a la efectividad de las medidas que se pueden implementar para reducir el uso de coche particular por parte de los empleados:

- A menudo el porcentaje de empleados que trabajan directamente para el gestor aeroportuario, es decir, aquellos sobre la que el gestor tiene control directo, es menor al 10% del total de trabajadores del aeropuerto (Ison, y otros 2008), el resto suelen pertenecer a compañías aéreas y de transporte de mercancías, comercios, agencias u otros servicios públicos, etc., que se encuentren dentro del aeropuerto.
- Debido a los horarios típicos de muchos puestos de trabajo en los aeropuertos, las horas de servicio y frecuencias del transporte público, muchas veces orientadas solo al grueso de trabajadores en una ciudad, pueden no satisfacer las necesidades de los empleados del aeropuerto, dejando a menudo, como única opción viable, el uso del vehículo particular. La localización del aeropuerto en relación con la red de transporte público también puede ser un problema añadido en muchos casos, y los tiempos de viaje pueden ser también demasiado elevados y no resultar competitivos respecto al vehículo particular (Ricard 2012).
- Es posible que el aeropuerto desconozca información relevante para el desarrollo o justificación de un programa ECO (Employee Commute Options), como el número total de trabajadores del aeropuerto, las características demográficas, tipos de transporte usados, o las preferencias en cuanto a los modos de desplazamiento; número de desplazamientos generados en los accesos al aeropuerto y la contribución de los empleados del aeropuerto en el total durante diferentes periodos de tiempo, etc.
- Los empleados del aeropuerto que usan coche para ir a trabajar usan generalmente el parking del aeropuerto para estacionar el vehículo, a menudo pagando un precio reducido o incluso sin gasto alguno, lo que desincentiva el uso de medios de transporte alternativo. Además, la capacidad de estos parkings suele ser suficiente para acomodar al total de los empleados sin problemas de congestión. De esta situación se deriva un problema que padecen muchos aeropuertos, ya que el servicio de parking para empleados entraña un coste importante para el aeropuerto que difícilmente podrá amortizarse en un futuro. Estos costes corresponden al total de plazas de parking necesarias y a las necesidades operacionales y de mantenimiento que conllevan, a los que hay que añadir a menudo los costes de disponer de autobuses de enlace. Debido a esto, la dedicación de una plaza de parking a pasajeros en lugar de a empleados ha demostrado ser entre 7 y 10 veces más rentable (Humphreys y Ison 2005). Las razones que dificultan la solución de este problema son las siguientes (Ricard 2012):
 - Los empleados tienden a comparar costes entre aeropuertos y presionan al gestor aeroportuario para que estos precios se mantengan bajos. Los aeropuertos por su parte tienden a ser reticentes

a la implantación de medidas que puedan tensar las relaciones con los empleados y empresas concesionarias.

- Existe la creencia de que muchos empleados no tienen alternativa al uso de su vehículo particular, por lo que tarifas de parking más elevadas podrían hacer que algunos empleados no estén interesados en conservar el trabajo.
- A veces existe desconocimiento del gestor aeroportuario de los costes que entraña esta situación al aeropuerto.
- Estas tarifas pueden formar parte de los contratos de los empleados con los concesionarios dentro del aeropuerto.

Debido a la necesidad, tanto de disminuir las emisiones como de descongestionar el tráfico, en muchos aeropuertos se han puesto en marcha programas para incentivar el uso de medios de transporte alternativos, es decir, transportes diferentes al coche particular, preferiblemente transportes de alto o medio nivel de ocupación, como autobuses, trenes o furgonetas compartidas, o vehículos que no generen emisiones de GEI, como las bicicletas, o que presenten un bajo nivel de emisiones, como los vehículos eléctricos. Estos programas se denominan por sus siglas en inglés programas ECO (Employee Commute Options). En ellos suelen incluirse una serie de medidas, que, aunque aplicadas por separado no suelen ser de utilidad, conjuntamente pueden resultar muy efectivas. A continuación se presenta una lista de las medidas que de forma más frecuente forman parte de estos programas:

- **Incentivos.-** Consisten en la reducción del coste para los empleados de medios de transporte alternativos. Puede realizarse de distintas formas:
 - **Subsidios o descuentos.-** Las empresas pagan la totalidad o una parte del coste del desplazamiento por transporte público, minibuses privados, vehículos compartidos o bicicleta.
 - **Provisión de vehículos para viajes compartidos.-** Estos vehículos (normalmente furgonetas o minibuses) pueden ser suministrados por el gestor aeroportuario u otras entidades privadas o públicas para que grupos de trabajadores realicen viajes compartidos entre el aeropuerto y sus domicilios. En general, los costes de alquiler, mantenimiento y seguro, y a veces también el combustible, son pagados por el gestor aeroportuario u por otro promotor, y los empleados deben pagar una tarifa mensual por la utilización del servicio, que puede ser subvencionada. Para que la iniciativa sea efectiva, es necesario proporcionar herramientas (por ejemplo un software) a los empleados para que éstos puedan apuntarse en aquellos viajes que les resulten más favorables, así como hacerles llegar cualquier información relevante sobre estos servicios, que pueda suponer un incentivo para aumentar el número de usuarios.
 - **Cobro del descuento en parking.-** En lugar de aplicar directamente el descuento para la utilización del parking, una cantidad de dinero equivalente puede ser entregada a los empleados, la cual puede ser empleada bien para el pago del parking o bien para el de otros medios de transporte alternativos, ya que muchos de los empleados pueden preferir el uso de éstos al resultarles una opción más económica al pago del parking. Varios estudios muestran que cuando los trabajadores tienen que pagar ellos mismos por el parking muchos comienzan a compartir vehículo con sus compañeros.

En el caso de tratarse de trabajadores con cierta flexibilidad horaria algunas de estas medidas pueden ser tomadas:

- **Facilitar el trabajo desde casa.-** Con esta medida se evita el desplazamiento del empleado.
- **Compresión de las jornadas laborales.-** Consiste en el alargamiento de las jornadas laborales con lo que se obtienen un mayor número de días de vacaciones. Por ejemplo, mediante la realización de 40 horas en cuatro días semanales o de 80 horas en nueve días durante un periodo de 2 semanas. De esta forma se disminuye el número desplazamientos.
- **Flexibilidad de la jornada.-** Se proporciona la posibilidad de que el empleado pueda entrar antes al trabajo y finalizar su jornada más tarde o viceversa, de esta manera resulta más fácil para el trabajador adaptar su horario de entrada y salida al de los transportes públicos o al de los vehículos compartidos, si los hubiese.
- **Recompensas.-** Existen diversos medios por los que los trabajadores que usen medios de

transporte alternativos al coche particular puedan ser recompensados: mediante una retribución económica, la obtención de días de vacaciones extra, la obtención de puntos canjeables por premios, la participación en sorteos, etc.

- **Estrategias de apoyo.-** Estas medidas proporcionan soluciones o alternativas a algunas de las circunstancias por las que el empleado se ve obligado a usar su vehículo particular para el desplazamiento al aeropuerto.
 - **Facilidades en caso de desplazamiento imprevisto.-** Empleados que usen medios de transporte alternativos pueden tener derecho a viajes en taxi o coche alquilado o al reembolso del viaje si éste es realizado en transporte público, en circunstancias en las que el empleado necesite realizar un desplazamiento imprevisto fuera de sus horarios normales de entra y salida por razones justificadas, y no pueda usar su medio de transporte acostumbrado. Deben imponerse límites al uso de este privilegio.
 - **Aparcamientos preferenciales para los vehículos compartidos.-** Pueden establecerse plazas de aparcamiento preferenciales en lugares con mejor y más rápido acceso a los lugares de trabajo. Estas plazas de aparcamiento también pueden contar con incentivos económicos respecto a las plazas normales.
 - **Transporte para desplazamiento dentro de la jornada laboral.-** A veces los empleados usan su coche para ir a trabajar debido a que tienen que realizar desplazamientos durante el transcurso de la jornada por razones personales o laborales. En estos casos pueden facilitarse medios de transporte alternativos, como coches de alquiler, a cambio de que el empleado realice el resto de sus viajes en transporte público. También se pueden proporcionar bicicletas para viajes cortos o subvenciones para la utilización de otros transportes.
 - **Servicios adicionales.-** Se trata de instalaciones en el aeropuerto que puedan hacer más cómodo para el empleado el uso de transportes alternativos, como lavanderías, gimnasios, guarderías, etc.
 - **Servicios para bicicletas.-** La provisión de una infraestructura que permita un desplazamiento cómodo y seguro en bicicleta actuará como un incentivo para los empleados que vivan a corta distancia del aeropuerto. Debe consistir de al menos:
 - Bicicletero o lugar seguro para dejar las bicicletas.
 - Carriles bici o rutas seguras para la circulación de bicicletas. Duchas y consigna cercanas al lugar de trabajo.
 - En su caso, ayuda económica para la adquisición de una bicicleta.
- **Medidas disuasorias.-** Como se ha dicho, las tarifas impuestas a los empleados en el parking del aeropuerto son reducidas o a coste cero. Esto actúa como un incentivo económico para el uso del vehículo particular, ya que a menudo resultará más barato para los empleados la utilización de éste que el uso de transporte público. Este incentivo puede ser eliminado mediante medidas disuasorias como las siguientes:
 - **Aumento del precio del parking.-** La tarifa por el uso del parking puede aumentarse, por ejemplo, hasta un precio que permita al aeropuerto cubrir los costes de la plaza de parking, o incluso a precios mayores que sean más efectivos para disuadir a los empleados.
 - **Penalizar a los estacionamientos para vehículos particulares.-** Los lugares de aparcamiento para vehículos particulares pueden situarse más alejados de los puestos de trabajo que los dispuestos para el estacionamiento de vehículos compartidos o las paradas de los transportes públicos.
- **Otro tipo de medidas.-** Se trata de medidas secundarias, en su mayoría destinadas a servir de apoyo a las medidas principales y mejorar la efectividad de los programas ECO.
 - **Publicidad.-** Como ya se ha comentado, la provisión de información de forma regular, que permita a los empleados estar informados de las opciones disponibles, de los beneficios que éstas puedan reportarles, y de cómo acceder a ellas, es un elemento crítico para el éxito de un programa ECO. Entre las medidas que pueden tomarse para conseguir este objetivo destacan:

- Distribución de folletos y colocación de posters en lugares públicos, tableros de anuncios, lugares de reunión de empleados, etc.
 - Incluir la información en boletines de noticias para empleados, los cuales pueden ser distribuidos tanto en formato papel como digital.
 - Material de orientación para nuevos empleados.
 - Campañas para fomentar el uso de vehículos alternativos.
 - Eventos para promover el uso de vehículos compartidos, transporte público, caminar, o la bicicleta.
 - Uso de e-mail o redes sociales para difundir la información.
- **Gestión del programa.-** Se trata de medidas orientadas para conseguir una gestión más eficiente y efectiva del programa ECO.
- **Designación de personal dedicado al programa.-** Las tareas realizadas por este personal pueden consistir en la provisión de información a los empleados, la planificación y administración de los elementos del programa, la obtención de apoyos mediante la colaboración de otras entidades en el proyecto, o la monitorización de la ejecución del programa, entre otras.
 - **Implicación de todas las empresas que dispongan de personal trabajando en el aeropuerto.-** A menudo puede haber más de 100 empresas localizadas en aeropuertos de medio y gran tamaño, por lo que es necesaria una participación colectiva, que incluya al menos a las empresas que manejen más personal, para obtener unos resultados verdaderamente efectivos. Esta participación colectiva puede ser lograda mediante la creación de una TMA (Transportation Management Association), las cuales agrupan típicamente a empresas que trabajan dentro del mismo área geográfica, que están interesadas en colaborar y trabajar conjuntamente para resolver problemas comunes relacionados con el transporte. Mediante estas asociaciones pueden establecerse fondos comunes que pueden hacer más asequibles muchas de las medidas aquí expuestas.
- **Mejora en la provisión de los servicios de transporte programados.-** El gestor aeroportuario debe trabajar con los gestores de estos medios de transporte, ya sean públicos o privados, que operen siguiendo una programación prefijada. Una buena comunicación entre ambos es muy importante, ya que el aeropuerto puede verse interesado en realizar cambios en los horarios, incrementar la frecuencia de los servicios, o añadir rutas a las ya existentes. En ocasiones, estos gestores externos no podrán satisfacer las peticiones del aeropuerto a menos que no reciban una ayuda económica por parte de éste, y puede darse el caso de que, en última instancia, deba ser el propio aeropuerto el encargado de proporcionar estos servicios.

8 REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DEBIDAS A LAS AERONAVES

La principal causa de emisiones de CO₂eq en aeropuertos es la debida a las aeronaves. En un estudio realizado para los aeropuertos de UK se calculó que esta contribución asciende a un 84%, del que un 81% es debido a las emisiones generadas en los motores durante los aterrizajes y despegues, y el restante 3% a la operación de las APU (Stettler, Eastham y Barrett 2011). Sin embargo, estas emisiones pertenecen al Alcance 3, por lo que en el mejor de los casos el aeropuerto no poseerá control directo sobre ellas, sino que será imprescindible la implicación de otras empresas o instituciones, como aerolíneas, agencias de handling (de estar presentes), navegación aérea, etc.

En las últimas décadas, la aparición de nuevas regulaciones y el progreso en la tecnología de los motores y los combustibles han favorecido una mejora significativa de eficiencia, lográndose reducciones en el consumo del combustible de entorno al 70% respecto a la década de los 60, lo que ha venido acompañado no solo de una importante reducción del CO₂ emitido, sino también del resto de gases contaminantes generados durante las operaciones de las aeronaves (Nygren, Aleklett y Höök 2009). Sin embargo, a nivel global, estos avances han sido contrarrestados por el crecimiento del volumen del tráfico aéreo, el cual ha mantenido un índice de crecimiento de aproximadamente el 5% desde los inicios de la aviación comercial (ICAO 2014).

A nivel internacional, las emisiones generadas por los motores de las aeronaves están reguladas por el Volumen II del Anexo 16 de ICAO, destinado a la protección medioambiental. Sin embargo, en este documento solo se regulan las emisiones de CO, NO_x, hidrocarburos y el Índice de Humos, más relacionados con la contaminación atmosférica local. Además, estas regulaciones solo se aplican a turbofans y turbojets, dejando fuera los turbopropulsores y los motores de combustión interna.

Los turbofans son los motores mayoritariamente empleados en las flotas de las principales compañías aéreas, seguidos por los turbopropulsores, lo cuales son empleados comúnmente en aviones de transporte de pequeñas dimensiones usados por pequeñas compañías aéreas regionales. El combustible más empleado en la aviación comercial, tanto para su empleo en turbofans como en turbopropulsores, es el queroseno, comúnmente del tipo Jet A-1, Jet A (Norteamérica) o Jet B (empleado en condiciones de frío intenso). El queroseno se obtiene en el proceso de destilación del petróleo, y al igual que la gasolina y el diésel su combustión genera elevados niveles de GEI, principalmente CO₂, (~72%) y vapor de agua (~27,7%), el cual supone una amenaza al crear las estelas de condensación. EASA mantiene una exhaustiva base de datos elaborada por ICAO (ICAO Engine Emissions Databank) que sirve como fuente fiable para la consulta de las emisiones generadas por cada tipo de motor.

8.1 Combustibles alternativos

El queroseno ha demostrado ser una opción inviable para servir durante mucho más tiempo de principal fuente energética a las flotas de aviones en todo el mundo, ya que si su contribución al calentamiento global resulta grande en la actualidad, en un futuro ésta se prevé mucho mayor, ya que se ha estimado que la demanda de combustible para aeronaves subirá hasta un 38% en 2025 respecto a la que existió en 2008, lo que supone un ritmo de crecimiento anual del 1,9% (Chèze, Gastineauc y Chevallier 2011).

Actualmente, en la industria de la aviación, se están invirtiendo grandes esfuerzos en el desarrollo e implantación de combustibles alternativos más sostenibles para sustituir al queroseno, o al menos disminuir la dependencia hacia éste, lo cual es debido tanto a motivos económicos, principalmente el coste ascendente e inestable del petróleo (los gastos en combustibles para las aerolíneas hoy en día superan incluso a los costes de personal, situándose en valores cercanos al 34% del total (Boeing 2013)); como medioambientales, es decir, contaminación atmosférica y cambio climático. En este sentido, el principal campo de investigación concierne a los biocombustibles, es decir, aquellos obtenidos a partir de biomasa. Según un estudio de IATA se prevé una contribución de los biocombustibles en la aviación para el 2030 de un 30% y se estima que una reducción de emisiones de hasta un 80% puede ser lograda (AirportWatch 2012).

Sin embargo, los requisitos que debe satisfacer un biocombustible para servir de alternativa válida al queroseno son muchos y exigentes:

- Elevada densidad energética, de otra forma, el aumento en peso y/o volumen que acarrearía resultaría prohibitivo.
- Bajo punto de congelación, alto punto de autoignición y alta fluidez a baja temperatura, lo cual es imprescindible debido a las bajas temperaturas a las que puede estar expuesto al volar en vuelo de crucero.
- Buena estabilidad térmica, ya que las diferencias de temperatura que soportará serán elevadas.
- Buenas propiedades para su almacenamiento, como resistencia al crecimiento de microorganismos e inmiscibilidad del agua en el combustible. Además no debe provocar corrosión en los materiales ni generar residuos que puedan atorar los conductos o saturar los filtros. Asimismo debe poseer una alta lubricidad.
- Bajo coste de producción y distribución. Debe ser competitivo económicamente con los combustibles de aviación convencionales.
- Bajas emisiones de GEI durante su ciclo de vida, así como bajo contenido en azufre y compuestos aromáticos.
- Los cultivos de biomasa para su uso como combustibles no deben competir con el mercado de alimentos, es decir, deben ser preferiblemente cultivos para biomasa no comestible y no deben provocar un uso intensivo de recursos necesarios para el cultivo de alimentos, como agua o tierras, en caso contrario podrían derivarse problemas de escasez de alimentos. Además deben evitarse en lo posible daños medioambientales como la contaminación de las aguas y la tierra con pesticidas o fertilizantes, y no deben causar deforestación, lo que supondría una causa directa de aumento de CO₂ atmosférico y pérdida de ecosistemas y biodiversidad.
- Es importante que puedan ser compatibles con los combustibles convencionales.

Hasta ahora, tests de vuelo realizados con biocombustibles han demostrado que su utilización directa en aeronaves es segura y técnicamente consistente y la mayoría pueden ser mezclados con queroseno en porcentajes crecientes mientras su disponibilidad y rentabilidad aumentan (ATAG 2010a). Las materias primas más prometedoras actualmente para la obtención de combustible para aviación son (Hari, Yaakob y Binitha 2015):

- **Camelina.-** Planta herbácea no comestible de la que se obtiene un aceite con alto contenido energético. Necesita poca cantidad de fertilizante y es capaz de crecer en suelos poco fértiles, mostrando alta resistencia a plagas y enfermedades. Es apropiada para ser empleada como un cultivo rotacional con trigo o cereales. Cultiva principalmente en el norte de EEUU y el sur de Canadá.
- **Jatrofa.-** Con propiedades muy parecidas a las de la camelina, no comestible, arraiga con facilidad incluso en tierras improductivas si las condiciones climáticas son favorables, resistente a sequías y plagas, etc. Cultivada en Suráfrica, América del Sur y Central y el sudeste asiático.
- **Algas.-** El empleo de algas es muy prometedor, ya que estos cultivos son los que menos compiten con los cultivos alimenticios al necesitar solo energía solar, aguas residuales y CO₂, y al no requerir la ocupación de tierras de cultivo. Además, la biomasa obtenida tras la extracción del aceite puede ser usada para multitud de otros cometidos, como servir de alimentos para animales o la fabricación de bioplásticos.
- **Residuos de origen animal o vegetal.-** De bajo coste y fácil obtención, pueden provenir de multitud de fuentes: residuos forestales, industriales (alimenticios, madereros, del papel...) o agrónomos, residuos municipales, etc. En este caso no existen problemas derivados del uso tierras o agua, empleo de fertilizantes, etc.
- **Halófitas.-** Planta que crece en agua salada, se encuentra principalmente en regiones tropicales y subtropicales. Al subsistir a base de agua salada no compete con la agricultura por la obtención de recursos como el agua o las tierras.

Los principales combustibles actualmente en desarrollo son (Hari, Yaakob y Binitha 2015):

- **HRJ (Hydroprocessed Renewable Jet-fuel).-** Son líquidos parafínicos que responden a la fórmula

C_nH_{2n+2} . Se obtienen mediante la hidroxigenación de grasas animales, aceites vegetales y de algas. Una de las mayores ventajas de este combustible reside en sus menores emisiones de GEI, además posee unas buenas cualidades térmicas y de almacenamiento. Poseen suficiente densidad energética como para ser empleados sin mezclar, sin embargo, su mezcla con queroseno es recomendable para eliminar algunos de sus inconvenientes, como su menor lubricidad, problemas de fluidez a baja temperatura o la diferencia en el número de cetano. Se encuentra en un punto de desarrollo relativamente avanzado, hasta el punto de que diversas compañías aéreas, como Iberia, KLM o Lufthansa ya han utilizado este combustible en vuelos comerciales de pasajeros, sin embargo su precio es varias veces más elevado que el queroseno, lo que dificulta enormemente su difusión.

- **Combustibles de Fischer Tropsch.-** Son combustibles conseguidos mediante la conversión catalítica del syngas (ver pag. 87). Las propiedades de los combustibles obtenidos de esta forma son muy buenas, aunque poseen menor densidad energética y lubricidad y su proceso de obtención resulta aún muy caro y es poco eficiente.
- **Biodiesel.-** Este combustible ha sido ya analizado en profundidad con anterioridad (ver pag. 97). Aunque posee alta lubricidad y buenas prestaciones desde el punto de vista de la sostenibilidad y las emisiones, no puede usarse solo como combustible para aviones ya que no posee suficiente densidad energética. Además puede ser susceptible al crecimiento de microorganismos, su punto de congelación es demasiado alto y presenta problemas de humedad durante su almacenamiento.
- **Biohidrógeno líquido.-** El biohidrógeno es hidrógeno producido a partir de biomasa. Tiene importantes inconvenientes, especialmente a la hora de almacenar el hidrógeno en estado líquido, ya que se requieren grandes contenedores en los que se mantengan condiciones muy bajas de temperatura, y existe riesgo de explosión en contacto con aire. Además, serían necesarias modificaciones significativas en el diseño de los motores, y el coste de producción del hidrógeno es elevado.

Los candidatos mejor colocados para sustituir en un futuro a los combustibles convencionales son el HRJ y los combustibles de Fisher Tropsch, sin embargo, debido a la escasez de incentivos y programas para fomentar el desarrollo e implantación de estos combustibles alternativos, las tecnologías de procesado aún no resultan rentables para competir en igualdad de condiciones con el queroseno (Hari, Yaakob y Binitha 2015).

8.2 Operaciones

El CO_2 emitido por los motores de las aeronaves en un aeropuerto es función, principalmente, de la cantidad y tipo de combustible quemado, guardando relativamente poca dependencia con el resto de factores que pueden variar durante la operación de los motores. Por esta razón, la principal prioridad a la hora de disminuir emisiones de CO_2 durante las operaciones, dada una determinada flota de aeronaves operando en un aeropuerto, será la minimización de la cantidad de combustible consumido, el cual mantiene una dependencia aproximadamente lineal con el empuje, que suele representarse como una fracción del empuje máximo.

A continuación se discutirán las principales acciones que pueden ser tomadas para reducir las emisiones de GEI de las aeronaves durante sus operaciones en el entorno de un aeropuerto, principalmente mediante el uso del CDA (Continuous Descent Approach), implantación de técnicas de eficiencia en la operación de taxi, y la reducción del uso de las APU.

8.2.1 Disminución de las emisiones mediante uso de CDA

Se trata de un procedimiento diseñado para minimizar las emisiones, el consumo de combustible, y el ruido producidos por los motores de las aeronaves durante la maniobra de aproximación, sustituyendo los perfiles de vuelo tradicionales anteriores al punto de aproximación final (FAF) por otros que permitan minimizar el empuje necesario, caracterizados por el uso de un ángulo de descenso optimizado para lograr la mínima resistencia aerodinámica durante el mayor tiempo posible (ver Imagen 41). El máximo beneficio se consigue manteniendo a la aeronave volando a la mayor altura posible hasta que alcanza el punto óptimo de descenso, el cual variará dependiendo de las condiciones atmosféricas y las características de las aeronaves, y puede ser calculado por el sistema de gestión de vuelo. Otras ventajas adicionales que pueden ser logradas con el empleo de esta técnica son un uso más eficiente del espacio aéreo, una reducción de la carga de trabajo para pilotos y controladores aéreos, o la necesidad de realizar menos comunicación por radio.

La disminución en consumo de combustible, y por ende, en emisiones de CO₂, puede ser muy elevada (30-50%) aunque varía considerablemente dependiendo de las condiciones de intensidad del tráfico aéreo así como de la distribución de los segmentos de vuelo en las trayectorias existentes (Thompson, y otros 2013). Pese a todo, y aunque es una técnica que ha estado disponible desde hace tiempo, aún está poco extendida. Su implementación puede ser facilitada dotando a los controladores aéreos de mejores herramientas y ajustando la arquitectura del espacio aéreo.

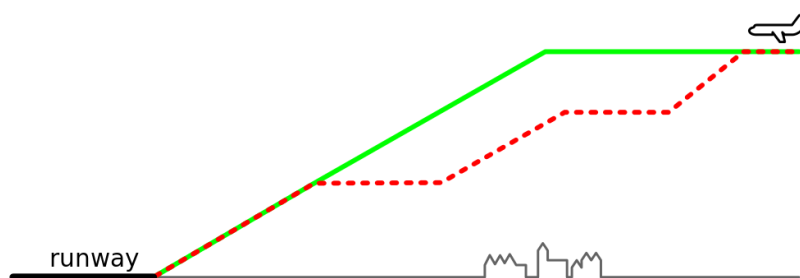


Imagen 41.- Esquema de la maniobra de CDA.

8.2.2 Disminución de las emisiones de GEI en la fase de taxi

La fase de taxi comprende los movimientos realizados por la aeronave en tierra, excluyendo la aceleración anterior al despegue y la desaceleración posterior al aterrizaje en los que el avión es propulsado usando exclusivamente sus sistemas de abordaje (motores y APU). La fase de taxi tiene un peso importante en el consumo de combustible de una aeronave. En Europa se ha estimado que las aeronaves emplean entre un 10 y un 30% del tiempo de vuelo realizando esta fase y que por ejemplo, un A320 en un vuelo de corta/media distancia invierte entre un 5 y un 10% de su combustible en ella (Cros y Frings 2008). En la fase de taxi de salida se invierte, de media, el doble de tiempo empleado en la fase de llegada, por lo que es en dicha fase en la que generalmente se ponen más esfuerzos para lograr reducciones en el consumo.

Para una aeronave dada, las emisiones generadas durante la fase de taxi dependerán principalmente de la configuración de las calles de rodaje, las condiciones de tráfico, la configuración de empuje y las decisiones en cuanto a la operación y uso de los motores. En base a estos factores, las principales medidas para reducir las emisiones de GEI a través de una reducción del consumo de combustible son las siguientes (Balakrishnan, Deonandan y Simaiakis 2008):

8.2.2.1 Reducir los tiempos de taxi

En aeropuertos congestionados los tiempos de taxi pueden ser muy largos, incluso varias veces mayores a los obtenidos cuando no existen trabas por la congestión. Una reducción significativa del tiempo en este caso puede ser conseguida limitando la formación de colas en la superficie del aeropuerto mediante una gestión mejorada en la que no se penalice la capacidad del aeropuerto, por ejemplo mediante el modelo desarrollado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology) en 2008. Un alto nivel de coordinación del tráfico en superficie supone un requisito imprescindible para que estas mejoras puedan implementarse con eficacia, por ejemplo, en el caso de que se usen estrategias de espera en plataforma, será necesario sustituir el protocolo FCFS (First-Come-First-Service), en caso de que se utilice, o establecer colas virtuales, de lo contrario se incentivaría a las aeronaves por abandonar la plataforma lo antes posible, lo que supone un mayor tiempo con los motores encendidos, una mayor cantidad de paradas y sus consecuentes aceleraciones.

8.2.2.2 Taxi con un solo motor

Tanto el combustible consumido como las emisiones generadas pueden ser reducidas considerablemente si la fase de taxi es realizada con uno o más motores apagados (en el caso típico de aviones bimotor ésta sería realizada con un solo motor). Esto es debido a que esta operación es comúnmente realizada usando los frenos del avión, por lo que no es usado todo el empuje que proporcionan los motores, incurriendo en un gasto innecesario de combustible. Los motores de las aeronaves deben ser precalentados antes del despegue por lo que deben ser encendidos como mínimo entre 2 y 5 minutos antes del mismo, sin embargo, comúnmente, el tiempo de taxi es mucho mayor. En este caso la reducción en las emisiones será la correspondiente a las que emitirían los motores que puedan ser apagados durante la fase de taxi menos el tiempo de calentamiento. Algunos estudios han determinado un ahorro potencial para grandes aeropuertos de entorno a un 40% del combustible invertido en la fase de taxi de salida.

Su empleo no resulta recomendable en caso de existir pendiente ascendente en las calles, cuando pueda existir deslizamiento en éstas o cuando operaciones de deshielo sean requeridas. Además, para una implementación efectiva de este método es necesario poseer un buen sistema de difusión de la información referente a las condiciones y situación actual de las calles de rodaje y pistas, así como estrategias para aumentar la robustez ante situaciones inesperadas, como la detección de problemas durante el encendido de los motores, que en este caso supondría una vuelta a la plataforma. Otros problemas derivados de esta práctica son la menor protección contra incendios tras el encendido de los motores y un aumento del riesgo de fallos al perderse redundancia en la operación, además, en caso de una situación de asimetría en el empuje (por ejemplo en aeronaves con 2 motores) se han reportado dificultades en la maniobrabilidad de las aeronaves durante giros cerrados.

8.2.2.3 Arrastre de las aeronaves mediante tractores

Otra medida importante consiste en el arrastre de las aeronaves desde las plataformas hasta las pistas mediante tractores remolcadores (ver pag. 89). De este modo se podrían apagar todos los motores hasta cinco minutos antes del despegue (tiempo típico para el precalentamiento) consiguiéndose ahorros de combustible durante la fase de taxi de hasta un 75%. Aunque mediante esta práctica las emisiones generadas por los motores de las aeronaves son suprimidas habrán de tenerse ahora en cuenta las emisiones generadas por estos tractores. De entre los distintos sistemas de propulsión que éstos suelen utilizar: motores de combustión interna para diésel, gasolina, CNG o motores eléctricos para baterías, los más contaminantes en cuanto a GEI se refiere suelen ser los que emplean diésel o gasolina. Para estos modelos se ha estimado una reducción de emisiones de CO₂ entorno a un 70%, aunque en estos casos las emisiones de NO_x podrían verse aumentadas drásticamente, lo que puede ser un problema, especialmente en lo que se refiere a la contaminación atmosférica local.

Los problemas derivados del empleo de esta práctica son, principalmente, el importante aumento del tiempo empleado en realizar el taxi (alrededor a 2 o 3 veces mayor) y aquellos problemas ya comentados para el caso del taxi con un solo motor que aparecen al ser encendidos los motores lejos de la plataforma.

8.2.3 Disminución de las emisiones de la APU

Las APU son pequeños motores de turbina de gas acoplados a un alternador los cuales utilizan generalmente queroseno como combustible. Se utilizan a bordo de los aviones para tres funciones principales: el suministro de energía eléctrica (a 115 V y 400 Hz) a los sistemas del avión, la generación de aire acondicionado para refrigeración o calefacción, y para proporcionar la energía hidráulica o neumática necesaria para la puesta en marcha de los motores. Las funciones primera y segunda tienen lugar durante la operación en tierra de las aeronaves, aunque el APU también puede servir para suministrar apoyo eléctrico y neumático en vuelo.

Su empleo para la generación de energía eléctrica se está viendo reducido en favor de los equipos GPU (Mazaheri, Johnson y Morawska 2011), ya que la eficiencia energética de un APU es muy reducida (8-14%) y supone una importante fuente de emisiones de gases contaminantes (se ha estimado que las emisiones de CO₂ generadas por un APU son del orden de entre 10 y 20 veces superiores a las ocasionadas por un equipo GPU diésel) y de ruido (AGES s.f.). Esta práctica será especialmente beneficiosa si el aeropuerto dispone de un sistema de suministro eléctrico fijo, ya sea subterráneo o fijado a la pasarela (ver Apartado 6.2.1), en cuyo caso se evita la necesidad de disponer de vehículos para desplazar estos pesados equipos y se eliminan las emisiones por la combustión del diésel, combustible usado en la mayoría de equipos GPU. En este caso, por supuesto, es necesario que la electricidad utilizada proceda de fuentes poco contaminantes para que se produzca una auténtica reducción de emisiones.

Lo mismo puede ser aplicado a la generación de aire acondicionado, tarea que puede ser realizada por una PCA como alternativa al APU, con la ventaja añadida que puede conllevar la utilización de un sistema de almacenamiento de frío que nos permita utilizar la energía producida durante horas valle. Asimismo, una ASU puede sustituir a la APU para el encendido de los motores.

Los gestores de los aeropuertos pueden fomentar el uso de estas prácticas entre las aeronaves que utilicen el mismo, reduciendo en lo posible el uso de las APU durante las operaciones en tierra. Para ello, en primer lugar, se deberá contar con el equipo necesario, y además, se deberán incorporar debidamente estos procedimientos en los manuales operacionales de handling, diferenciando las distintas situaciones que puedan producirse en función de las necesidades de cada aeronave, su lugar de estacionamiento y los equipos disponibles.

9 CONCLUSIONES Y RESUMEN DE LAS MEDIDAS MÁS IMPORTANTES

En este punto se acaba de completar el estudio teórico de las medidas que pueden ser emprendidas en un aeropuerto genérico para reducir las emisiones generadas. En este estudio hemos visto que algunas de ellas logran esta reducción de un modo directo, como en el caso de las energías renovables para climatización o para la generación de la electricidad, no obstante, la mayor parte de ellas lo hacen de un modo indirecto, mediante la mejora de la eficiencia energética, como la sustitución de lámparas existentes por modelos más eficientes.

Además, hemos visto que otro factor importante que diferencia estas medidas estriba en que el gestor aeroportuario no siempre posee la misma capacidad de control ni influencia sobre las emisiones generadas en el aeropuerto, ya que muchas de ellas, como las debidas a las aeronaves que en él operan, escapan del control del mismo en mayor o menor medida. Incluso en el caso de las emisiones generadas por los GSE, si éstos son propiedad de una empresa de handling o aerolínea, el control de sus emisiones por parte del gestor puede ser muy complicado. En base a esto, en la segunda sección del presente proyecto, en la que se presentarán medidas de reducción de emisiones para un aeropuerto concreto, convendrá considerar el Alcance de las fuentes de emisiones presentes en el mismo, y dotar de mayor prioridad a aquellas áreas que gocen de mayor control por parte del gestor aeroportuario.

En primer lugar, se vieron las medidas relativas al campo de Operación y Mantenimiento del aeropuerto, las cuales resultan muy a menudo injustamente ignoradas, a pesar de que presentan el mayor potencial de mejora en términos ahorro de emisiones/inversión realizada. Pese a ello, la aplicación de este tipo de medidas en la segunda parte del proyecto deberá ser descartada, ya que la estimación, tanto de las emisiones, como de los costes que éstas medidas pueden conseguir, son en general muy difíciles o imposibles de calcular, y varían enormemente de un caso a otro. Debido a esto, el estudio de las mismas con anterioridad a su aplicación ficticia, y contando además con un acceso limitado a los datos del aeropuerto, como será nuestro caso, carecerá no solo de sentido, sino también de interés académico frente al resto de opciones.

En el campo de la climatización, por su parte, nos encontramos que las estrategias de reducción de emisiones pueden enfocarse principalmente desde tres puntos distintos:

- **Disminución de la demanda de climatización mediante la mejora en eficiencia del edificio.-** Principalmente hemos introducido algunas técnicas de bioclimatismo y de mejora de la envolvente térmica del edificio, las cuales están más indicadas para su implementación en la fase de diseño del edificio, ya que, de lo contrario, pueden dar lugar a obras costosas y complejas, que pueden conllevar el cierre temporal de parte de las instalaciones y la reducción de la capacidad operativa del aeropuerto. Es por ello que estas medidas, aunque son en general poseedoras de un gran potencial, no resultan tan interesantes para su implementación en un aeropuerto existente, como es nuestro caso.
- **Mejora en la eficiencia de la instalación de climatización.-** Este tipo de medidas buscan mejorar la eficiencia de los equipos. La principal prioridad en este campo debe ser la elección de un sistema de generación térmica eficiente, económico, y bien dimensionado respecto a la demanda térmica del aeropuerto. A este respecto es de especial relevancia la comparación entre las distintas tecnologías de calefacción y refrigeración realizada en el Apartado 3.2.2, en la que se ponen de manifiesto las grandes mejoras de eficiencia que pueden ser conseguidas, con sus respectivas disminución de costes operacionales, eligiendo unos equipos de climatización en lugar de otros, por ejemplo, usando una bomba de calor geotérmica para calefacción en lugar de una aerotérmica. En este campo, otras mejoras importantes podrían conseguirse mediante medidas secundarias como un mayor control térmico de la instalación, que permita ajustar mejor la producción con la demanda, implementando sistemas de reducción de calor o de enfriamiento evaporativo, o colocando equipos terminales más eficientes, como el suelo radiante.
- **Uso de fuentes energéticas bajas en emisiones.-** Aunque la instalación de climatización no resulta energéticamente eficiente, las emisiones de CO₂ ocasionadas pueden ser muy bajas o nulas si la energía primaria empleada es energía limpia. Las técnicas con mayor potencial analizadas en este campo han

sido:

- **Climatización geotérmica.-** Aunque emplean energía eléctrica para funcionar, su eficiencia es tan elevada que se considera un sistema de energía renovable. Como hemos visto, sus principales problemas son la necesidad de disponer de terreno para la colocación del sistema de captación geotérmica y su elevada inversión inicial. En aeropuertos, sin embargo, el primer problema no suele ser un impedimento, ya que estos suelen contar con grandes terrenos disponibles para su construcción. Su alto coste inicial, por otro lado, puede ser compensado por sus bajos costes operacionales y de mantenimiento, y su larga vida útil, los cuales, unidos al hecho de que una misma instalación puede ser usada tanto para calefacción como para refrigeración, la convierten en una opción de necesaria consideración para un estudio coste-beneficio.
- **Climatización por biomasa.-** El uso de biomasa para calefacción de grandes instalaciones presenta, en general, costes iniciales elevados, mientras que sus costes operacionales, por otro lado, variarán con el combustible empleado: pellets, hueso de aceitunas, astillas, etc. Las emisiones de este sistema requieren que se considere el ciclo de vida completo del combustible, pese a ello en general se consideran nulas. La climatización por biomasa será pues, a priori, una medida muy efectiva a considerar para reducir de manera considerable las emisiones en un aeropuerto, aunque puede presentar problemas de rentabilidad.
- **Cogeneración y trigeneración.-** Al igual que en el caso de la climatización geotérmica, esta tecnología funciona generalmente con fuentes de energía no renovables, sin embargo, debido a la alta eficiencia global que con ella puede ser conseguida, se le suele dar el mismo tratamiento que al resto de energías renovables, y al igual que ellas, gozará de jugosas subvenciones. Este sistema está ganando gran popularidad en edificios de alta intensidad energética y que, además, precisan de una elevada seguridad en el suministro eléctrico, como es el caso de los aeropuertos.

Por otro lado, en el campo de la iluminación, la mayor parte de las estrategias buscan una reducción de las emisiones a través de la mejora en la eficiencia, principalmente mediante el uso de lámparas más eficientes, (aunque también empleando una gestión más eficiente en la operación de éstas, mediante la colocación de sensores de ocupación en zonas de uso irregular o intermitente, controladores temporales si se prevén segmentos de inactividad, o empleando conmutación bi-nivel o multinivel para adaptar mejor la intensidad lumínica generada con la demanda real). En base al análisis realizado entre los distintos tipos de lámparas estudiadas, aquellas que han resultado más interesantes para lograr una reducción de emisiones en iluminación son:

- **Iluminación interior.-** La máxima prioridad en iluminación interior debe ser la sustitución de lámparas poco eficientes como las bombillas incandescentes por otras más eficientes como las lámparas fluorescentes o los LED. Estos dispositivos tienen en común, además de su excelente eficiencia, su larga vida útil y su notable calidad lumínica, y aunque resultan más caras que los modelos incandescentes (especialmente el caso de las bombillas LED), su considerablemente menor coste operacional permitirá recuperar la inversión inicial rápidamente. Consideraciones importantes al usar este tipo de luminarias son, para el caso de las fluorescentes, la utilización de balastos electrónicos modernos, mientras que en caso de las LED es muy importante un aprovechamiento eficiente de su direccionalidad, mediante un correcto diseño de la instalación, lo que multiplicará el ahorro que con ellas puede ser conseguido. Finalmente, en espacios interiores amplios, donde se necesite una iluminación intensa y con alto IRC, puede considerarse la utilización de lámparas HID de halogenuros metálicos.
- **Iluminación exterior.-** En este caso la iluminación más eficiente consistirá en el uso de lámparas de descarga de vapor de sodio de baja presión, las cuales constituyen la mejor opción para la iluminación de espacios amplios en casos en los que un alto índice de rendimiento no sea necesario.
- **Iluminación del aeródromo.-** En las plataformas de los aeropuertos, las opciones más competitivas, a priori, son las lámparas de descarga de vapor de sodio de baja presión, baratas y con una eficiencia insuperable, aunque con una calidad lumínica baja, así como las lámparas HID de halogenuros metálicos, más caras y algo menos eficientes, pero con un IRC muy superior y una vida útil también superior. En caso de disponer de otro tipo de iluminación menos eficiente puede ser muy interesante estudiar su sustitución por alguno de estos modelos. En cuanto a la iluminación del área de maniobras puede ser muy interesante considerar la sustitución de luces de superficie y ayudas visuales incandescentes por modelos basados en LED.

Tras la iluminación, el siguiente campo analizado ha sido la autogeneración eléctrica mediante energías renovables, en la que se han estudiado los sistemas basados en energía solar, eólica y de biomasa. Al ser los aeropuertos, y especialmente las terminales aeroportuarias, grandes consumidores de energía, de la que gran parte (o incluso la totalidad) es en forma de electricidad, la reducción de emisiones que podrá ser conseguida en con estas técnicas puede ser muy importante. La rentabilidad de estas instalaciones será tanto mayor cuanto más caras sean las tarifas eléctricas a las que pueda optar el aeropuerto, por lo que en un país como España, en el que el coste de la electricidad es relativamente alto y que, además, cuenta con subvenciones para fomentar el crecimiento de las renovables, la utilización de estos sistemas puede proporcionar jugosos beneficios económicos. Las principales conclusiones obtenidas para cada una de estas fuentes han sido:

- **Energía solar.-** La generación eléctrica por energía solar es producida a través de dos sistemas principales: las células fotovoltaicas, en el que la electricidad es generada directamente en estos dispositivos, y los colectores térmicos de alta temperatura, en el que se obtiene vapor de agua para generar electricidad en una turbina de vapor (es usado para la producción de grandes potencias, por lo que no será de aplicación en la mayoría de aeropuertos). De entre ellos, el que goza de mayor aplicación en nuestro caso son las placas fotovoltaicas, sistema que en la actualidad resulta muy competitivo y rentable, y que debe ser una medida de estudio prioritario en aeropuertos que disfruten de altos valores de insolación anual. Por contra, el uso en aeropuertos de estos dispositivos ha levantado muchas dudas en cuanto a sus implicaciones en materia de seguridad en las operaciones, no obstante, varios de estos supuestos riesgos, como la atracción de aves, o el deslumbramiento de los pilotos, resultan infundados o de poca relevancia, mientras que otros, como el peligro de colisión con aeronaves pueden ser fácilmente evitados eligiendo una buena localización.
- **Energía eólica.-** Como hemos visto, los aerogeneradores o turbinas eólicas son las máquinas que nos permiten obtener electricidad de la energía del viento, y de modo análogo al caso de los paneles solares, éstas serán tanto más rentables cuanto mayor sea la velocidad media del viento en el emplazamiento en el que son instaladas. En la actualidad, estos aparatos se clasifican fundamentalmente en dos tipos distintos en función, principalmente, de la potencia que son capaces de conseguir: aerogeneradores convencionales (>100 kW) y micro-turbinas eólicas (<100 kW). Aunque ambos modelos pueden ser usados en aeropuertos, el uso de las turbinas convencionales cuenta con el importante obstáculo de su altura, la cual vendrá limitada por la Superficie Horizontal Interna. Por esta razón, las micro-turbinas eólicas suelen ser preferibles, ya que las torres más altas para estos modelos no suelen sobrepasar los 30 m de altura, además, dentro de este grupo conviene considerar el uso de las micro-turbinas de eje vertical, cuyo desarrollo es relativamente reciente, y que proporcionan muchas ventajas frente a sus competidoras de eje horizontal (menor nivel de ruido, mayor versatilidad, etc.), aunque a un coste generalmente mayor.
- **Energía de biomasa.-** Existen diversos métodos para la generación eléctrica a través de la biomasa, ya sea quemando ésta de forma directa, o incorporando procesos intermedios para su transformación en combustibles más eficientes como el syngas o el biogás. Los costes de esta tecnología serán en general bastante elevados, por lo que, para conseguir que este sistema sea rentable, será un requisito imprescindible la posibilidad de contar con un suministro regular de biomasa a bajo coste, circunstancia que solo será posible en algunos casos.

Los tres últimos capítulos de este estudio recogen las medidas que en general se situarán dentro del Alcance 3 en la mayoría de aeropuertos, sin embargo, una recopilación exhaustiva de éstas ha sido llevada a cabo, ya que su potencial para reducir las emisiones en el aeropuerto puede ser bastante grande. En primer lugar, se han considerado las emisiones generadas por los equipos de asistencia en tierra a las aeronaves, de los que solo una parte de los cuales pertenecerá, en general, al gestor aeroportuario y por tanto podrá considerarse dentro del Alcance 1. Dentro de las medidas vistas en este capítulo cabe destacar la utilización de sistemas subterráneos o centrales, en su defecto, para el abastecimiento eléctrico y de aire pre-acondicionado a las aeronaves, y así evitar la necesidad de usar vehículos para desplazar los equipos ACU y GPU hasta las aeronaves. El caso de los sistemas subterráneos puede ser usado además para el suministro de combustible, lo que ahorraría la necesidad de disponer de los camiones cisterna, sin embargo, la construcción de estos sistemas es muy costosa y suele conllevar el cierre temporal de la plataforma. Otra medida importante para reducir las emisiones de estos vehículos consiste en la utilización de combustibles alternativos menos contaminantes que el diésel o la gasolina. Tras realizar un análisis, tanto a nivel de emisiones, como económico y técnico de los combustibles alternativos más importantes, se considera que aquellos que mayores ventajas presentan son:

- **Electricidad.-** Actualmente existen modelos 100% eléctricos o híbridos para prácticamente todos los

tipos de GSE, los cuales pueden sustituir a los modelos diésel o gasolina existentes en el aeropuerto y así conseguir no solo una reducción de las emisiones, sino también de los costes operacionales. Como es obvio, estos beneficios dependerán del mix eléctrico así como del precio de las tarifas disponibles en el emplazamiento del aeropuerto. Entre las ventajas de este combustible destacan: menor coste por distancia recorrida (generalmente), gastos de mantenimiento de hasta un 70% menores, mayor maniobrabilidad y aceleración, y reducción del ruido emitido. Sus principales desventajas son es el alto coste de fabricación de las baterías, lo que eleva considerablemente el precio de adquisición de estos vehículos, y la necesidad de disponer de puntos de recarga en el aeropuerto, lo que supondrá una inversión adicional.

- **CNG y LPG.-** El gas natural comprimido y los gases licuados del petróleo presentan las mismas ventajas frente a los combustibles tradicionales, a saber: menor nivel de emisiones y menor coste de adquisición y de mantenimiento. Sin embargo, su densidad energética es mucho menor a la de éstos, por lo que solo son viables en vehículos que puedan incorporar grandes depósitos para su almacenaje, y que cuenten con una carga de trabajo lo suficientemente grande que permita recuperar la inversión. Los autobuses que operen en el aeropuerto pueden ser buenos candidatos para el empleo de estos combustibles.
- **Bioetanol y biodiesel.-** Estos biocombustibles pueden sustituir a la gasolina y al diésel mezclados con éstos en diferentes proporciones, y reducir significativamente las emisiones generadas, especialmente en el caso del bioetanol obtenido de la madera y del biodiésel obtenido de grasas. Sin embargo, su precio es elevado en muchos lugares, como en España, por lo que la utilización de estos combustibles, en general, no será rentable, y además, pueden ocasionar problemas ecológicos, causando deforestación y aumentando el precio de algunos alimentos a cuyos cultivos sustituyen.

Tras analizar el campo de las emisiones producidas por la operación de los GSE ha sido el turno de aquellas ocasionadas por los desplazamientos de pasajeros y personal desde y hacia el aeropuerto. En este nuevo capítulo se ha introducido una larga lista de medidas, orientadas principalmente a favorecer la elección por parte de éstos de modos de transporte menos contaminantes, como trenes o autobuses, en lugar de taxis o vehículos particulares. Se ha visto que un objetivo fundamental a este respecto debe ser la reducción de los desplazamientos de pasajeros del tipo *kiss-and-fly*, ya que éstos serán responsables de un gran volumen de emisiones.

Las estrategias introducidas se dividen, principalmente, entre aquellas destinadas a los pasajeros y aquellas específicas para los trabajadores del aeropuerto, tanto los pertenecientes al gestor aeroportuario, como al resto de trabajadores del aeropuerto sobre los que éste tendrá menor capacidad de control (Alcance 3) y que constituirán la mayoría de los trabajadores del aeropuerto. A su vez, otra importante subdivisión puede ser realizada en función de si estas medidas suponen un estímulo para favorecer la elección de uno o varios modos de transporte frente a otros, o si, por el contrario, buscan disuadir a los usuarios de la elección de un cierto tipo o tipos de transporte. En la práctica, este último grupo de medidas resulta impopular, ya que tiende a afectar a la competitividad del aeropuerto, por lo que siempre será preferible optar por medidas incentivadoras. Las principales medidas son:

- **Pasajeros**
 - **Incentivadoras.-** Fomento del transporte público mediante la mejora de las conexiones, y descuentos del parking para vehículos eléctricos.
 - **Disuasorias.-** Tasas por los desplazamientos *kiss-and-fly*, y favorecimiento de las zonas de descarga de vehículos públicos frente a las de vehículos privados.
- **Trabajadores**
 - **Incentivadoras.-** Ofrecer subsidios por la utilización de transportes públicos, facilitar el uso de vehículos compartidos, y dotar a los empleados de mayor flexibilidad laboral.
 - **Disuasorias.-** Eliminar los descuentos por el uso del parking.

Finalmente, las últimas medidas tratadas en este estudio han sido las relativas a las aeronaves, las cuales generan emisiones por la operación de los motores y de las unidades APU. Las principales medidas concernientes a los motores son la utilización de combustibles alternativos y las medidas relativas a las operaciones en el aeropuerto. Por su parte, la utilización de nuevos combustibles avanza lentamente y la influencia de los gestores aeroportuarios en este proceso es muy pequeña, sin embargo, estos podrán influir mucho más en el aspecto operacional. Las principales medidas operacionales son la implementación de la maniobra de Aproximación por

Descenso Continuo, la reducción de los tiempos de taxi, el empleo de un solo motor, y el arrastre de las aeronaves mediante tractores. Las emisiones de la APU, por su parte, podrán ser disminuidas con la utilización de GSEs más eficientes. La puesta en marcha de estas estrategias presentará, no obstante, bastantes problemas, por ejemplo, en el caso del CDA se necesita una capacidad técnica apropiada, que en muchos casos no está disponible, mientras que la realización de la fase de taxi con un solo motor introduce algunos riesgos de seguridad, o el uso de tractores alarga excesivamente el tiempo de taxi.

Para finalizar, y con el propósito de realizar un filtro final para el conjunto de medidas vistas en este Proyecto, se ha realizado una tabla en la que se reúnen aquellas medidas que, en base a la información recopilada, poseerán en general mayor potencial de reducción de emisiones dentro de las principales áreas analizadas, y cuyo control recae enteramente, o al menos en gran parte, sobre el gestor aeroportuario. Se han descartado aquellas que presentan problemas serios de viabilidad económica, como la generación eléctrica por biomasa, o aquellas que pueden presentar mayores problemas técnicos, como es el caso de los aerogeneradores convencionales. Las medidas aquí destacadas serán, por tanto, aquellas cuya implantación debemos considerar en la segunda parte de este Proyecto para reducir las emisiones de nuestro aeropuerto.

ÁREA	MEDIDAS	
Climatización	Sustitución de sistemas de generación por otros más eficientes o menos contaminantes	Sistemas recomendados: <ul style="list-style-type: none"> • Calefacción <ul style="list-style-type: none"> ○ Calderas de biomasa ○ Caldera de gas natural • Refrigeración <ul style="list-style-type: none"> ○ Enfriadoras de refrigeración por agua • Calor + Frío <ul style="list-style-type: none"> ○ Instalación geotérmica ○ Bomba de calor aerotérmica de alta eficiencia ○ Cogeneración/trigeneración
Iluminación	Sustitución de lámparas ineficientes por modelos más eficientes	Lámparas recomendadas: <ul style="list-style-type: none"> • Iluminación interior <ul style="list-style-type: none"> ○ Fluorescentes ○ LEDs • Iluminación exterior <ul style="list-style-type: none"> ○ Descarga de vapor de sodio de baja presión • Iluminación de aeródromo <ul style="list-style-type: none"> ○ HID de halogenuros metálicos (plataforma). ○ LEDs (luces de superficie y ayudas visuales)
Autogeneración eléctrica	Utilización de fuentes de generación renovables	Instalaciones recomendadas: <ul style="list-style-type: none"> • Instalación fotovoltaica • Instalación micro-eólica

Equipos de Asistencia en Tierra a las Aeronaves	Sustitución de equipos móviles por equipos fijos	Sustitución de sistemas <i>Point-of-use</i> por sistemas centrales y/o subterráneos.
	Sustitución de equipos diésel o gasolina	Modelos recomendados: <ul style="list-style-type: none"> • Eléctricos (BEV) • CNG o LPG

Tabla 15.- Principales medidas analizadas.

Sección Segunda

10 AEROPUERTO OBJETIVO

El aeropuerto elegido para realizar la implantación de algunas las medidas expuestas en los capítulos anteriores ha sido el Aeropuerto de Sevilla-San Pablo. En este capítulo se recopilará información relevante del mismo o que pueda ser de útil para el propósito de este proyecto. La información ha sido obtenida a partir de (Aeropuerto de Sevilla 2012), (Aeropuerto de Sevilla 2001) y (Aena Aeropuertos 2011).



Imagen 42.- Vista del Aeropuerto de Sevilla⁶³.

10.1 Características generales

A lo largo de este apartado se presentará información básica del aeropuerto.

10.1.1 Información General

El Aeropuerto de Sevilla-San Pablo se encuentra situado a 10 km al noroeste de Sevilla y dispone de una superficie de aproximadamente 535,6 hectáreas, de las cuales unas 372 corresponden a terreno natural. Su área está ubicada en los términos municipales de Sevilla (la mayor parte) y La Rinconada. Actualmente se encuentra gestionado por AENA S.A. y cuenta con una única pista con denominación 09-27. Otras de sus características generales más importantes son:

Indicativo OACI/IATA	LEZL/SVQ
Tipo	Aeropuerto Civil
Clase	Internacional
Categoría OACI	4E
Categoría Administrativa	1ª

⁶³ Fuente: <http://sevilla.abc.es> (Raúl Doblado).

Elevación	34 m
Coordenadas geográficas (ARP) (WGS-84)	37° 25' 04,51" N
	05° 53' 56,09" O
Temperatura de Referencia	35°C
Operatividad Pista	09 – Instrumental No precisión Utilización: 2%
	27 – ILS CAT I Utilización: 98%
Aeropuertos Alternativos	Málaga y Jerez
Horario	De 4:30 a.m. a 1:30 a.m.

Tabla 16.- Datos generales del Aeropuerto de Sevilla.

10.1.2 Estadísticas de Tráfico Aéreo

Según la información disponible en la página web de AENA, el Aeropuerto de Sevilla ocupó en 2014 la posición decimotercera de los aeropuertos españoles en número de pasajeros, sirviendo a un total de 3.884.146 pasajeros, lo que significó un aumento de un 5,3% respecto al año anterior (la media española fue del 4,5%). En este año hubo además un aumento de un 1,9% en las operaciones, hasta las 42.380, así como de un incremento en el volumen de mercancías del 10,8% hasta los 5.639.473 kilos.

10.1.2.1 Volumen y evolución del tráfico

La evolución en el número de pasajeros, volumen de mercancías y operaciones totales, durante el periodo 1999-2014, viene recogido en las siguientes gráficas:

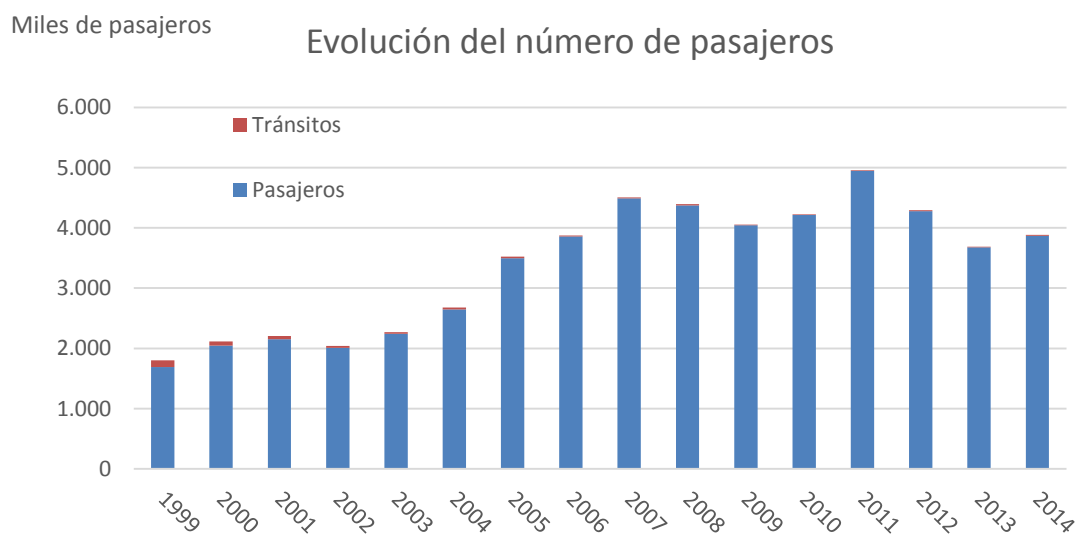


Gráfico 14.- Evolución del número de pasajeros en el Aeropuerto de Sevilla.

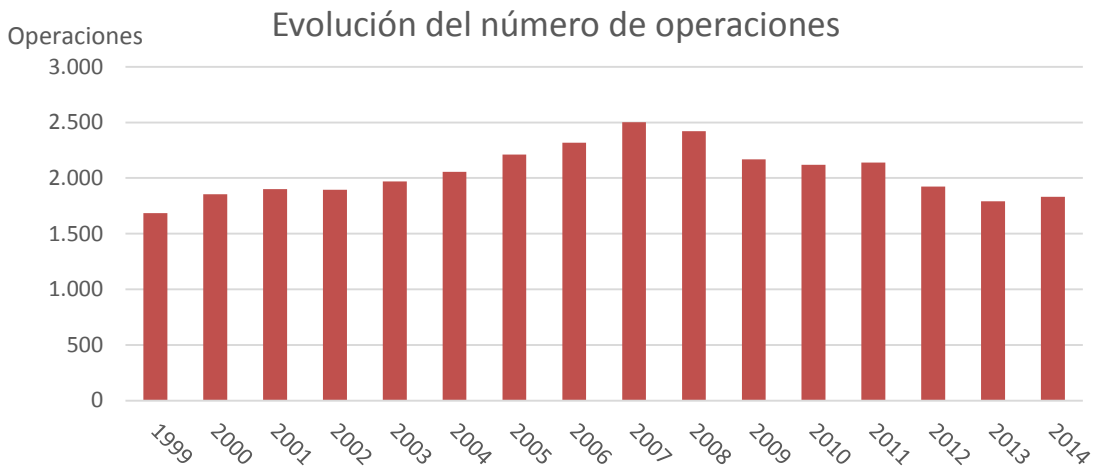


Gráfico 15.- Evolución del número de operaciones.

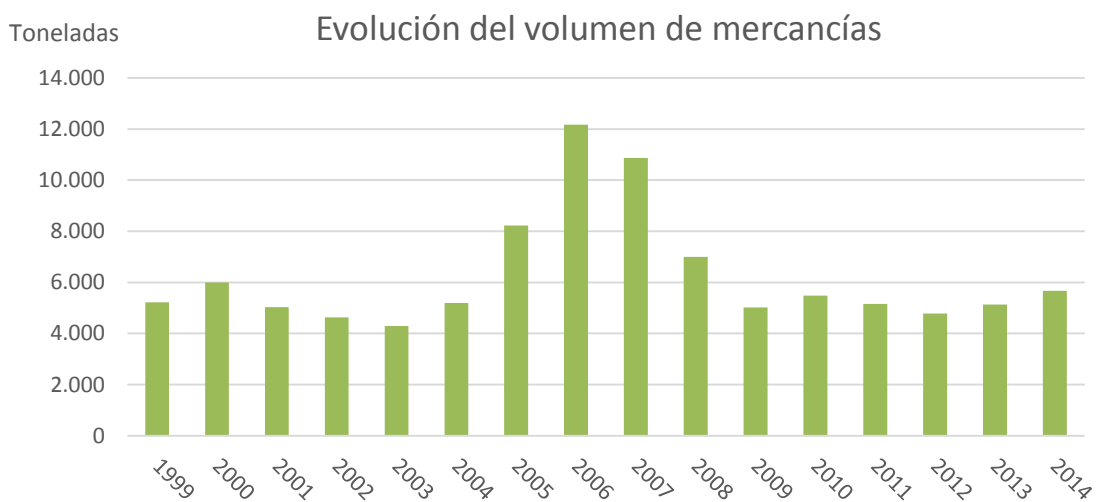


Gráfico 16.- Evolución del volumen de mercancías.

10.1.2.2 Distribución del tráfico de pasajeros

El tráfico en el Aeropuerto de Sevilla es principalmente de carácter nacional. Desagregando el tráfico en Nacional/Internacional Schengen/ Internacional no Schengen (Gráfico 17), se aprecia que más de la mitad de los pasajeros realizan vuelos domésticos, y que la gran mayoría de los vuelos internacionales realizados se efectúan desde o hacia un país incluido en el Acuerdo de Schengen.

Por otra parte, en la Gráfico 18, se realiza el desglose de los vuelos en Regulares/ No Regulares/Otras Clases, de lo que se aprecia con claridad que la actividad del aeropuerto está dominada por los vuelos regulares, los cuales constituyen más de un 95% del total.

Distribución Tráfico de Pasajeros 2014

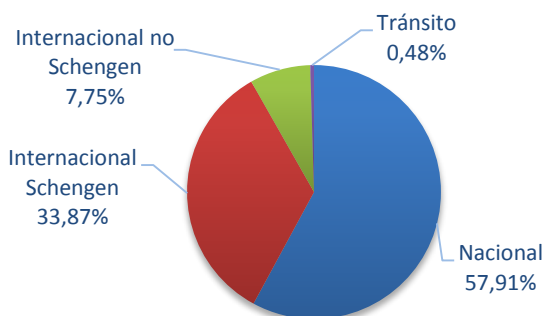


Gráfico 17.- Distribución del tráfico de pasajeros.

Distribución Tráfico Regular/ No Regular 2014

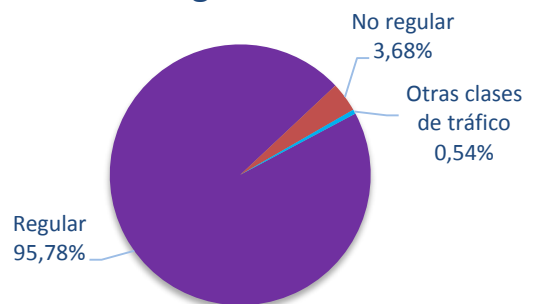


Gráfico 18.- Distribución del tipo de tráfico.

En la siguiente tabla, se muestra la distribución del tráfico en función de los distintos segmentos de vuelo:

Tráfico de pasajeros 2014	
Nacionales	2.249.206
Regular	2.175.568
Chárter	72.064
Internacional	1.616.402
Regular	1.561.195
Chárter	53.602
Tránsito	18.538
Otras clases de tráfico	3.179
TOTAL	3.884.146

Tabla 17.- Distribución del tráfico de pasajeros.

La estacionalidad del tráfico del aeropuerto se ve reflejada en la siguiente gráfica compuesta a partir de los datos mensuales de 2014:



Gráfico 19.- Estacionalidad del tráfico.

10.1.3 Instalaciones

A continuación se procederá a realizar una breve descripción de las principales instalaciones dentro del Aeropuerto de Sevilla, en la que nos detendremos especialmente en el Edificio Terminal.

10.1.3.1 Edificio Terminal de Pasajeros

Fue diseñado por el arquitecto sevillano Rafael Moneo e inaugurado en el año 1991, posee un total cinco plantas, que de menor a mayor, y tomando como cota cero la cota de la plataforma, corresponden a las zonas de llegadas (0), entreplanta (+2,9), salidas (+6) y bloque técnico (+9,9) y sótano (-4,40). Las superficies más representativas son:

Superficie total (m²)	69.055,33	Zonas comunes (m²)	69.055,33
Superficie calefactada (m²)	31.699,31	Aseos (m²)	31.699,31
Superficie refrigeración (m²)	31.918,66	Oficinas y concesionarios (m²)	31.918,66
Superficie ventilada (m²)	1.832,25	Salas técnicas (m²)	1.832,25
Superficie iluminada (m²)	54.425,23	Otros usos (m²)	54.425,23

Tabla 18.- Principales superficies del Edificio Terminal⁶⁴.

La fachada del Lado Aire se encuentra orientada al Sureste, mientras que la fachada del Lado Tierra se encuentra orientada al Noroeste.

10.1.3.1.1 Llegadas

La zona de llegadas se encuentra bajo la zona de salidas a cota 0. Los pasajeros pueden acceder a ésta por dos medios, bien descendiendo desde el avión por pasarela previo paso por la entreplanta, o bien directamente a través de dos puertas de acceso en caso de estacionamiento remoto. Los pasajeros, en primer lugar, se dirigen a la Sala de Recogida de Equipajes, la cual cuenta con seis hipódromos, y se encuentra subdividida en una sala B para vuelos nacionales o Schengen, y sala A, destinada a vuelos internacionales puros o comunitarios no Schengen, a la que se accede a través de un control de pasaportes situado junto a una oficina de la policía nacional. Además, cuenta con un control de aduanas tras la recogida de equipajes para pasajeros de vuelos procedentes de países que no pertenezcan a la Unión Europea.

Finalmente se accede al Vestíbulo de Llegadas, en el que existen locales comerciales de alquiler de vehículos, oficina de información de equipajes, oficina de AENA, cafetería, oficina de turismo de la Junta de Andalucía... entre otros muchos servicios. En el exterior del vestíbulo de llegadas se encuentra la acera de llegadas, en la que los pasajeros pueden acceder a distintos medios de transporte (taxi, autobús, coche particular o de alquiler) para abandonar el aeropuerto.

10.1.3.1.2 Entreplanta

Es de acceso público casi en su totalidad, formada por pasillos y corredores para el tránsito de pasajeros de llegadas y salidas.

10.1.3.1.3 Salidas

Consta, en primer lugar, del Vestíbulo de Salidas, en el que están dispuestos un total de 42 mostradores de facturación, zonas de espera, y otros comercios y servicios del aeropuerto. Desde este vestíbulo se puede acceder al Filtro de Pasajeros (control de seguridad), el cual consta de 3 arcos detectores y 2 unidades de rayos X, y da acceso a la zona de preembarque o Zona Comercial, en la que encontramos una zona de espera, tiendas libres de impuestos, cafeterías, y otros servicios, y que, a su vez, da acceso a las 8 salas de embarque de doble altura existentes. El embarque es realizado, finalmente, o bien mediante el uso de alguna de las 5 pasarelas telescópicas existentes, o bien descendiendo a plataforma mediante rampas si la aeronave se encuentra en alguno de los estacionamientos remotos. Existen zonas de control de pasaportes en las salas de embarque que dan servicio a vuelos no Schengen.

10.1.3.1.4 Bloque técnico

Planta restringida a personal autorizado. También se ubican salas de climatización donde se encuentran algunos

⁶⁴ Fuente: Datos proporcionados por el Aeropuerto de Sevilla.

equipos que dan servicio a zonas concretas del edificio.

10.1.3.1.5 Sótano

Zona de acceso restringido. Entre las instalaciones que aquí se encuentran figuran una Central Termofrigorífica, con algunos equipos de climatización, y la Sala de Alta Tensión, en la que se realiza la transformación de la electricidad consumida en la Terminal.

10.1.3.1.6 Cubierta

Dispone de áreas transitables a varias alturas, en ella se encuentran instaladas varias unidades climatizadoras.

10.1.3.2 Edificio Terminal de Mercancías

Está situado al oeste del Edificio Terminal de Pasajeros, ocupa una superficie aproximada de 5.943 m², y cuenta con una sola planta al nivel de la plataforma (cota 0). Este edificio cuenta con un aparcamiento propio para empleados y con una zona de carga y descarga situada en el lado tierra del Terminal. En él operan un buen número de compañías de entre las que destaca Iberia.

10.1.3.3 Zona de Servicios

- **Torre de Control.-** Construida en 1986. Cuenta con una superficie construida de 1.800 m² y una altura de 31,5 m.
- **Edificio de Salvamento y Extinción de Incendios (SEI).-** Posee categoría OACI 7, con un tiempo de respuesta de 2 minutos. Dispone de 3 vehículos con una capacidad de 1.000 l y una con una capacidad de 500 l. Posee una superficie de 1.585 m², divididas en cocheras, taller, almacén, gimnasio, vestuarios, sauna y sala de descanso, etc.
- **Almacenes y Talleres.-** Se trata de una nave que cuenta con cocheras, almacenes, taller de carpintería y otros servicios. Posee una superficie aproximada de 2.800 m² y está situado al este de la Terminal de Pasajeros.
- **Catering.-** El servicio de catering cuenta un edificio con una superficie de unos 450 m², situado al norte de la Central Eléctrica.
- **Halconera.-** Constituido por una caseta y una zona verde aneja destinada al ejercicio de la cetrería con halcones. Se mantiene con el propósito de alejar a la población de perdices del aeródromo, ya que éstas suponen un peligro para las operaciones de las aeronaves.
- **Antiguo Edificio Terminal de Pasajeros.-** Operativo hasta el año 1991. Actualmente es usado para celebrar congresos, exposiciones, etc.

10.1.3.4 Zona de abastecimiento

Comprende a las instalaciones cuya función es abastecer al aeropuerto de combustible para aviones, electricidad y agua. Las actividades aquí realizadas son:

10.1.3.4.1 Almacenamiento y Servicio de combustible

Las actividades de almacenamiento y distribución del combustible son realizadas por una empresa en régimen de concesión y son realizadas en dos parcelas, una destinada al almacenamiento, y una segunda destinada a la distribución:

- **Almacenamiento.-** El combustible (Jet A-1) es almacenado en tres tanques verticales aéreos de 1.500 m³ de reciente construcción.
- **Distribución.-** El combustible es enviado a la parcela de distribución mediante una red de tuberías, y allí es cargado en los camiones que llevan el combustible a las aeronaves

10.1.3.4.2 Central Eléctrica y distribución de energía

La Central Eléctrica recibe suministro en alta tensión en régimen de mercado libre a través de dos líneas, una prioritaria y otra secundaria, ambas con una tensión de 15 kV, para una potencia contratada de 2.500 kW. Es a través de la Central Eléctrica que esta electricidad se transforma y distribuye en media y alta tensión al resto de

subestaciones del aeropuerto, entre las que se encuentra la Sala de Alta Tensión del Edificio Terminal, situada en el sótano del mismo, la cual consta de cuatro transformadores de 1.000 kVA, que reciben en 15 kV y transforman a 400 – 231 V, y dos transformadores también de 1.000 kVA, que reciben en 3 kV y transforman a 400 – 231 V. Este edificio se encuentra al este de la plataforma de estacionamiento de aeronaves y del Terminal de pasajeros y cuenta con una superficie de unos 1.415 m². Anualmente por esta central pasan unos 15 GWh, siendo el consumo por pasajero de entorno a los 3,57 kWh.

Además, para garantizar el suministro, se dispone de un conjunto de 3 Grupos Electrónicos alimentados por gasóleo, los cuales pueden generar una potencia de hasta 1.000 kVA a 3 kV cada uno. Junto a estos equipos se dispone, además, de 2 Grupos de Continuidad. El número de horas anuales durante las cuales estos generadores se encuentran operativos es muy reducido. En particular, durante el año 2012, funcionaron un total de 62,6 horas entre los cinco.

10.1.3.4.3 Abastecimiento de agua

El agua para consumo humano es suministrada por la empresa EMASESA. Esta agua proviene directamente de la red municipal de Sevilla y es distribuida a todos los edificios y dependencias mediante una red de distribución interna gestionada por el aeropuerto. Por otro lado, el agua para riego de zonas verdes y las zonas agrícolas que el aeropuerto posee en régimen de concesión, es obtenida de varios pozos dentro del recinto aeroportuario. En el año 2012 se consumieron 51.026 m³ de agua de la red pública, y otros 23.617 m³ fueron utilizados para riego.

10.1.3.5 Aparcamientos

El aparcamiento del aeropuerto es empleado por los pasajeros, empleados y las empresas de alquiler de vehículos que operan en el mismo.

10.1.3.6 Otras Instalaciones

- **Instalaciones Militares.-** Existen 2 hangares de la Maestranza Aérea al sur del eje de la pista de vuelo y dos pequeños edificios pertenecientes a la Comandancia Militar Aérea.
- **Airbus Military.-** Se trata de unas instalaciones pertenecientes a la empresa Airbus situadas en su mayor parte al sur de la pista de vuelo, las cuales cuentan con una extensión total aproximada de 1.100.000 m². Actualmente aloja la Línea de Ensamblaje Final (FAL) del avión militar A400M, además también se producen y ensamblan los aviones C212, CN235 y C295. La división de las instalaciones situada al norte de la pista (Airbus Military Norte) acoge el MRO (Maintenance, Repair & Operations) Service Center, dedicado a tareas de mantenimiento.
- **Centro de Control de Tráfico Aéreo.-** Se encuentra al sur de la pista de vuelo, en las proximidades de la Torre de Control. Alberga la Dirección Regional de Navegación Aérea Sur, en la que se incluye el Área de Control Terminal (TMA por sus siglas en inglés) del aeropuerto de Sevilla.
- **Otros hangares.-** Existen otros 2 hangares importantes, uno perteneciente a la Dirección General de Tráfico, y otro a la Dirección General de Policía.

10.1.3.7 Accesos al aeropuerto

El área de influencia del aeropuerto de Sevilla limitada por la isócrona de 30 minutos contiene aproximadamente a millón y medio de personas, mientras que, si consideramos la isócrona de una hora, la población aumenta hasta los 2,2 millones de personas. Considerando por último las dos horas, esta llega hasta los 4,45 millones.

El aeropuerto es accesible por carretera a través de la autovía A-4 (Sevilla – Córdoba – Madrid), encontrándose muy cerca del nudo noreste de la SE-30. También se encuentra conectada hacia el este con la SE-40. Se trata por tanto de un aeropuerto muy bien comunicado por carretera para la mayoría de la población dentro de su área de influencia.

Los medios de transporte más empleados para acceder al aeropuerto son el vehículo particular, el vehículo de alquiler, y el taxi. También existe una línea regular de autobuses que presta servicio al aeropuerto

Según una encuesta realizada poco antes de la aprobación del Plan Director en el año 2001, el 61% de los pasajeros usaban su vehículo particular, mientras que el 39% restante viaja en taxi o vehículo de alquiler, el porcentaje de los pasajeros que se decantaban por el autobús era prácticamente nulo.

10.2 Emisiones

Las emisiones generadas en el aeropuerto provienen del consumo energético producido, ya sea en forma de energía eléctrica para climatización, iluminación u otros usos; o por la combustión de los combustibles para vehículos, GSE o aeronaves. Las más importantes de estas fuentes de emisiones, clasificadas en función de la capacidad que el gestor aeroportuario dispone para actuar sobre ellas, tal como se definió en la Tabla 2, son:

Alcance 1	- Grupos Electrógenos
Alcance 2	- Consumo eléctrico del aeropuerto, principalmente: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Climatización ▪ Iluminación ▪ Resto de cargas eléctricas
Alcance 3	- Aeronaves y APU - GSE (Iberia y Groundforce) - Desplazamientos personal y pasajeros hacia/desde el aeropuerto

Tabla 19.- Clasificación de las principales fuentes de emisiones del aeropuerto⁶⁵.

En nuestro estudio obviaremos aquellas emisiones pertenecientes al Alcance 3, para el que las medidas de reducción de emisiones aplicables tendrían en general mayores dificultades de implantación en la práctica, ya que escaparían en gran medida del control del gestor aeroportuario. En su lugar nos centraremos en aquellas pertenecientes al Alcance 1 y 2, es decir, aquellas relativas al consumo eléctrico en el aeropuerto y la generación de electricidad mediante los Grupos Electrógenos.

10.2.1 Emisiones por el consumo eléctrico en la Terminal.

En el aeropuerto solo existe un contador para medir el consumo en la Central Eléctrica, por lo que no se disponen de datos desglosados, solo de datos de consumo para el aeropuerto completo. En la siguiente gráfica se presentan los valores medios de estas mediciones para los años 2009-2014:

Consumo eléctrico medio 2009-2014

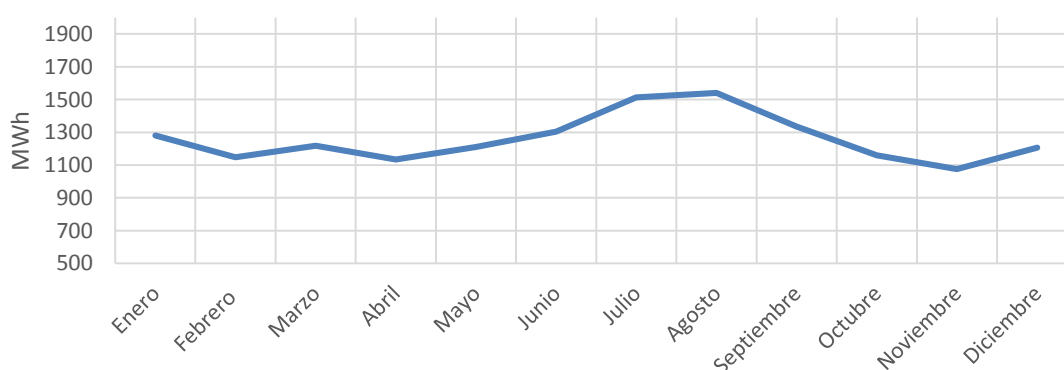


Gráfico 20.- Evolución estacional del consumo eléctrico en el Aeropuerto de Sevilla⁶⁶.

Como vemos, el consumo eléctrico presenta valles durante los meses de primavera y otoño, un pequeño pico en invierno, y un importante incremento durante los meses de verano. Este comportamiento es, sin duda, debido al aumento en las demandas de calefacción y refrigeración, respectivamente, durante estos periodos, lo cual es

⁶⁵ A varias de estas fuentes les pueden pertenecer más de un nivel de alcance. Por ejemplo este es el caso de la climatización, ya que parte de la misma pertenece a los concesionarios, y por tanto, también se sitúa dentro del Alcance 3. No obstante, en estos casos, se les ha asignado el alcance principal en el que se inscriben, ya que siempre encontramos un nivel de alcance que prevalece sobre el resto.

⁶⁶ Fuente: (Aena Aeropuertos 2011).

indicativo del papel relevante de la climatización, especialmente la refrigeración, en el consumo total del aeropuerto.

El consumo medio anual para este periodo es de 15.126 MWh. Para esta cifra, conociendo las emisiones medias generadas en España por unidad de potencia eléctrica consumida, obtenemos una estimación de las emisiones generadas de 9.817 toneladas de CO₂ anuales.

Aunque, como se ha dicho, no existe un desglose del consumo eléctrico por instalaciones por existir solo un contador, en un estudio realizado durante el año 2011 en el aeropuerto (Aena Aeropuertos 2011), se determinó que el consumo correspondiente al Edificio Terminal es aproximadamente un 68% del total, es decir, unos 10.700 MWh; mientras el resto del consumo eléctrico en el aeropuerto es ocasionado por:

- Alumbrado de los parkings.
- Iluminación del campo de vuelo y hangares.
- Iluminación de plataforma, especialmente las llamadas Torres Mega.
- Edificio del SEI (Servicio de Extinción de Incendios).
- Antiguo Edificio Terminal.

A su vez un desglose del consumo debido a las distintas instalaciones dentro del Edificio Terminal se muestra a continuación:

Instalación	Consumo (kWh)	Emisiones (Tn)
Refrigeración	4.730.286	3070,0
Concesionarios	1.732.246	1124,2
Iluminación	1.369.635	888,9
Calefacción	1.241.582	805,8
Señalética	717.289,1	465,5
Otros	319.661,7	207,5
SIEB ⁶⁷	194.934,5	126,5
Equipos Ofimáticos	142.785,6	92,7
Ascensores y escaleras	88.745,37	57,6
CPD ⁶⁸	87.600	56,9
Extractores	32.981,4	21,4
Megafonía	11.916,01	7,7
ACS	9.477	6,2
TOTAL		6.930,8

Tabla 20.- Consumo energético por instalaciones en la Edificio Terminal⁶⁹.

Distribución del consumo eléctrico en la Terminal

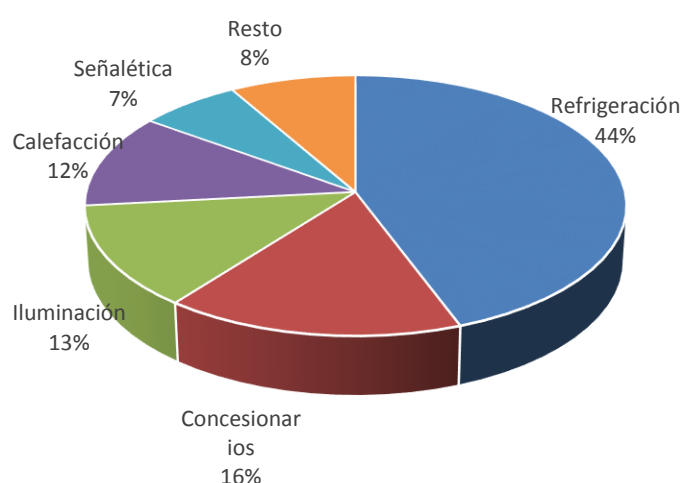


Gráfico 21.- Distribución del consumo eléctrico en Edificio Terminal⁶⁹.

Como podemos ver, la mayor parte del consumo anual en el Edificio Terminal es debido a las instalaciones de refrigeración. Tras éste, el consumo más importante es el ocasionado por los concesionarios, seguido por la iluminación, la calefacción, la señalética, y finalmente el resto de sistemas (SIEB, equipos ofimáticos, ascensores y escaleras automáticas, etc.), los cuales comprenden el 8% restante del consumo. Conviene recordar que el

⁶⁷ Sistema de Inspección de Equipajes de Bodega

⁶⁸ Centro de Procesamiento de Datos.

⁶⁹ Fuente: (Aena Aeropuertos 2011).

consumo ocasionado por los concesionarios será principalmente debido a la refrigeración, iluminación, calefacción y equipos ofimáticos, sin embargo, este consumo se sitúa dentro del alcance 3, sobre el que el gestor aeroportuario poseerá un control limitado, y que, por tanto, ignoraremos en nuestro análisis.

10.2.2 Emisiones de los Grupos Electrónicos

Como se comentó anteriormente, en el aeropuerto hay un total de 5 Grupos Electrónicos, cuyo consumo varía año a año en función del número de horas que son necesarios para abastecer de electricidad al aeropuerto en casos de corte del suministro. Las emisiones generadas por el conjunto de estos equipos, calculadas a partir de los datos de consumos anuales, vienen recogidas en la siguiente gráfica.

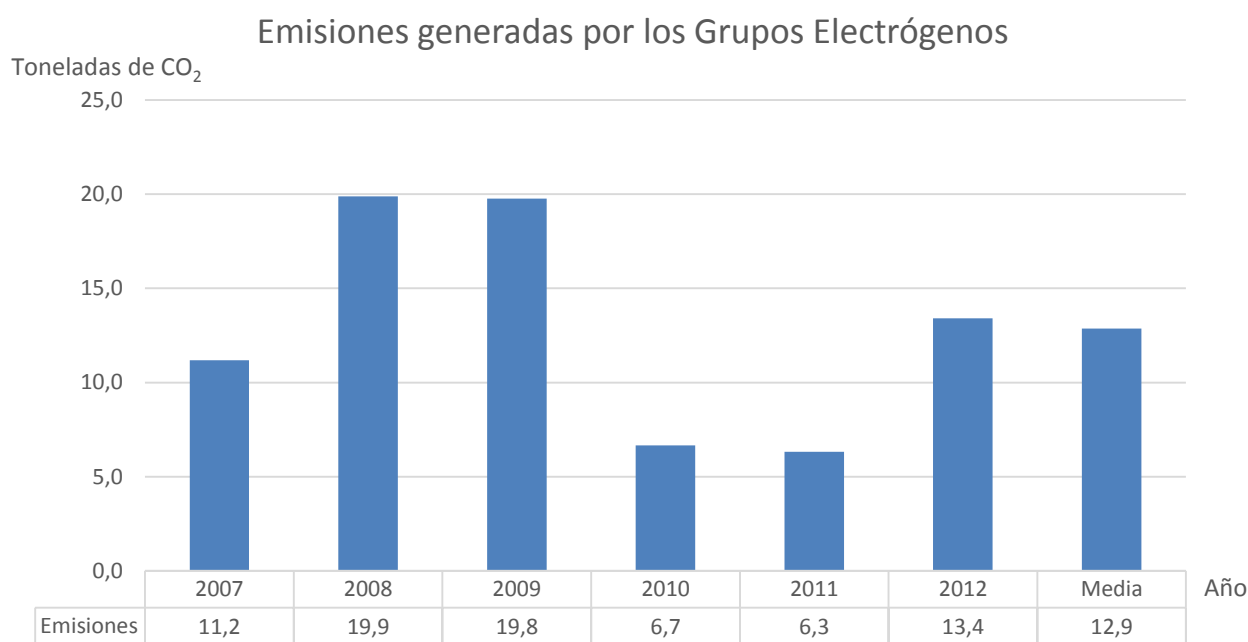


Gráfico 22.- Emisiones generados por los grupos electrónicos⁷⁰.

En particular, para esta serie histórica se tuvo una media de 4.300 litros anuales de gasoil consumido, lo que supone unas emisiones medias anuales aproximadas de 11,2 toneladas de CO₂. Las emisiones generadas por estos equipos serán por tanto despreciables respecto al total de emisiones generadas en el aeropuerto.

Podemos finalmente concluir que, el principal foco de emisiones en el aeropuerto, excluyendo aquellos pertenecientes al Alcance 3, será el consumo eléctrico del Edificio Terminal. Convendrá por tanto aplicar medidas que reduzcan las emisiones generadas por este consumo, como puede ser la instalación de sistemas de generación eléctrica basados en energías renovables. Por otro lado, medidas que disminuyan el consumo de climatización pueden ser también muy recomendables debido a la importancia de ésta en el consumo total.

10.2.3 Política en materia de emisiones

El aeropuerto mantiene un Sistema de Gestión Ambiental implantado desde el año 2002, el cual está basado en los requisitos especificados en la Norma Internacional UNE-EN-ISO 14001/2004. Posteriormente, a raíz de la adopción de la Norma UNE-EN-ISO 9001:2008, el Sistema de Gestión Ambiental pasó a estar contenido en el Sistema de Gestión Integrado de Calidad y Medio Ambiente, documento que integra ambas normativas. En este último documento se definen periódicamente objetivos y metas medioambientales, cuyo grado de cumplimiento es evaluado y controlado de forma sistemática.

Además, el Aeropuerto de Sevilla asume una política medioambiental y energética aprobada por el Comité de Dirección de Aena Aeropuertos en septiembre de 2011, la cual es aplicada en todos los aeropuertos de su red. Mediante esta política, AENA se compromete a seguir varios principios relacionados con la sostenibilidad medioambiental, entre otros, existe el compromiso de “disponer de la información y recursos necesarios para proponer y alcanzar objetivos de mejora continua en la eficiencia energética, como pieza clave para reducir las

⁷⁰ Fuente: (Aeropuerto de Sevilla 2012).

emisiones de CO₂”, así como de “racionalizar el consumo de energía y de los recursos naturales, a través de la eficiencia energética y la progresiva utilización de las energías renovables”.

Por último, a partir del Plan Operativo de 2012, se creó en el Aeropuerto de Sevilla el Plan de Ahorro Energético, el cual tiene el objetivo de plantear actuaciones para disminuir el consumo de energía eléctrica dentro del aeropuerto. Las principales medidas en este documento recogidas son: el control de iluminación en zonas públicas, la sectorización de luminarias del Edificio Terminal, y la instalación de contadores en diversos edificios y áreas para la obtención de datos de consumo pormenorizados. Otras actuaciones llevadas a cabo han sido la sectorización de la iluminación de aparcamiento, la instalación de lámparas de tipo LED, la rehabilitación de cuadros de baja tensión en la terminal antigua, y una mejora general de la red eléctrica.

11 MEDIDAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES EN EL AEROPUERTO

11.1 Determinación de las medidas de reducción de emisiones para el Aeropuerto de Sevilla

Para acotar el alcance del proyecto solo barajaremos la implantación de las medidas consideradas más importantes de entre las analizadas, las cuales fueron recopiladas en la Tabla 15. Sin embargo, de entre estas medidas debemos descartar aquellas relativas a los equipos de asistencia en tierra de las aeronaves, que en el aeropuerto de Sevilla se situarían dentro del Alcance 3 (handling realizado por Iberia y Groundforce), lo que nos dejaría tan solo 3 medidas:

1. Sustitución de los sistemas de climatización por otros más eficientes.
2. Sustitución de las luminarias por otras más eficientes.
3. Empleo de sistemas de generación eléctrica basados en energías renovables.

Consecuentemente, tal como se acaba de ver en el capítulo de descripción del aeropuerto, la mayoría de las emisiones generadas en éste (excluyendo aquellas pertenecientes al Alcance 3) son debidas al consumo eléctrico del Edificio Terminal, siendo la climatización (56%), la iluminación (13%) y la señalética (7%) los principales responsables de este consumo. El camino lógico a seguir, por tanto, será la aplicación de las medidas anteriores a estas instalaciones en el Edificio Terminal de Pasajeros, sin embargo, ya que el estudio de éstas tres medidas puede resultar muy extenso se ha preferido considerar solo las dos con mayor potencial de reducción de emisiones, esto es; las dos que, a priori, permitan obtener un ahorro mayor de emisiones. A este respecto, resulta evidente que la tercera opción es la que mayor potencial presenta, ya que permitiría reducir prácticamente el 100% de las emisiones por el consumo eléctrico. Con el propósito de determinar cuál de las dos opciones restantes posee mayor potencial, estimaremos de forma rápida la reducción máxima de emisiones que puede esperarse con cada una de ellas.

11.1.1 Estimación del potencial de ahorro por la sustitución de los generadores de Climatización.

La demanda de climatización en el Edificio Terminal es cubierta con máquinas de frío, bombas de calor y equipos autónomos (en su mayoría de tipo Split) cuyos valores de potencia eléctrica y eficiencia nominal para refrigeración y calefacción son conocidos. El máximo ahorro de emisiones se calculará considerando la sustitución de los sistemas existentes por otros más eficientes suponiendo que la demande térmica anual permanecerá constante.

Para una mayor precisión de los cálculos se utilizarán valores de rendimiento estacional en lugar de nominales. Éstos serán estimados para los equipos existentes usando el programa de certificación energética CE3X-GT, el

cual tiene en cuenta el tipo de equipo, su rendimiento nominal, la antigüedad de los mismos⁷¹, el tipo de edificio (en nuestro caso gran terciario), la zona climática en la que se encuentra (B4 en nuestro caso), la intensidad energética (considerada alta) y horas de uso de las instalaciones (conocidas).

Los valores de consumo eléctrico estimados, eficiencias nominales medias y eficiencias estacionales medias estimadas, se presentan a continuación tanto para refrigeración como para calefacción:

Tipo de generador de refrigeración	Consumo anual ⁷² (kWh _e)	Eficiencia media (EER)	Eficiencia media estacional (SEER)
Máquinas de frío	1.800.000	3,32	2,41
Bombas de calor	1.480.000	2,97	2,06
Equipos autónomos	340.000	2,79	1,79
TOTAL	3.620.000	3,13	2,2

Tabla 21.- Eficiencia media de los equipos de refrigeración que abastecen al Edificio Terminal.

Tipo de generador de calefacción	Consumo anual ⁷² (kWh _e)	Eficiencia media nominal (COP)	Eficiencia media estacional (SCOP)
Bombas de calor	540.000	3,27	2,05
Equipos autónomos	120.000	3,08	1,97
TOTAL	660.000	3,24	2,04

Tabla 22.- Eficiencia media de los equipos de calefacción que abastecen al Edificio Terminal.

A continuación estimamos las emisiones en refrigeración que podremos ahorrar sustituyendo estos equipos por otros más eficientes, entre éstos no consideraremos la bomba de calor aerotérmica, ya que la eficiencia de los equipos actuales es suficientemente aceptable, en su lugar estudiaremos la sustitución por otras tecnologías:

Sistemas de alta eficiencia propuestos	EER (modelos de media-alta eficiencia)	SEER	Emisiones ahorradas (T)		
			Equipos existentes		
			Enfriadoras refrigeradas por aire	Bombas de calor	Equipos autónomos
Bomba de calor geotérmica	5,6	7,46	792	695	167

⁷¹ Los equipos cuya antigüedad se desconoce se consideran nuevos, ya que se prefiere sobrestimar la eficiencia a subestimarla, esto ocurre sin embargo solo para menos de un 2% de la potencia eléctrica instalada en refrigeración.

⁷² Datos estimados a partir de los consumos obtenidos en (Aena Aeropuertos 2011) para refrigeración y calefacción (comprenden equipos de generación, bombas hidráulicas y equipos terminales (climatizadores y fancoils). El consumo se ha desglosado por equipos realizando una equivalencia entre las proporciones correspondientes a potencia eléctrica del equipo/potencia eléctrica total y consumo del equipo/consumo eléctrico total para cada uno de ellos excepto para las bombas, cuyo consumo se ha descontado calculándose directamente en función de las horas de operación anuales y de su potencia nominal (son bombas de caudal constante).

Enfriadoras refrigeradas por agua	6,8	5,10	617	573	143
Enfriadoras refrigeradas por aire	3,76	2,88	192	274	83
Equipos autónomos (bomba de calor tipo Split)	3,29	2,52	-	-	64
AHORRO DE EMISIONES MÁXIMO ANUAL (T)			1.654		

Tabla 23.- Estimación emisiones ahorradas con nuevos equipos para refrigeración⁷³.

A continuación calculamos las emisiones que podemos ahorrar en calefacción sustituyendo estos equipos por otros más eficientes:

Sistemas de alta eficiencia propuestos	COP (modelos de media-alta eficiencia)	Rendimiento (HSPF, AFUE)	Emisiones ahorradas (T)	
			Equipos existentes	
			Bombas de calor	Equipos autónomos
Bomba de calor geotérmica	4,21	3,99	170	39
Caldera de gas natural	-	0,98	120	29
Caldera de biomasa	-	0,85	350	78
Equipos autónomos (bomba de calor tipo Split)	3,63	2,35	-	13
AHORRO DE EMISIONES MÁXIMO ANUAL (T)			428	

Tabla 24.- Estimación emisiones ahorradas con nuevos equipos para calefacción⁷³.

Como vemos, el ahorro en emisiones tanto para calefacción como para refrigeración con el uso de nuevos equipos puede ser significativo. Sumando calefacción y refrigeración este ahorro puede estar en torno a las **2.082** toneladas de CO₂ anuales.

11.1.2 Estimación del potencial de ahorro por la sustitución de luminarias en Iluminación y Señalética

Las lámparas operativas en el Edificio Terminal son empleadas principalmente para Iluminación y Señalética.

- **Iluminación**

En este caso encontramos una fuerte limitación para el cálculo del potencial de reducción de emisiones, ya que, aunque conocemos la potencia y tipo de cada una de las lámparas empleadas en la Terminal, desconocemos la eficiencia de éstas. Por esta razón, el procedimiento seguido ha consistido en asignar eficiencias medias típicas

⁷³ Las eficiencias se han obtenido de manera análoga a los de la Tabla 271 (ver Anexo correspondiente) con la salvedad de los factores de seguridad, los cuáles aquí no han sido aplicados. La eficiencia para la enfriadora aire-agua corresponde al modelo DAIKIN EWAD540TZ-XR (549 kW) y la de la bomba de calor tipo Split corresponde al modelo Daikin TX50GV.

para cada tipo de luminaria y evaluar las emisiones que podremos ahorrar mediante su sustitución por lámparas de alta eficiencia, ya sean del mismo tipo u de otro tipo diferente a la sustituida.

El inventario de las lámparas empleadas en el aeropuerto se presenta a continuación:

Tipo de luminaria instalada	Eficiencia estimada (lum/W)	Potencia total (W)	Emisiones generadas (T)	Emisiones ahorradas con la sustitución (T)		
				Fluorescentes 105 lum/W	LEDs blancos 150 lum/W	Halogenuros metálicos 115 lum/W
Fluorescentes lineales	75,5	231.209	504,52	141,7	250,6	173,3
Fluorescentes compactas	75,5	7.844	17,12	4,8	8,5	5,9
Fluorescentes circulares	75,5	576	1,26	0,4	0,6	0,4
LEDs blancos	89	1.440	3,70	0,6	1,5	0,8
Halogenuros metálicos	90	96.705	251,55	35,9	100,6	54,7
Vapor de sodio	110	29.640	94,23	- 4,5	25,1	4,1
Incandescente	16	1.560	0,72	0,6	0,6	0,6
Halógenas	22,5	24.280	15,79	12,4	13,4	12,7
TOTAL		393.254	889	MÁXIMO		401

Tabla 25.- Estimación de las emisiones máximas ahorradas en Iluminación⁷⁴.

- Señalética

La señalética, por su parte, engloba a los dispositivos cuya función es señalar las zonas de interés del aeropuerto. Muchas de estas señales se encuentran retroiluminadas con lámparas fluorescentes o LEDs, pero al igual que ocurre con el resto de la iluminación, se desconoce cuál es la eficiencia de estos dispositivos, por lo que también se les supondrán valores de eficiencia medios típicos de éstas tecnologías, y en base a éstos se determinarán las emisiones que podremos eliminar mediante su sustitución por modelos de mayor eficiencia.

Tipo de luminaria instalada	Eficiencia estimada	Potencia total (W)	Emisiones (T)	Emisiones ahorradas con la sustitución (T)	
				Fluorescentes 105 lumW	LEDs 150 lum/W
Fluorescentes	75,5	2.752	464,0	130,4	230,5
LEDs blancos	89	7,44	1,5	0,6	0,7
TOTAL		2.759,44	465.5	MÁXIMO	231

Tabla 26.- Estimación de las emisiones máximas ahorradas en Señalética⁷⁴.

Del análisis realizado se ha determinado que en esta área las emisiones pueden ser reducidas hasta un máximo de **632** toneladas de CO₂. Esto supone un potencial de reducción de aproximadamente la cuarta parte del de climatización, por lo que ésta será la medida descartada.

11.2 Reducción de emisiones en climatización

11.2.1 Descripción de equipos existentes y justificación de la solución a estudiar

Como hemos visto, los sistemas de climatización tienen un peso muy importante en el consumo eléctrico total del aeropuerto, en particular, éstos son responsables de en torno a un 60% del consumo de la terminal, es decir,

⁷⁴ Los valores de eficiencia de las distintas lámparas se corresponden a los valores de la Tabla 9. Las emisiones han sido calculadas para un factor de emisiones eléctrico de 649 gCO₂/kWh. Los valores de potencia instalada han sido obtenidos de (Aena Aeropuertos 2011)

un 40% del total del aeropuerto, por tanto, una disminución significativa de las emisiones en climatización comportará una importante reducción de consumo energético en el aeropuerto, y consecuentemente también de las emisiones de CO₂.

Como medida de reducción de emisiones en climatización se estudiará la sustitución de los generadores de frío y calor existentes por otros más eficientes y menos contaminantes. Los generadores de climatización usados en la Terminal son (Aena Aeropuertos 2011):

- **Grupos de frío.-** Se trata de un total de 7 máquinas de frío condensadas por aire. Entre las 7 suman unos 1.148,9 kW de potencia eléctrica y una capacidad de unos 3.816,5 kW_t. El EER medio (ponderado por la potencia) es de 3,32.

Las tres principales (Grupos de Frío CLIMAVENETA condensados por aire) tienen una potencia eléctrica nominal de 340 kW cada una y una eficiencia (EER) de 3,2, y junto a las bombas de calor CLIMAVENETA forman el sistema de producción centralizada del aeropuerto, situado en la Central Energética (Imagen 43), el cual suministra energía térmica al circuito primario de agua de la instalación hidráulica principal de climatización.

Los 4 grupos de frío restantes dan servicio a zonas específicas del Edificio Terminal. Se trata de enfriadoras de agua condensadas por aire, salvo el equipo de mayor capacidad, que es condensado por agua, el cual posee un rendimiento bastante elevado (6,1). Estos equipos representan solo el 11,2% de la potencia eléctrica instalada del total de grupos de frío, y su rendimiento medio es de 4,26, mucho mayor que el de los grupos de frío CLIMAVENETA, por lo que se ha decidido no considerarlos en este estudio ya que las emisiones que podrán ser ahorradas con su sustitución serán muy pequeñas en comparación con las que podrán ahorrarse con la sustitución de los equipos CLIMAVENETA.

- **Bombas de calor.-** El Aeropuerto consta de un total de 12 bombas de calor. Entre todas suman un total de 949,7 kW de potencia eléctrica para refrigeración y de 910,46 kW para calefacción, con un COP medio de 3,27 y un EER medio de 2,97.

Las cuatro principales (Bombas de Calor CLIMAVENETA condensadas por aire) poseen una potencia eléctrica nominal de 223 kW para refrigeración y 213 kW para calefacción cada una, un EER medio de 2,96 y un COP medio de 3,26.

Las 8 bombas de calor restante dan servicio a zonas concretas de la Terminal, entre estas figuran 4 equipos de tipo VRV (Volumen de Refrigerante Variable), los cuales poseen un rendimiento bastante elevado (EER medio de 4,07 y COP medio de 4,33), luego tendrá poco sentido plantearnos su sustitución. Por su parte, las 4 bombas restantes poseen rendimientos bastante pobres (EER medio de 2,42 y COP medio de 2,64), pero representan solo el 3,7% de la potencia eléctrica instalada del total de las bombas de calor (exceptuando las VRV), luego tampoco se considerará su sustitución.



Imagen 43.- Situación de la Central Energética y los equipos de climatización CLIMAVENETA.

- **Equipos autónomos.-** Se trata de bombas de calor autónomas, es decir, generadores que funcionan a la vez como equipos terminales; en su mayor parte de tipo Split, con rendimientos nominales del orden de 2,79 (EER) y 3,09 (COP). Aunque la potencia total instalada de estos equipos es elevada (218,15 kW para refrigeración y de 203,54 kW para calefacción), es sin embargo mucho menor a la de los equipos CLIMAVENETA, además, por las características de estos equipos (pequeño tamaño, dan servicio a lugares de más difícil acceso...), una reducción de emisiones sólo podrá obtenerse con su sustitución por equipos de mismo tipo aunque más eficientes, lo que, tal como se calculó anteriormente,

limitará enormemente el ahorro de emisiones que será posible obtener frente al resto de sistemas. Por estas razones ignoraremos los equipos autónomos en nuestro estudio y nos centraremos en los equipos de mayor potencia ubicados en la Central Energética.

En resumidas cuentas solo se estudiará la sustitución de bombas de calor y grupos de frío CLIMAVENETA, los cuales representan el 82,5% de la potencia eléctrica instalada para refrigeración y el 76,5% de la potencia instalada para calefacción.

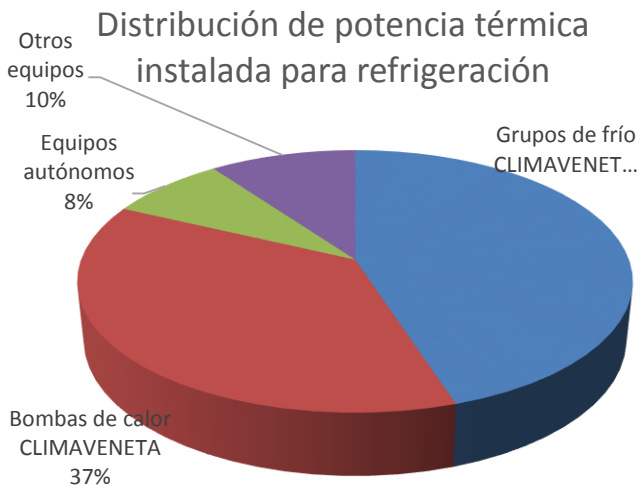


Gráfico 23.- Distribución por equipos de la potencia de refrigeración que abastece el Edificio Terminal.

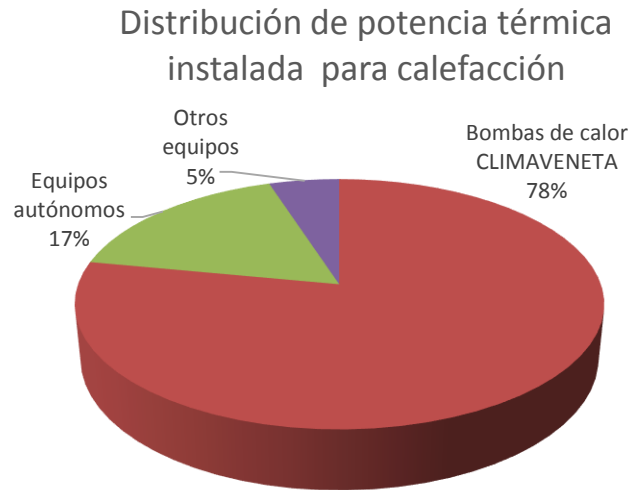


Gráfico 24.- Distribución por equipos de la potencia de calefacción que abastece el Edificio Terminal.

11.2.2 Sustitución de los generadores de la Central Energética

En este apartado se estudiará la sustitución de los equipos CLIMAVENETA existentes en la Central Energética por otros generadores más eficientes. Para elegir la alternativa más apropiada para nuestro caso se considerarán aquellos sistemas que obtuvieron mejores resultados en las comparativas realizadas en el Apartado 3.2.2. En esta reforma no se realizarán modificaciones en el circuito secundario de agua existente, tan solo en el primario, y, en todo caso, en el colector que une ambos circuitos, el cual se encuentre en la Central Energética. Es posible, sin embargo, que deban realizarse algunas modificaciones en este edificio para albergar a los nuevos equipos o que estos deban ser instalados en otro lugar.

Los equipos a considerar son:

- **Máquinas de frío refrigeradas por agua.-** Se trata de generadores de frío por compresión de alta potencia. En particular, las tecnologías más apropiadas para nuestro propósito serán las enfriadoras refrigeradas por agua de compresión centrífuga o de tornillo, usadas para rangos de potencia elevados en aplicaciones, como la que nos ocupa, donde se requiera un funcionamiento continuo de servicio pesado, y sea necesaria una alta seguridad de funcionamiento. Al necesitar estos equipos de un flujo de agua para su refrigeración, deberá disponerse de torres de refrigeración, las cuales pueden ser instaladas en la cubierta de la Central Energética. A priori parece razonable que, una vez retirados los equipos CLIMAVENETA de la cubierta, el espacio disponible para las torres de refrigeración será más que suficiente. Las enfriadoras, por su parte, deberán estar a cubierto, luego se descarta su colocación en dicha cubierta.

Estos sistemas presentan una inversión de capital considerable, sin embargo el coste de operación será considerablemente menor al de las bombas de calor debido a los altos rendimientos conseguidos con esta tecnología, con valores nominales típicos de 6,5 o 7 (COP) para los equipos más modernos.

- **Geotermia.-** Consiste en la utilización de una instalación de climatización por bomba de calor geotérmica reversible. En refrigeración, esta opción es menos popular que en calefacción, aunque la eficiencia de obtenida con esta técnica continúa siendo notable. El principal obstáculo de esta instalación es la elevada inversión inicial necesaria, aunque sus bajos costes operaciones, tanto por consumo eléctrico como de mantenimiento, y la posibilidad de ser empleada tanto para calefacción como para

refrigeración, posibilitarán que esta elevada inversión inicial se amortice al cabo de cierto tiempo.

El rendimiento del sistema y la superficie de terreno necesaria dependerán en cierta medida de las propiedades del terreno en el que se construya. En particular, el terreno sobre el que se encuentra el aeropuerto está formado por cantos rodados, arena, y arcillas⁷⁵ y su nivel freático se encuentra a una profundidad aproximada de 6 metros⁷⁶, propiedades éstas buenas, en principio, tanto para la colocación de un circuito de captación horizontal como vertical. Para realizar cálculos más precisos de estas instalaciones (longitud y diámetro de tubería, líquido térmico empleado, profundidad de sondas geotérmicas, costes precisos, etc.) será necesario disponer de un software profesional especializado y deberán realizarse tests de respuesta térmica para disponer de información de la conductividad del terreno.

En principio será preferible una instalación horizontal de circuito cerrado, ya que constituye la opción de menor coste de construcción y mantenimiento, sin embargo, la elección del tipo de instalación debe ser tomada en función del terreno disponible para construir el sistema de captación geotérmica. Un buen emplazamiento para este sistema debe poseer las siguientes características:

- Debe estar lo más próximo posible a la Central Energética, donde en principio estarán situadas las bomba de calor.
- No debe estar siendo empleada para otro cometido.
- La realización de una obra en el mismo no debe suponer un peligro en las operaciones.
- Debe poseer una extensión suficiente para la capacidad requerida. En concreto, una instalación de captación horizontal se encuentra en un rango de entre 50 y 90 m²/kW, mientras que una instalación vertical precisa de un área de entre 5 y 10 m²/kW (ASHRAE 1995).

Analizando un plano del Aeropuerto para buscar las zonas que reúnan estos requisitos encontramos tres opciones principales:



Imagen 44.- Posibles emplazamientos de la instalación geotérmica.

- **Opción 1.-** Como vemos en la Imagen 44 esta zona se encuentra muy alejada de la Terminal, lo que podría elevar bastante los costes de construcción y las pérdidas térmicas en las tuberías. Sus grandes dimensiones, no obstante, la hacen apropiada para una instalación horizontal. En el caso más desfavorable de propiedades térmicas del terreno, esta área podría suministrar 1.189 kW de potencia térmica en instalación horizontal y 10.700 kW en instalación vertical.
- **Opción 2.-** Esta opción continua está situada a una distancia menor de la Central Energética, sin embargo, sus menores dimensiones limitan mucho su aplicación para una instalación horizontal. En el caso más desfavorable, podría suministrar unos 333 kW en instalación horizontal y 3.000 kW en instalación vertical.
- **Opción 3.-** Es la opción más cercana a la Central Energética, aunque aún se encuentra a una

⁷⁵ Fuente: MAGNA 50 HOJA 984.

⁷⁶ Fuente: Recursos subterráneos Ministerio de Alimentación, Agricultura y Medio Ambiente (Cod. Piezométrico 05.73.005)

distancia considerable. En el caso más desfavorable podría suministrar unos 167 kW en instalación horizontal y 1.050 kW en instalación vertical.

En base al terreno disponible, parece que la opción más viable es recurrir a una instalación vertical de circuito cerrado, ya que el terreno disponible para instalación horizontal se encuentra muy alejado de la Central Energética. De entre las opciones consideradas, la opción 3 será la más favorable por proximidad a la Central Energética y a la Terminal, sin embargo su capacidad es pequeña en relación con sus competidoras.

- **Caldera de biomasa.-** La caldera de biomasa es la que mayor potencial de reducción de emisiones presenta, sin embargo, su coste puede ser mucho más elevado comparado con una caldera de gas natural. En este análisis los cálculos solo están realizados para calderas de pélets de gran potencia.
- **Caldera de gas natural.-** La caldera de gas natural presenta las emisiones más bajas de entre aquellas que usan combustibles fósiles, además, el gas natural es el combustible más barato de entre los analizados, lo que unido al bajo coste de inversión inicial de estas calderas (más elevado en el caso de las calderas de condensación) las convierte en una opción mucho más económica que las calderas de biomasa. Dentro de este tipo de calderas se optará por las calderas de condensación, que además de su elevado rendimiento, están en disposición de sustituir a las bombas de calor CLIMAVENETA directamente, ya que estas bombas trabajan con temperaturas de impulsión de 45°C, temperatura situada en el rango de trabajo de este tipo de calderas. Al igual que las enfriadoras estos equipos deben estar a cubierto. El suministro de gas natural se realizará a través de la red de distribución de gas natural, la cual se encuentra disponible en la zona.

En la siguiente tabla se presentan las características de estos sistemas que se emplearán en los cálculos:

Características	Enfriadoras	Geotermia	Caldera de gas natural	Caldera de biomasa
Vida útil (T_u) (años)	23	35	24	20
Eficiencia nominal (η)	6,8	5,6 (EER) 4,21 (COP)	-	-
Eficiencia estacional (η_e)	5,104	Frío: 5,967 Calor: 3,389	0,98	0,85
Coste inicial (c_{ci}) (€/kW)	417,54	Frío: 2.126,33 Calor: 2,929,39	107,64	612,90
Subvención (S)	0,20	0,45	0,20	0,45
Precio combustible (c_c) (€/kWh _t)	0,020	Frío: 0,011 Calor: 0,022	0,042	0,049
Precio mant. (c_m) (€/kW*año)	7	Frío: 1,24 Calor: 1,7	1,7	30,6
Incremento interanual precio del combustible (IP) (%)	5,5%	5,5%	5,8%	3%
Emisiones (e_i) (gCO ₂ /kWh _t)	127,16	Frío: 108,8 Calor: 191,5	208,16	Nulas

Tabla 27.- Características de los equipos propuestos⁷⁷.

⁷⁷ Los datos han sido obtenidos tal como se describe en el Anexo 1.

11.2.2.1 Comparación de alternativas

Dos parámetros de diseño básicos que debemos conocer para la realización de la comparativa son las potencias térmicas y demandas energéticas anuales (calor y frío) que tendrán que cubrir los nuevos sistemas, valores a priori desconocidos y que pasamos a estimar a continuación:

11.2.2.1.1 Estimación de la potencia térmica demandada

En primer lugar, para realizar un primer dimensionamiento de los equipos de climatización que nos permita realizar nuestra comparativa, necesitaremos conocer las potencias térmicas demandas a los nuevos equipos, tanto para calefacción ($P_{d,cal}$), como para refrigeración ($P_{d,ref}$), valores éstos que incluyen tanto las cargas térmicas (frío y calor) de las zonas de la Terminal a las que abastece el circuito secundario de agua, como las pérdidas térmicas generadas en tuberías y equipos terminales una vez el agua sale de los generadores térmicos.

Ya que se pretende mantener inalterados los componentes y parámetros de operación del circuito de agua secundario, las pérdidas térmicas en éste no variarán, si además consideramos que las cargas térmicas de la Terminal tampoco lo harán, y despreciando las pérdidas introducidas por la modificación del circuito primario de agua, el cual se emplaza por entero en la Central Energética, podemos afirmar que la energía térmica demandada a los equipos actuales coincidirá con el consumo energético actual (supondremos que se consume lo que se necesita).

Del mismo modo, si diéramos por hecho que la potencia térmica instalada de los equipos existentes CLIMAVENETA se adecua a las necesidades reales del aeropuerto, podríamos emplear un razonamiento similar al realizado para la demanda energética, pero aplicado a la capacidad máxima de los equipos. Identificaríamos, pues, la potencia térmica necesaria con la que poseen los equipos actuales. Sin embargo, no podemos descartar la posibilidad que estos equipos no se encuentren bien dimensionados, ya que, a menudo, se da el caso de que la potencia instalada es mayor a la realmente necesaria. Debemos entonces contemplar esta posibilidad y analizar los datos de potencia y consumo energético de la instalación, los cuales se presentan en la Tabla 28, para determinar si realmente existe un mal dimensionamiento, y en su caso, estimar valores de potencia demandada en función de los datos disponibles.

	Refrigeración	Calefacción
Potencia eléctrica instalada (P_e)	1.912 kW	852 kW
Rendimiento nominal medio (η)	3,088	3,26
Rendimiento medio estacional⁷⁸ (η_e)	2,199	2,006
Potencia térmica instalada (P_i)	5.904 kW	2.778 kW
Consumo anual⁷⁹ (C_i)	3.000.000 kWh _e	510.000 kWh _e

Tabla 28.- Datos de los equipos CLIMAVENETA⁸⁰.

La potencia eléctrica instalada se refiere a la potencia eléctrica nominal total de los equipos, la potencia térmica instalada, por su parte, se refiere a la potencia térmica nominal total (sumatorio de potencia eléctrica \times rendimiento nominal de cada equipo) y el rendimiento medio es la razón entre la potencia térmica instalada y la potencia eléctrica instalada.

Como ya hemos dicho, en nuestro estudio asumiremos la hipótesis de que el consumo anual se adapta a la demanda térmica existente del Edificio Terminal, es decir, no se consume más de lo necesario. No descartaremos, no obstante, la posibilidad de que la potencia instalada se encuentre sobredimensionada, lo que a primera vista, a juzgar por los datos, parece ser el caso de la potencia instalada para calefacción, ya que, si analizamos los datos anteriores, vemos que aunque el consumo de refrigeración es muy elevado en comparación con el debido a la calefacción, (unas 6 veces mayor), esta relación no se mantiene en el caso de las potencias instaladas, donde la potencia para refrigeración es solo algo más del doble de la correspondiente a calefacción.

⁷⁸ Estimado con CE-X-GT.

⁷⁹ Obtenidos de ponderar los consumos obtenidos de las Tabla 21 y 22 por la potencia de los equipos CLIMAVENETA.

⁸⁰ Los datos se han elaborado a partir del inventario de equipos CLIMAVENETA del Aeropuerto (Aena Aeropuertos 2011).

La razón de esta disparidad, en caso de que no atendiera a un mal dimensionamiento de los equipos de calefacción, puede tener otras dos causas que explique ese mayor ratio de utilización anual de los equipos de refrigeración, a saber:

- **Estacional.-** Como vemos en la Gráfico 19 existe cierto nivel de estacionalidad en el aeropuerto, lo que sin duda contribuirá a que la demanda de refrigeración sea mayor, sin embargo, esta estacionalidad no es muy acentuada, y además debería afectar también a la potencia total instalada, no solo a la demanda, y compensar así, aunque fuese solo en parte el desajuste, por lo que no parece que esta causa, por sí sola, pueda ser darnos una explicación.
- **Clima.-** El clima en el aeropuerto puede dar lugar a que el número de horas de utilización de las instalaciones de refrigeración sea mucho más elevado. Para analizar este factor se ha realizado una estimación de las curvas de distribución de carga según los datos meteorológicos recogidos en el aeropuerto. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

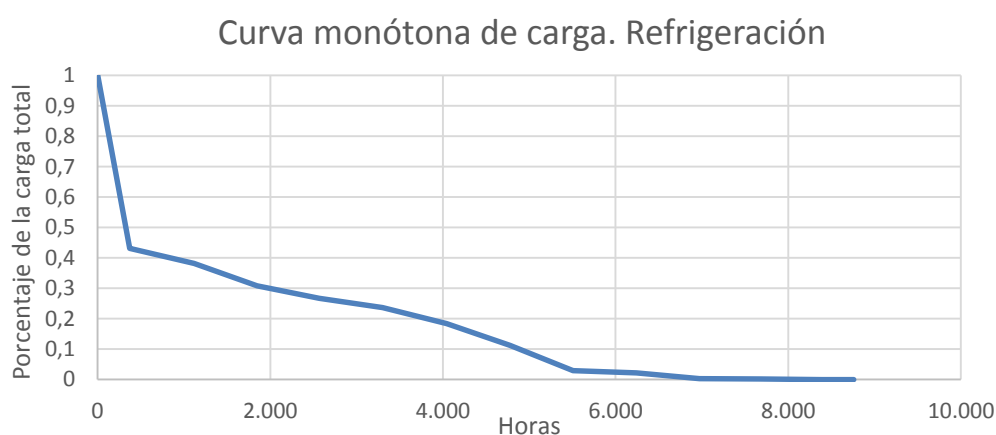


Gráfico 25.- Curva monótona de carga de refrigeración estimada para el Aeropuerto de Sevilla⁸¹.

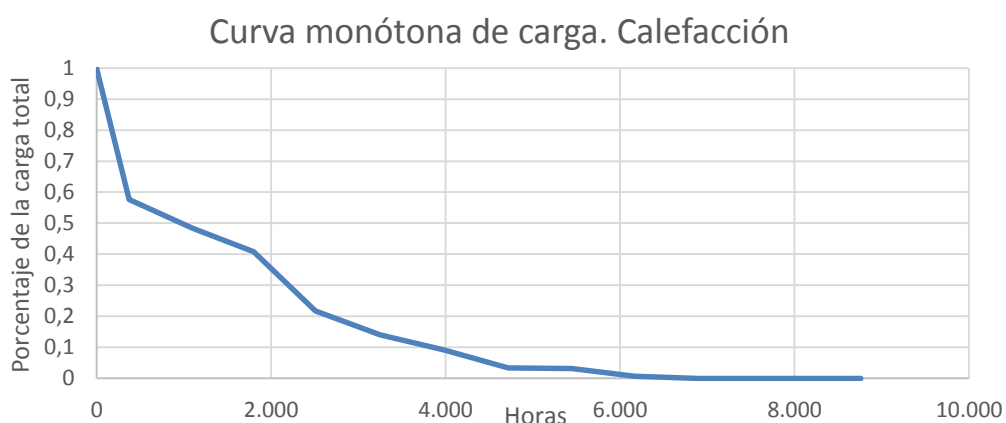


Gráfico 26.- Curva monótona de carga de calefacción estimada para el Aeropuerto de Sevilla⁸¹.

Estas gráficas relacionan la fracción de la carga térmica total con el número de horas en las que se necesita un porcentaje mayor, por lo tanto, la integración de esta curva dará como resultado el número de horas equivalentes, u horas de funcionamiento anual, ponderadas por la fracción de la potencia térmica total usada⁸².

⁸¹ Tablas elaboradas según se explica en el Anexo 1.

⁸² El número de horas equivalentes de calefacción obtenido de realizar la integral se ha multiplicado por un coeficiente de 0,875 = 21/24. Esto se ha hecho para considerar las 3 horas nocturnas en las que la calefacción no es necesaria. En refrigeración aplicar este coeficiente no tiene sentido, ya que en general la refrigeración no se usará a estas horas, o se usará con un nivel bajo de carga.

	Horas equivalentes (q_i) (kWh/kW)
Calefacción	1.327
Refrigeración	1.560,36

Tabla 29.- Horas equivalentes estimadas para climatización.

Como era previsible las horas equivalentes de refrigeración son mayores que las de calefacción para el clima del Aeropuerto de Sevilla, queda por ver si este factor puede realmente explicar el fenómeno.

Considerando que el rendimiento medio de los equipos apenas variará, ya que cada uno de ellos no suelen trabajar a carga parcial, multiplicando las horas equivalentes por la potencia eléctrica instalada total podremos obtener una estimación del consumo eléctrico anual:

$$\text{Consumo anual estimado } (C_{e,i}) = q_i P_{e,i}$$

Donde q_i son las horas equivalentes.

$P_{e,i}$ es la potencia eléctrica instalada.

Los resultados se muestran a continuación:

	q_i (kWh/kW)	P_{e,i} (kW)	C_{e,i} (kWh_e)	C_i (kWh_e)	C_i/C_{e,i}
Calefacción	1.327	852	1.130.604	510.000	0,45
Refrigeración	1.560,36	1.912	2.983.408	3.000.000	1,01

Tabla 30.- Resultados del cálculo del consumo con las curvas monótonas de carga.

Analizando los resultados vemos que el consumo estimado para refrigeración concuerda de forma casi exacta con el real, lo cual parece indicar que esta instalación se encuentra bien dimensionada.

Por otro lado, obtenemos que el consumo eléctrico existente para calefacción equivale a un 45% del estimado, lo que, dando por bueno el método empleado, nos dice que, pese al efecto del clima, la potencia instalada para calefacción es más del doble de la realmente necesaria.

En vista a lo bien que se ajusta la curva monótona de carga de refrigeración a la relación entre potencia y consumo de frío para los equipos de la Central Energética, supondremos que la capacidad de refrigeración de éstos se encuentra bien dimensionada, por lo que en este caso tomaremos como valor de la potencia térmica demandada la potencia térmica instalada. En el caso de la calefacción, sin embargo, y como se acaba de ver, se considerará que la potencia térmica instalada no se corresponde con la realmente necesaria, sino que se encuentra sobredimensionada. A continuación procederemos a estimar ésta a partir de los datos reales de consumo del aeropuerto y del número de horas equivalentes para calefacción que acabamos de calcular, aplicando el rendimiento nominal medio de los equipos. El cálculo realizado es el siguiente:

$$\text{Carga térmica demandada para calefacción } (P_{d,cal}) = \frac{C_{cal} \times \mu_{cal}}{q_{cal}} = \frac{510.000 \text{ kWh} \times 3,26}{1.327 \text{ h}} = 1.253 \text{ kW}$$

Los valores tomados en adelante para la carga térmica demandada serán por tanto:

	Refrigeración	Calefacción
Potencia térmica demandada (P_d)	5.904 kW	1.253 kW

Tabla 31.- Estimaciones de la carga térmica de la Terminal de Pasajeros.

11.2.2.1.2 Estimación de la energía térmica anual demandada

Además también será necesario disponer de los valores de energía térmica anual demandada (E_d) para refrigeración y calefacción, ya que serán necesarios para calcular los costes anuales de operación o las emisiones generadas por cada sistema. Para estimar esta demanda se considerará que el consumo en calefacción y refrigeración real del aeropuerto se corresponden con la demanda real, luego la energía térmica demanda podrá

ser estimada simplemente multiplicando el consumo eléctrico anual por el rendimiento estacional medio:

$$E_d = \eta_{e,i} C_i$$

Los resultados se presentan a continuación:

	Refrigeración	Calefacción
Demanda térmica anual (E_d)	~6.600.000 kWh	~1.020.000 kWh

Tabla 32.- Estimaciones de la demanda térmica anual de la Terminal de Pasajeros.

11.2.2.1.3 Comparativa de sistemas de generación

A continuación pasaremos a comparar los sistemas considerados para un periodo de 20 años, para los valores de potencia (P_d) y demanda (E_d) térmica que acabamos de estimar.

El coste inicial ha sido calculado como:

$$CI = c_{ci} P_d (1 - S)$$

Donde P_d es la potencia térmica demanda.

c_{ci} es el coste inicial (Tabla 27) de adquisición e instalación del equipo por unidad de potencia térmica instalada.

S es la máxima fracción subvencionable (Tabla 27).

Para tener en consideración la vida útil de cada equipo, el coste inicial ha sido corregido de la siguiente forma:

$$CI^* = CI \frac{\sum_{k=0}^{20} (1 - d)^k}{\sum_{k=0}^{T_u} (1 - d)^k}$$

Donde CI* es el coste inicial corregido.

T_u es la vida útil del equipo.

d es el coste de capital o tasa de descuento, el cual se tomará del 3,5%, un valor pequeño y razonable para una empresa pública. Este parámetro es utilizado para determinar el valor actual de un pago futuro.

La corrección con la tasa de descuento ha sido usada con objeto de incluir el efecto penalizador del tiempo en la inversión realizada, ya que no es cierto, por ejemplo, que un beneficio (o ahorro) esperable en un plazo de 30 años tras la inversión inicial tenga el mismo valor que el mismo beneficio recibido dentro de 10 años. Esto es debido a que, entre otras cosas, el riesgo de la inversión será mayor en el primer caso.

El coste de operación anual, por su parte, ha sido calculado de la siguiente forma:

$$C_{c,k} = c_c E_d (1 + IP)^k + c_m P_d (1 + IPC)^k$$

Donde C_{c,k} es el coste anual de combustible en el año k.

P_d es la potencia térmica demanda y E_d es la energía térmica demanda.

c_c es el coste de combustible por unidad energética producida (Tabla 27).

IP es el incremento interanual del precio del combustible (Tabla 27).

c_m es el precio de mantenimiento por unidad de potencia térmica instalada (Tabla 27).

IPC es el Índice de Precios de Consumo (se ha tomado la media para de la serie histórica 2004-2015).

Asimismo, estos costes han sido corregidos con la tasa de descuento para incluir el efecto penalizador del tiempo antes comentado:

$$C_{c,k}^* = C_{c,k} (1 - d)^k$$

Donde C_{c,k}* es el coste operacional corregido para el año k.

d es la tasa de descuento.

Las emisiones anuales han sido calculadas con la siguiente ecuación:

$$EM_k = E_d e_t (1 - f_{mix})^k$$

Donde EM_k los las emisiones generadas en el año k.

e_t son las emisiones por unidad de energía térmica producida (Tabla 27).

f_{mix} es la tasa estimada de aumento de las energías renovables en el mix eléctrico. Se ha considerado que las emisiones generadas por el consumo eléctrico disminuirán en la misma proporción. Esta tasa es muy difícil de estimar, ya que dependerá fuertemente de las políticas futuras en la materia. En nuestro caso se ha tomado un valor del 2,3% para dicho incremento, valor que permitiría alcanzar el objetivo del 100% de renovables en el mix eléctrico para 2050⁸³.

Una vez definido el método y los datos de entrada (Tabla 27), ya estamos en disposición de dar los resultados:

11.2.2.1.3.1 Refrigeración

En principio estudiaremos el caso en el que cada uno de estos sistemas se encargue de cubrir el 100% de la demanda de refrigeración. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

	Enfriadoras	Geotermia
COSTE INICIAL (real) (€)	1.970.460	7.151.228
COSTE INICIAL (corregido) (€)	1.805.996	5.212.610
COSTE OPERACIONAL en 20 años (real) (€)	5.579.065	3.507.016
COSTE OPERACIONAL en 20 años (corregido) (€)	3.705.605	2.318.050
COSTE TOTAL en 20 años (real) (€)	7.549.525	10.658.243
COSTE TOTAL en 20 años (corregido) (€)	5.511.601	7.530.660
EMISIONES TOTALES (TnCO₂)	13.421	11.480

Tabla 33.- Comparativa general de las alternativas de refrigeración.

La evolución de las emisiones viene reflejada en la siguiente gráfica:

⁸³ Este valor ha sido calculado a partir del mix energético en la red eléctrica española para el año 2013, en el que el peso de las renovables fue del 43%.

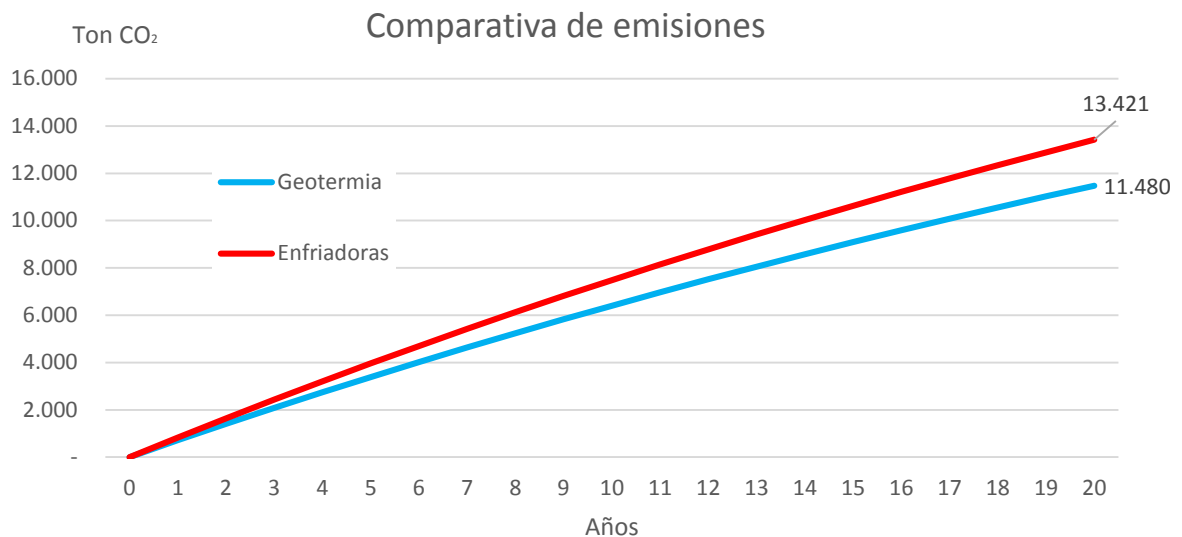


Gráfico 27.- Emisiones generadas por las alternativas de refrigeración.

Como era previsible por su mayor eficiencia en refrigeración, las emisiones generadas por la instalación geotérmica son mucho menores a las generadas por la enfriadora en el plazo considerado de 20 años.

La curvatura que presentan las curvas en este gráfico pone de manifiesto la importante influencia que el aumento de las renovables en el mix eléctrico tiene sobre las emisiones generadas conforme pasan los años.

La evolución de costes (en las gráficas siempre solo se representarán valores corregidos), por su parte, se presenta a continuación:

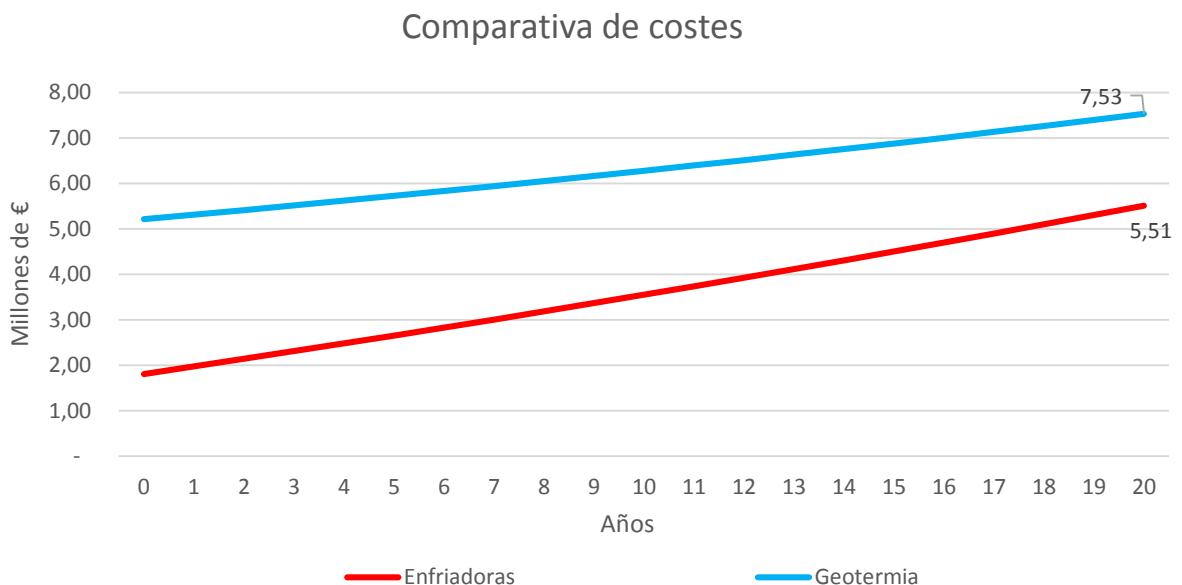


Gráfico 28.- Costes de las alternativas de refrigeración.

En cuanto a los costes, el sistema más rentable para refrigeración es la enfriadora refrigerada por agua, ya que el coste de inversión es relativamente bajo y el rendimiento obtenido es muy competitivo. Por el contrario, la instalación geotérmica presenta una inversión de capital altísima, sin embargo, su alta eficiencia la convierte en una opción muy competitiva a largo plazo respecto a la enfriadora.

Los resultados obtenidos evidencian que las enfriadoras, tanto por su bajo nivel de emisiones, como, y especialmente, por su bajo coste económico, constituyen la mejor opción para cubrir la demanda de refrigeración del edificio. Sin embargo, también se pone de manifiesto la necesidad de realizar esta comparativa desde un punto de vista global, esto es, considerando calefacción y refrigeración de forma conjunta, ya que solo así podremos sacar conclusiones acerca de la rentabilidad de la bomba de calor geotérmica como sistema reversible.

11.2.2.1.3.2 Calefacción

De forma análoga a refrigeración los resultados obtenidos de muestran a continuación:

	Caldera Gas natural	Caldera Biomasa	Geotermia
COSTE INICIAL (real) (€)	107.898	422.380	2.018.790
COSTE INICIAL (corregido) (€)	96.396	422.380	1.471.519
COSTE OPERACIONAL en 20 años (real) (€)	1.595.342	2.325.315	940.218
COSTE OPERACIONAL en 20 años (corregido) (€)	1.050.431	1.582.252	633.088
COSTE TOTAL en 20 años (real) (€)	1.703.240	2.747.695	2.959.009
COSTE TOTAL en 20 años (corregido) (€)	1.146.828	2.004.632	2.104.607
EMISIONES TOTALES (TnCO₂)	4.247	-	3.124

Tabla 34.- Comparativa general de las alternativas de calefacción.

La evolución de las emisiones a lo largo del tiempo viene representada en el siguiente gráfico:

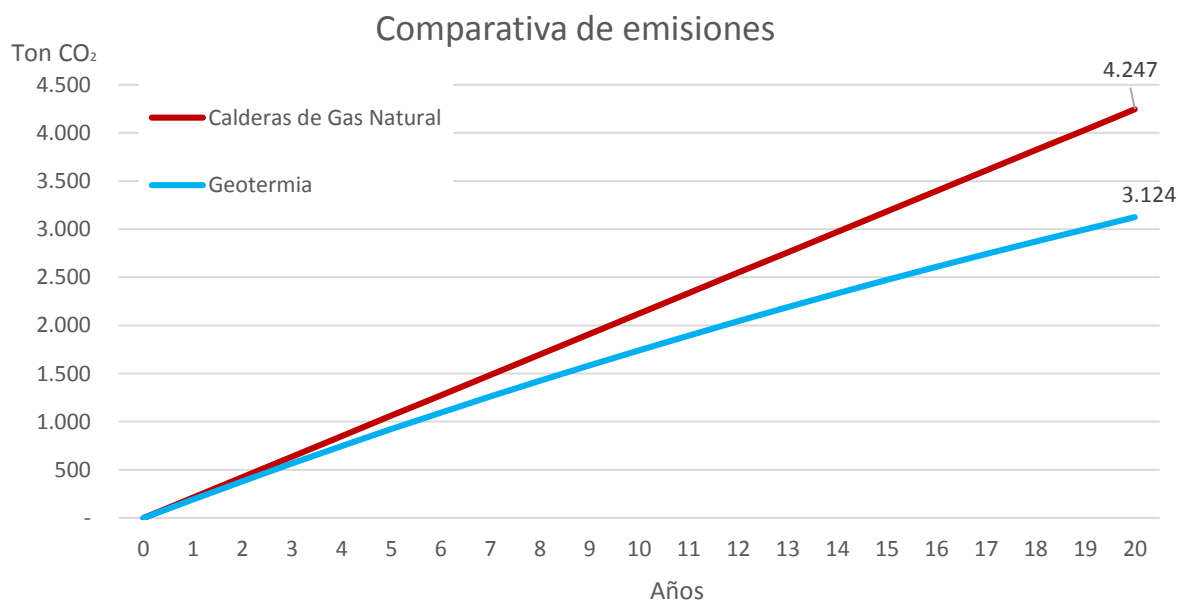


Gráfico 29.- Emisiones generadas por las alternativas de calefacción.

Las emisiones derivadas del uso de biomasa se consideran nulas por lo que no aparecen en la gráfica. Tras éste, el sistema más limpio resulta ser la bomba de calor geotérmica, seguida a cierta distancia por la caldera de gas natural, la cual resulta aproximadamente un 40% más contaminante. Hay que tener en cuenta que, mientras las emisiones ocasionadas por la quema de gas natural solo dependen de la cantidad quemada y no variarán con el tiempo, las ocasionadas por la bomba de calor, que funciona con electricidad, si variarán con el tiempo, tendiendo a disminuir conforme aumenta el peso de las energías renovables en el mix eléctrico.

Por su parte, la evolución de los costes se representa a continuación:

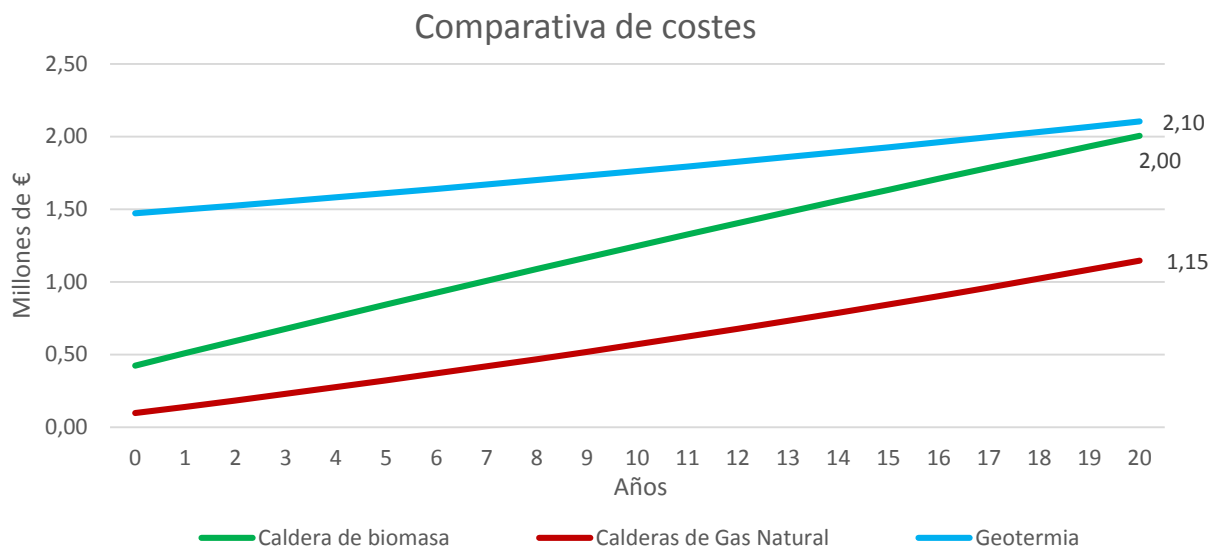


Gráfico 30.- Costes de las alternativas de calefacción.

La opción más rentable a priori resulta ser la caldera de gas natural, seguida a gran distancia por la bomba de calor geotérmica, con enormes costes iniciales y bajo coste operacional. Tras ésta se sitúa la instalación geotérmica, la cual se ve muy penalizada por su elevadísima inversión inicial. La caldera de biomasa, muy penalizada por sus altos costes operacionales se sitúa finalmente como la opción menos recomendable de entre las analizadas desde un punto de vista exclusivamente económico. Pese a todo, esta comparativa no resulta completa, ya que habrá que realizar una comparativa conjunta para calefacción y refrigeración para analizar las verdaderas posibilidades que ofrece la bomba de calor geotérmica, alternativa que, como ya hemos visto, puede funcionar tanto en modo de calor como en modo de frío.

A su vez, estos resultados ponen en relieve la ineficacia de construir una instalación geotérmica para cubrir los picos de carga, los cuales tienen un peso pequeño en la demanda energética anual, en su lugar, será mucho más eficiente construir una instalación para una potencia menor, que nos permita cubrir la mayor parte de la demanda térmica anual, y exprimir así la gran ventaja de este sistema, que es su bajo coste operacional. Para cubrir los picos de carga se dispondrá de sistemas auxiliares de apoyo que supongan una inversión de capital pequeña, como por ejemplo las calderas de gas natural.

Para poder realizar un diseño de este tipo se ha obtenido la siguiente gráfica de distribución de la demanda de calefacción, obtenida de la integración de la curva monótona de carga (Gráfico 26).

Curva de distribución de la demanda de calefacción

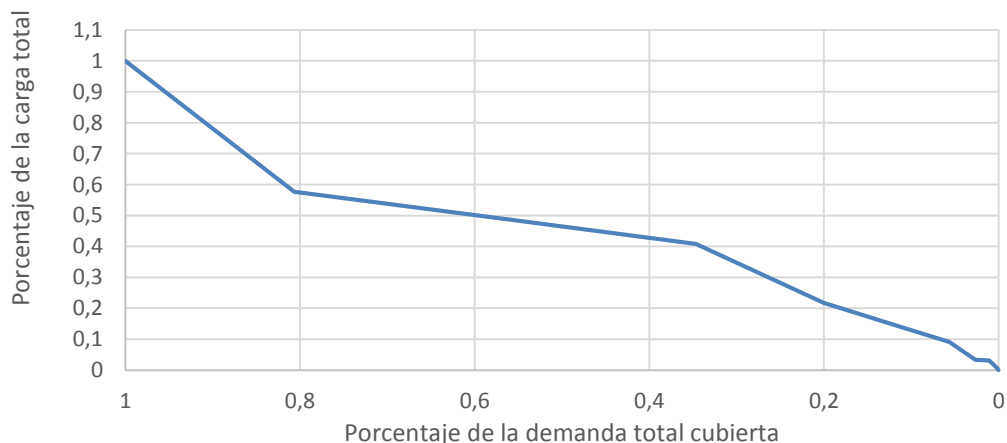


Gráfico 31.- Curva de distribución de calefacción.

Como podemos apreciar en la gráfica anterior, el pico de carga para calefacción presenta una pendiente

pronunciada, que disminuye bruscamente a partir de aproximadamente un 60% de la potencia máxima. Es decir, la capacidad de la instalación geotérmica óptima será de un 60% de la necesaria, con la que cubriremos aproximadamente un 80% de la demanda. Para el resto del tiempo en el que se necesite una potencia superior se emplearán calderas de gas natural, las cuales constituyen la solución más óptima por su bajo coste inicial.

Los resultados obtenidos realizando esta corrección se muestran a continuación:

Instalación geotérmica + Calderas de gas natural						
COSTE INICIAL (real) (€)	COSTE INICIAL (corregido) (€)	COSTE OPERACIONAL en 20 años (real) (€)	COSTE OPERACIONAL en 20 años (corregido) (€)	COSTE TOTAL en 20 años (real) (€)	COSTE TOTAL en 20 años (corregido) (€)	EMISIONES TOTALES (TnCO ₂)
1.254.434	921.470	1.085.226	716.557	2.339.660	1.638.027	3.348

Tabla 35.- Costes y emisiones de Instalación geotérmica + Calderas de Gas natural.

Comparativa de costes

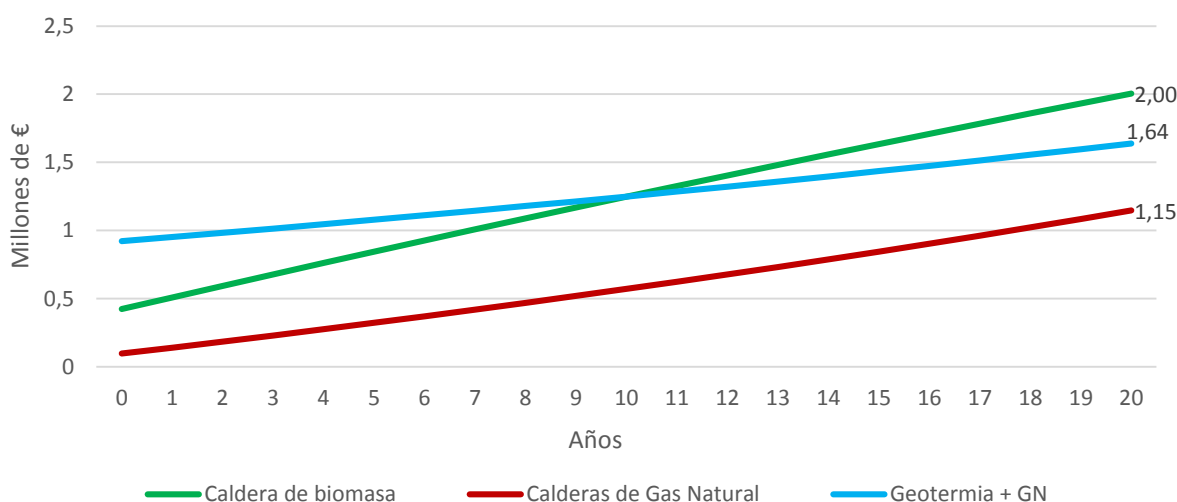


Gráfico 32.- Costes de las alternativas de calefacción (contemplando Geotermia + Caldera de Gas natural).

Como vemos, la instalación geotérmica resulta ahora una opción mucho más rentable. El incremento en las emisiones derivado de esta alternativa híbrida resulta poco significativo.

- Caldera de biomasa Vs. Caldera gas natural. Internalización de costes por emisiones.

Como ya hemos dicho, aunque para analizar la conveniencia de las bombas de calor sea necesario realizar un análisis conjunto de calefacción y refrigeración, para el caso de las calderas, al ser máquinas exclusivas de calefacción, ya deberíamos estar en disposición de descartar alguna de ellas. Esta decisión parece complicada a priori, ya que en el análisis puramente económico la caldera de biomasa está en gran desventaja, sin embargo, en el análisis de emisiones la caldera de gas natural resulta ser una opción mucho más contaminante. Una forma de realizar un análisis único, en el que se contemplen a la vez ambos factores, consistiría en asignar un coste social a las emisiones de CO₂, es decir, incluir una estimación del coste de las emisiones en nuestra comparativa conforme a lo estudiado en el Apartado 1.1.3.

Como vimos entonces, para el caso de los aeropuertos no existe ninguna normativa que obligue a pagar por las emisiones generadas, ni se trata de una actividad regulada por el mercado de derechos de emisión europeo (exceptuando las emisiones de las aeronaves), es por ello que, en este caso, el considerar los costes de las emisiones generadas en éste debe ser entendido como un proceso de internalización voluntaria de costes, en particular de los costes sociales por la contribución que estas emisiones tienen al cambio climático, y por los perjuicios en la sociedad y el medioambiente que este fenómeno trae consigo. El problema ahora reside en qué valor concreto tomar en nuestro análisis.

Como ya se comentó en su momento, existen varias maneras de calcular estos costes, y para cada una el valor obtenido puede variar considerablemente. En nuestro caso, consideraremos tres estimaciones distintas para calcular el coste de emisión de una tonelada de CO₂ (Interagency Working Group on Social Cost of Carbon 2015): un valor obtenido de forma indirecta (precio sombra) usando la legislación existente actualmente, y otros dos valores obtenidos de forma directa (precio social marginal), es decir, evaluando los daños potenciales del cambio climático, siendo uno más conservador (coste menor) y el otro más pesimista (coste mayor).

- **Precio sombra (Coste 1).**- En este caso se ha tomado un valor de 6,9 €/TCO₂, correspondiente al valor medio en el mercado de emisiones europeos durante el mes de Marzo de 2015. Se considerará que este precio permanecerá constante con el tiempo.
- **Precio social marginal (Costes 2 y 3).**- Se usan valores obtenidos en el estudio realizado por el Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, dependiente del gobierno de los EEUU. En este caso se considerarán valores crecientes con el tiempo. En concreto se usará el valor medio y el 95 percentil del precio obtenido en las simulaciones llevadas a cabo en dicho estudio para una tasa de descuento del 3%. Aplicar una tasa de descuento, en este caso, resulta sin embargo éticamente cuestionable, ya que supone dar al bienestar de las futuras generaciones un valor menor que el dado para la actual. Puede tener sentido, no obstante, si consideramos que al emitir gases de efecto invernadero como consecuencia del desarrollo de actividades económicas, éstas aumentarán la riqueza de la sociedad, haciendo que las generaciones futuras sean más ricas que las actuales.

En la siguiente tabla se presentan los valores considerados en el estudio para intervalos de 5 años. Al realizar los cálculos se ha realizado una interpolación lineal para obtener los costes para los años intermedios.

Año	Media (Coste 2)	95 percentil (Coste 3)
2015	36	108
2020	43	127
2025	47	142
2030	51	158
2035	56	174
2040	60	190
2045	65	205
2050	71	219

Tabla 36.- Evolución de los costes sociales marginales de las emisiones⁸⁴.

El efecto de tener en cuenta estos costes puede verse en la siguiente gráfica donde comparamos las calderas de biomasa y gas natural:

⁸⁴ Fuente: EPA

Millones €

Comparativa de costes incluyendo emisiones

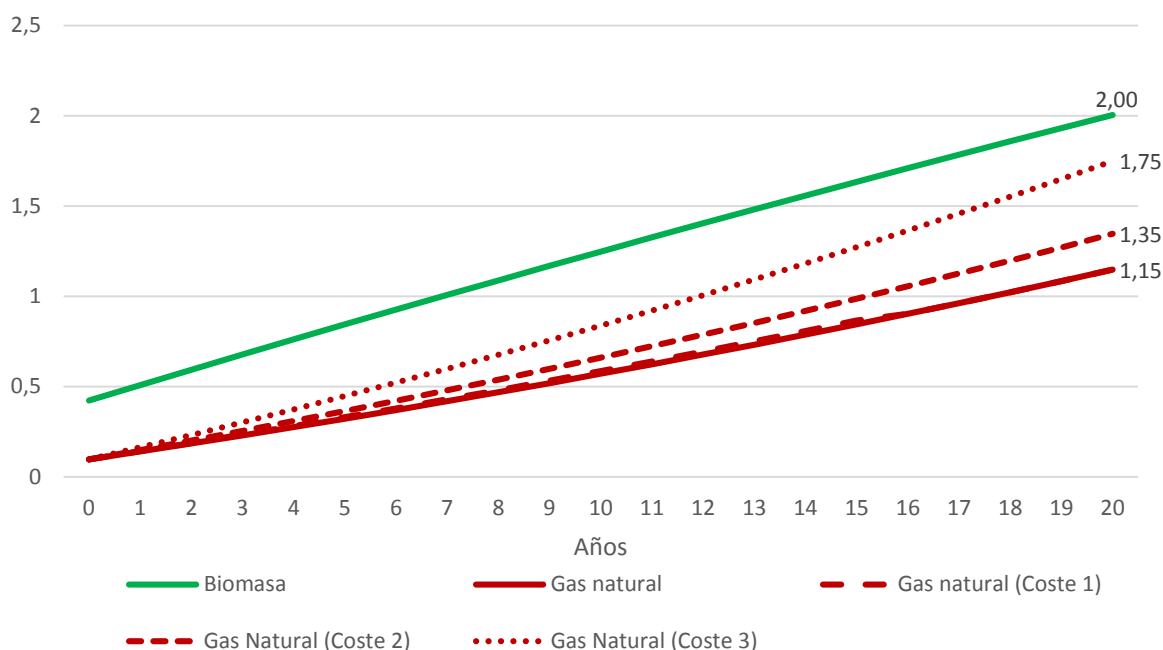


Gráfico 33.- Comparativa de costes para calefacción incluyendo emisiones.

Como vemos, conforme mayor es el coste asignado a las emisiones, más penalizamos al gas natural frente a la biomasa, sin embargo, ésta no llegará a superar al gas natural ni siquiera en caso de emplear el mayor coste social de emisiones, el cual se corresponde con una estimación muy pesimista de los efectos causados por el cambio climático (percentil del 95% para las simulaciones realizadas), correspondientes a un escenario futuro considerado de baja posibilidad. En base a estos resultados consideramos que la opción para calefacción más idónea será la caldera de gas natural y por tanto descartaremos el uso de la caldera de biomasa.

11.2.2.1.3.3 Calefacción y refrigeración

Una comparativa global para climatización se hace necesaria para poder comparar de forma apropiada aquellos sistemas reversibles que sean capaces de trabajar tanto para calefacción como para refrigeración, es el caso de la instalación por bomba de calor geotérmica en nuestro estudio. Las opciones que consideraremos en este caso, en base a los resultados obtenidos en los apartados anteriores, son:

- **Opción 1 - GN + Enfriadoras.-** En esta opción se emplea calefacción centralizada mediante una o varias calderas de condensación de gas natural y refrigeración centralizada mediante equipos de compresión de alta potencia refrigerados por agua. Estas opciones han sido elegidas por considerarse las más apropiadas para cubrir las necesidades de calefacción y refrigeración de forma independiente.
- **Opción 2 – Geotermia + GN + Enfriadoras.-** En esta opción se empleará una instalación geotérmica para climatización (calor y frío), además de calderas de gas natural y enfriadoras para cubrir los picos de demanda de calefacción y refrigeración respectivamente. La instalación geotérmica se ha dimensionado para cubrir el 60% de la potencia total necesaria para calefacción, unos 752 kW, por lo que en este caso podemos recurrir al terreno correspondiente a la Opción 3 (Imagen 44), el cual es el más favorable de entre los terrenos disponibles. Por otro lado, esta potencia supondrá aproximadamente el 17% de la potencia total necesaria para refrigeración, valor que ha sido obtenido con la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje para refrigeración} = 60\% \frac{P_{d,c} \times \eta_{BG,r}}{P_{d,r} \times \eta_{BG,c}} = 60\% \frac{1.253 \text{ kW} \times 5,6}{5.904 \text{ kW} \times 4,2} = 17\%$$

Donde $P_{d,c}$ es la potencia térmica demandada para calefacción.

$P_{d,r}$ es la potencia térmica demandada para refrigeración.

$\eta_{BG,c}$ es el rendimiento nominal de la bomba de calor geotérmica para calefacción.

$\eta_{BG,r}$ es el rendimiento nominal de la bomba de calor geotérmica para refrigeración.

Para hallar la demanda de refrigeración que podremos cubrir con una instalación geotérmica para esta potencia instalada, necesitamos disponer de la curva de distribución de demanda para refrigeración, la cual hemos hallado integrando la curva monótona de carga para refrigeración (Gráfico 25):

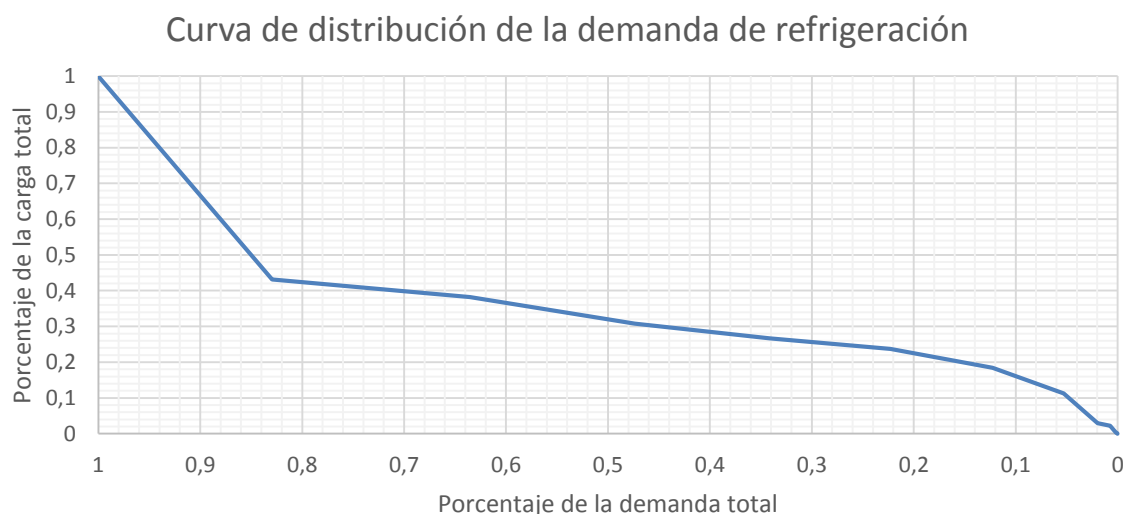


Gráfico 34.- Curva de distribución de la demanda de refrigeración.

Como vemos en la curva, para una potencia geotérmica instalada de un 17% cubriremos aproximadamente un 10% de la demanda anual de refrigeración.

Otra opción puede consistir en una instalación geotérmica mayor diseñada para cubrir la máxima demanda de refrigeración usando enfriadoras para los picos de potencia, la cual permitiese cubrir, además, toda la demanda de calefacción. Esta opción, sin embargo, ofrece resultados muy similares a los obtenidos con la opción aquí considerada, y necesitaría un área muy extensa para la colocación de los captadores, por lo que sería necesario recurrir al terreno correspondiente a la Opción 2 (Imagen 44), el cual es menos favorable que el terreno correspondiente a la Opción 3. Por estas razones se ha preferido estudiar solo el diseño anterior.

Los resultados de la comparativa entre ambas opciones se presentan a continuación:

	GN + Enfriadora	Geotermia + GN + Enfriadora
COSTE INICIAL (real) (€)	2.078.358	2.891.137
COSTE INICIAL (corregido) (€)	1.902.392	2.421.566
COSTE OPERACIONAL en 20 años (real) (€)	7.174.407	6.396.039
COSTE OPERACIONAL en 20 años (corregido) (€)	4.756.037	4.241.704
COSTE TOTAL (real) (€)	9.252.765	9.287.177
COSTE TOTAL (corregido) (€)	6.658.429	6.663.270
EMISIONES TOTALES (TnCO₂)	17.668	16.575
COSTE OPERACIONAL en 20 años con emisiones (€)	5.572.391	5.005.343
COSTE TOTAL con emisiones (corregido) (€)	7.474.783	7.426.910

Tabla 37.- Comparativa final de las alternativas para calor y frío.

Comparativa costes

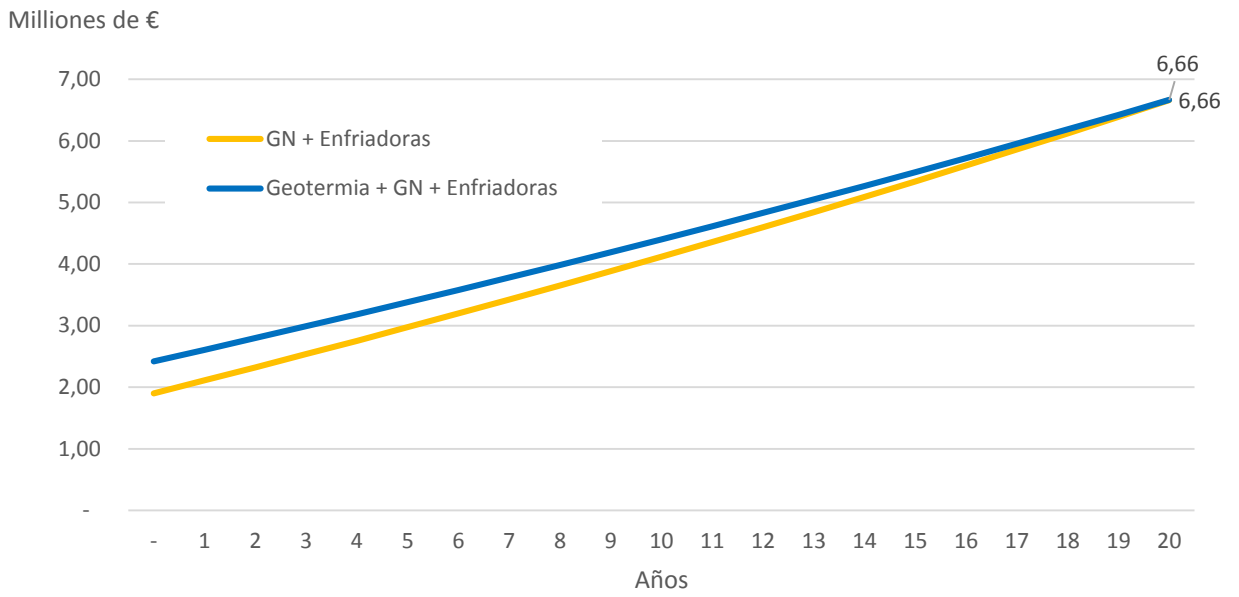


Gráfico 35.- Comparativa final de costes para climatización.

Comparativa emisiones

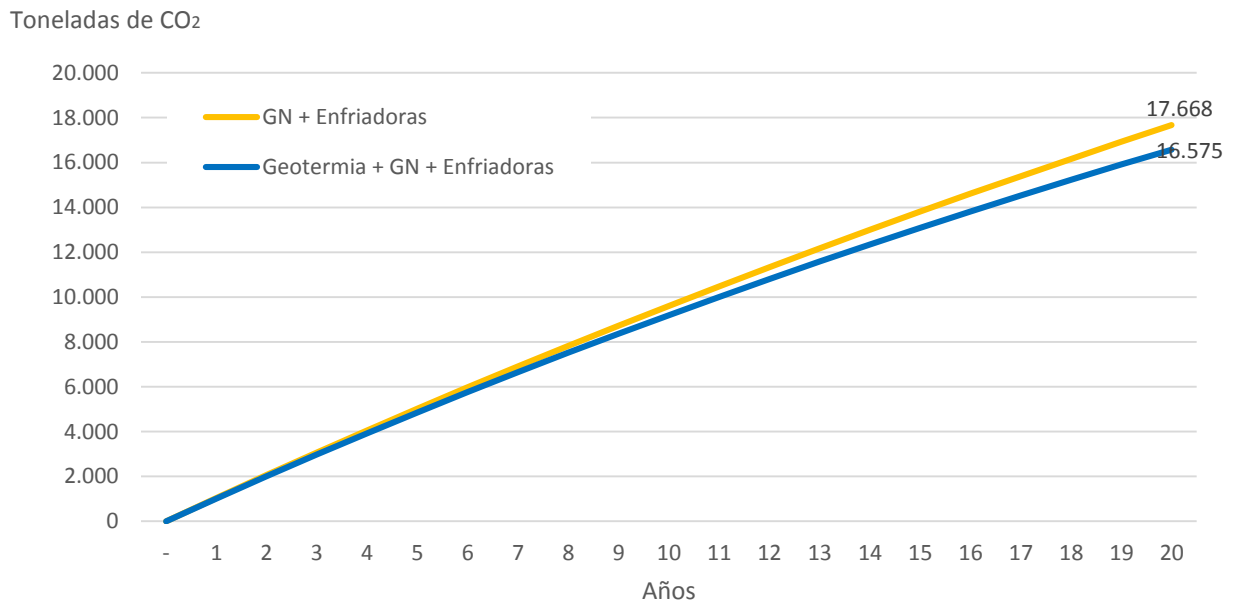


Gráfico 36.- Comparativa final de emisiones para climatización.

La siguiente gráfica muestra los resultados considerando los costes sociales intermedios:

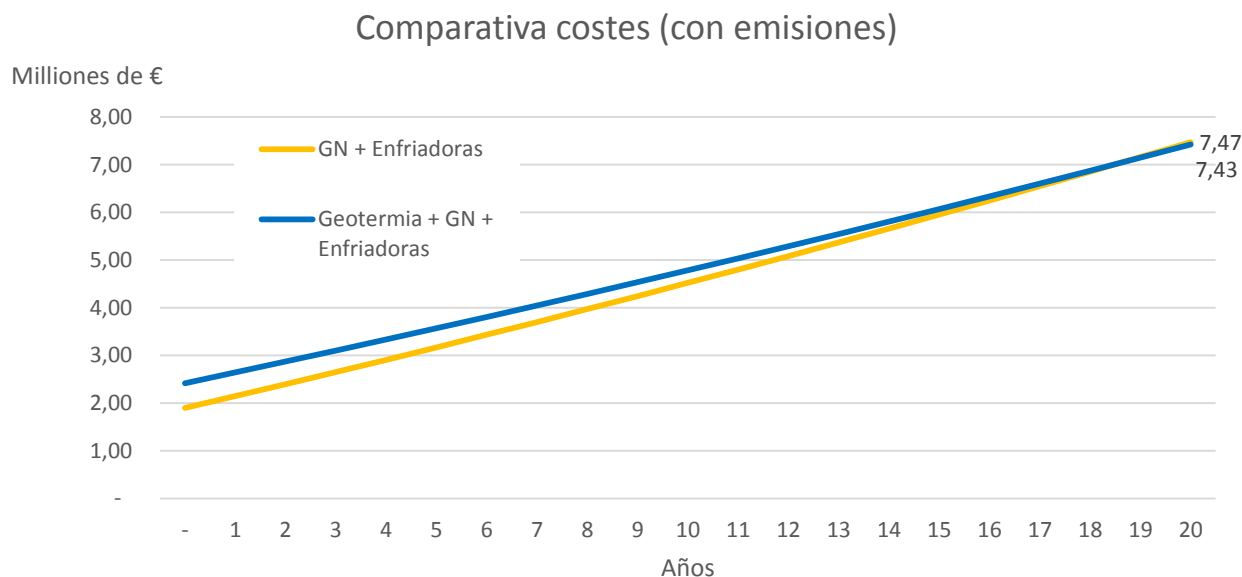


Gráfico 37.- Comparativa final de costes para climatización incluyendo emisiones.

Teniendo en cuenta que el margen de error del análisis será considerable al haberse empleado en él multitud de estimaciones (precios de los equipos, del mantenimiento, eficiencias, tasas de incremento de precios y emisiones, etc), y dado los márgenes tan estrechos que separan ambas opciones (la diferencia entre costes totales corregidos con emisiones es tan solo de un 0,5%), lo más justo supone declarar un empate técnico entre ambas alternativas. Un buen modo de desempatar es considerar algún factor importante que no se ha ya tenido en cuenta hasta ahora, por ejemplo la confianza en las tecnología empleada. En este sentido, está claro que la opción que usa la instalación geotérmica será la que más riesgos presente, por ser una tecnología menos probada en nuestro país. Desde este punto de vista, la opción más lógica es la constituida por enfriadoras y calderas de gas natural. A continuación analizaremos en más detalle la implantación de esta alternativa en el aeropuerto.

11.2.2.2 Sustitución de los sistemas existentes

En esta parte se estudiará la sustitución de las bombas de calor y grupos de frío que dan servicio al Edificio Terminal del aeropuerto por una instalación de enfriadoras condensadas por agua (mayor eficiencia) y calderas de gas natural para calefacción.

11.2.2.2.1 Elección de los equipos

En este punto conviene entrar en un estudio más detallado de la instalación de climatización actual, la cual se corresponde con los esquemas mostrados en la Imagen 45 y la Imagen 46. Como vemos se trata de una instalación de 4 tubos en la que tanto el circuito primario como el secundario son de caudal constante, por lo que todas las bombas son de flujo constante. El sistema trabaja actualmente con una temperatura de consigna de 10°C para frío y 40°C para calefacción, valores que se mantendrán constantes tras la reforma.

Para mayor claridad del diagrama se han ignorado equipos secundarios que deben existir en cualquier red hidráulica de climatización, como válvulas, depósitos de expansión, sensores... así como las bombas hidráulicas auxiliares (una para cada circuito de la red primaria, una para la impulsión a fancoils y otra para la impulsión a climatizadoras). En el circuito de calor existe un circuito auxiliar para calentar el agua de entrada a una temperatura mínima de 15°C, en el cual se emplean calderas eléctricas y un intercambiador de calor que usa el agua del pozo (a una temperatura constante de 20 – 21°C), el cual tampoco ha sido representado por no ser de interés en el diseño de la nueva instalación. Las tuberías de impulsión y retorno que comunican los fancoils y climatizadoras del Edificio Terminal con la Central Energética discurren por una galería de servicio subterránea una vez abandonan el sótano de la Central Energética.

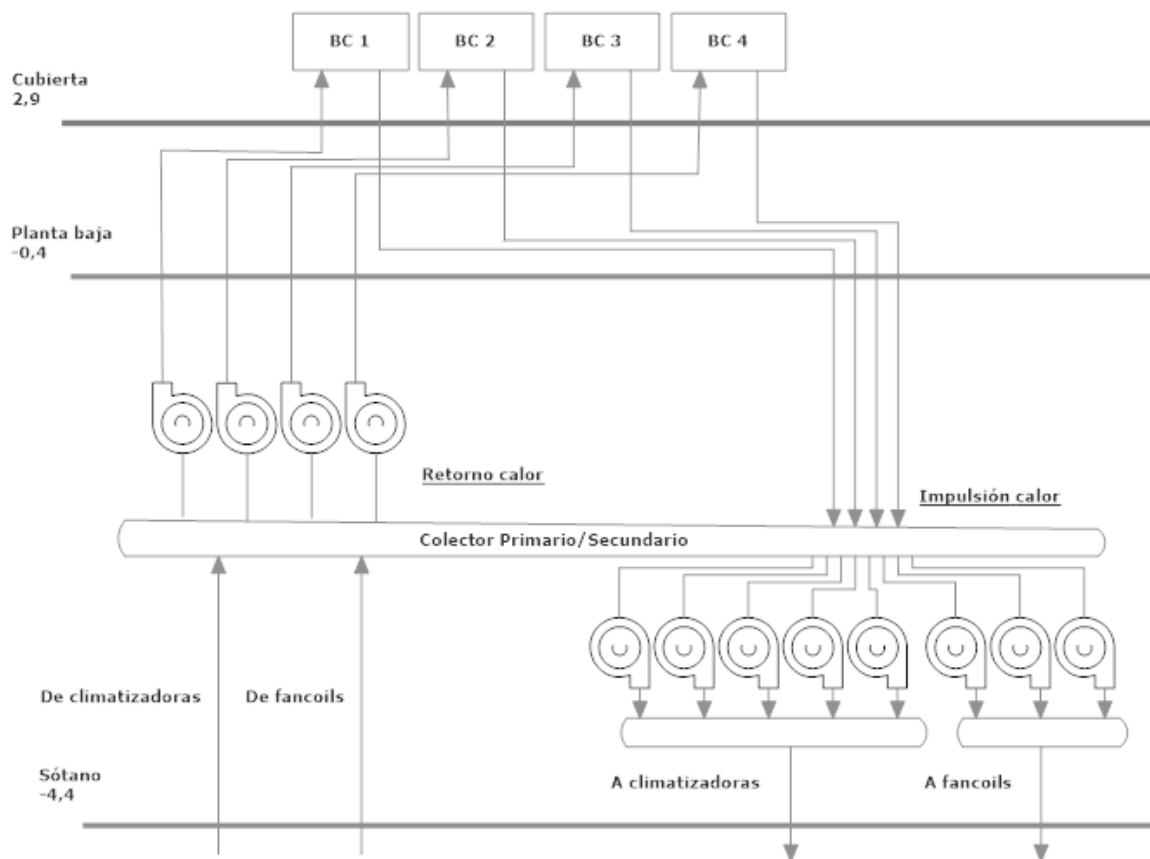


Imagen 45.- Diagrama de los circuitos de climatización de calor de la Central Energética⁸⁵.

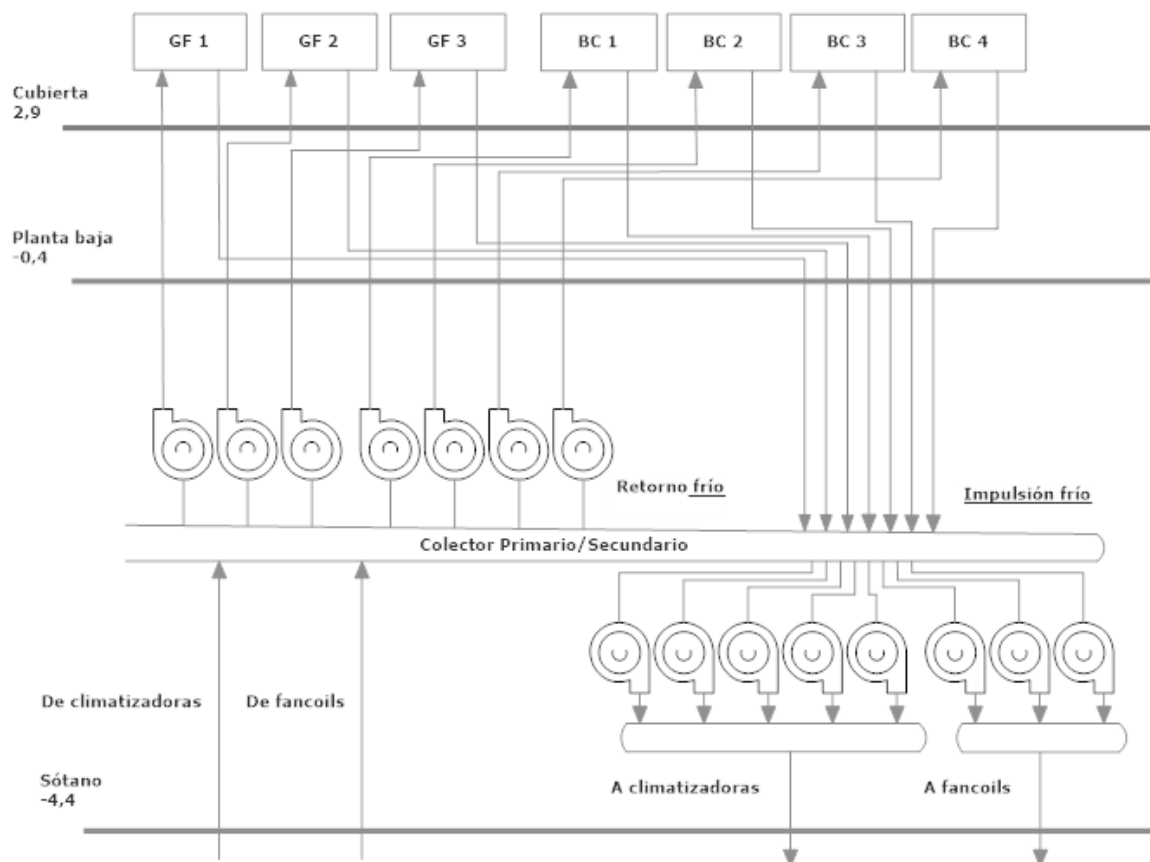


Imagen 46.- Diagrama de los circuitos de climatización de frío de la Central Energética⁸⁵.

⁸⁵ Diagramas de elaboración propia a partir de datos y planos proporcionados por el Aeropuerto de Sevilla.

Los equipos elegidos son:

- **Enfriadora.-** Deberá contarse con una enfriadora o un grupo de éstas para una potencia térmica mínima de 5.904 kW. En principio se preferirá la instalación de un grupo de al menos 2 enfriadoras para aumentar la seguridad del suministro. Para la elección de los equipos concretos se precisa de un software específico, el cual, en la mayoría de empresas no se encuentra a disposición del consumidor, sino que serán los técnicos de cada empresa los que realicen esta tarea de selección. Los datos de entrada para esta selección, la cual ha sido llevada a cabo por la empresa Carrier España han sido:
 - La potencia total demanda.
 - La temperatura del agua de distribución (o salida del evaporador), que corresponde a la de la instalación actual, es decir, 10°C.
 - La temperatura de salida de condensación (o temperatura de entrada en la torre de refrigeración), la cual ha sido estimada fijando un salto térmico en el condensador de 5°C mediante la siguiente fórmula:

$$T_{et} = \frac{\Delta T_c}{\varepsilon} + T_{bh}$$

Donde T_{et} es la temperatura de entrada a la torre de refrigeración;

ΔT es el salto térmico en la torre, el cual, despreciando las pérdidas en conductos dada la cercanía entre enfriadoras y torres, debe ser igual al salto térmico en el condensador de la enfriadora, es decir, 5°C;

ε es la eficiencia de la torre, para la que se ha usado un valor típico del 60%;

$T_{bh} = 25,6^\circ\text{C}$ es la temperatura máxima de bulbo húmedo del Aeropuerto de Sevilla para un percentil del 99%.

Obtenemos por tanto un resultado de $T_{et} = 33,9^\circ$, por lo que T_{st} (temperatura de salida de la torre) serán $28,9^\circ\text{C}$, y la aproximación de temperatura son $3,3^\circ\text{C}$, valor que se encuentra dentro del rango normal (entre 3 y 4 grados).

La solución aportada por la empresa Carrier España consiste en 3 enfriadoras de tornillo modelo 30XW-P1762. Las características más importantes de cada unidad han sido recopiladas en la siguiente tabla a modo de resumen:

Modelo	30XW-P1762
Potencia frigorífica	1.932,3 kW
Potencia térmica a disipar	2.225,1 kW
Eficiencia nominal (EER)	6,47
Eficiencia estacional⁸⁶	4,857
Temperatura entrada al evaporador	15°C
Temperatura salida evaporador	10°C
Caudal evaporador	92,7 l/s
Salto de presión del evaporador	7,51 mca
Temperatura entrada al condensador (agua de refrigeración)	28,9°C

⁸⁶ Calculado con CE3X-GT para Sevilla, Intensidad Alta-24h, enfriadoras agua-agua de antigüedad inferior a 5 años a partir del EER (6,47).

Temperatura entrada al condensador (agua de refrigeración)	33,9°C
Caudal condensador	106,63 l/s
Salto de presión del condensador	5,57 mca
Precio	160.000 €

Tabla 38.- Especificaciones técnicas de la enfriadora seleccionada.

Como podemos calcular, la potencia térmica total del grupo de enfriadoras es 5796,9 kW, unos 107,1 kW inferior a la necesaria, para cubrir éste pico de potencia usaremos una enfriadora condensada por aire de pequeña potencia Airlan ANL 580, la cual cuenta con una potencia nominal de 111 kW y una eficiencia nominal de 2,75.

El conjunto de 3 enfriadoras necesitarán, además, de una o varias torres de refrigeración para enfriar el agua en el circuito de refrigeración que llega los condensadores. Basándonos en el pequeño análisis realizado en el Apartado 3.3.3.2, y considerando la eficiencia como criterio prioritario, nos decantaremos por una torre de refrigeración abierta de tiro inducido, ya que resulta la opción más económica y eficiente entre las consideradas. Además, para renovar el caudal, podría emplearse agua subterránea extraída del pozo cercano a la Central Energética, la cual, además, podría ser descalcificada empleando la descalcificadora que se encuentra dentro de la misma. Ya que la cubierta de la Central donde estas torres van emplazadas cumplía anteriormente la función de resistir pesados equipos de climatización (un total de 65,36 toneladas repartidas en 155,5 m² de cubierta), a falta de un cálculo concreto (se carece de detalles estructurales del edificio), podemos suponer que será una superficie apta para resistir el peso de estos equipos.

La solución proporcionada por la empresa EWK para la potencia a disipar, el caudal, y las temperaturas de condensación y de bulbo húmedo para el emplazamiento considerado, consiste en 4 torres de refrigeración EWK 1800/09. Las características principales para cada una de estas torres se proporcionan en la siguiente tabla:

Potencia del ventilador	22 kW
Potencia frigorífica	1.674,4 kW
Pérdidas por evaporación	0,7 l/s
Pérdidas por arrastre	0,0016 l/s
Largo	4,264 m
Ancho	4,264 m
Altura	4,83 m
Pérdida de carga	0,35 mca
Peso vacío	3.400 kg
Peso lleno	14.000 kg
Precio (torre + variador de frecuencia + escaleras)	56.243,59 €

Tabla 39.- Especificaciones técnicas de la torre de refrigeración seleccionada.

- **Calderas.-** Deberán instalarse una caldera o un grupo de éstas para una potencia térmica nominal igual o superior a 1.253 kW. Las calderas de condensación serán la opción más eficiente a tener en cuenta, por su alta eficiencia y por su idoneidad para trabajar en condiciones de baja temperatura, como es nuestro caso. De entre las calderas existentes en el mercado nos hemos decantado por la caldera de

condensación Die Dietrich C-630 Eco 1300, la cual es en realidad un equipo formado por dos calderas de igual potencia, factor que redundará en beneficio de la seguridad del suministro. Las principales características de esta caldera son:

Potencia útil ($P_{u,caldera}$) (Retorno de 35°C)	1.293 kW
Rendimiento anual (PCI y retorno de 35°C)	106%
Rendimiento anual (PCS y retorno de 35°C)	95,4%
Largo	2,271 m
Ancho	1,46 m
Altura	1,76 m
Caudal nominal ($Q_{caldera}$)	51,8°C
Caudal mínimo	15,6°C
Precio	58.800 €

Tabla 40.- Principales características de la caldera elegida.

11.2.2.2.2 Estudio económico

Además de los costes de la maquinaria, que ya son conocidos, debemos calcular los costes debidos a tuberías, válvulas, colectores, bombas de distribución, dispositivos de seguridad, etc. Para estimar estos costes recurriremos a un proyecto similar, como el realizado en la Universidad Politécnica de Valencia (VALNU 2014). En este proyecto, en el que se realizó una reforma de la central de climatización de un edificio empleando una enfriadora de agua con torre de refrigeración y bomba de calor, el coste de estos elementos (para el circuito primario, como es nuestro caso) ascendió a un 44%, o lo que es lo mismo, un 78,6% del precio total de la maquinaria. En nuestro caso usaremos este mismo porcentaje. El desglose de costes totales se resume en la siguiente tabla:

Elemento	Número de unidades	Precio Unidad (€)	Precio total (€)
Enfriadora condensada por agua 30XW-P1762	3	160.000	480.000
Enfriadora condensada por aire ANL 580	1	19.017	19.017
Torre de refrigeración EWK 1800/09	4	56.243,59	224.974,36
Caldera de Gas natural Die Dietrich C-630 Eco 1300	1	58.800	58.800
Coste total maquinaria			782.791,36
Coste tuberías, valvulaje, bombas, etc.	-	-	615.000
COSTE TOTAL			1.397.791,36

Tabla 41.- Resumen de costes de la reforma para climatización.

Como datos de entrada del estudio de viabilidad se han empleado, además del coste inicial:

Demanda frío	6.600.000 kWh _t
Demanda calor	1.020.000 kWh _t
Eficiencia para frío de los equipos CLIMAVENETA (ponderadas por su potencia)	2,199
Eficiencia para calor de los equipos CLIMAVENETA (ponderadas por su potencia)	2,006
Coste anual de mantenimiento CLIMAVENETA⁸⁷	8,28 €/kW
Coste anual de mantenimiento enfriadoras agua-agua⁸⁸	7,07 €/kW
Coste anual de mantenimiento calderas⁸⁸	1,66 €/kW
Eficiencia frío nuevos equipos⁸⁹	4,786
Eficiencia calor nuevos equipos	95,4%
IPC	2,4%
Emisiones electricidad	649 gCO ₂ /kWh _e
Tasa de reducción de emisiones eléctricas anuales	2,3%
Coste electricidad (sin IVA)	0,086 €/kWh
Incremento interanual de la tarifa eléctrica	5,5%
Emisiones Gas natural	204 gCO ₂ /kWh (PCI)
Coste Gas natural	0,041 €/kWh
Incremento del precio del gas natural	5,8%
Tasa de descuento	3,5%

Tabla 42.- Datos de entrada del estudio económico de la reforma para climatización.

Los resultados del estudio de viabilidad se presentan a continuación, en ellos se ha tenido en cuenta además los costes 2 para las emisiones ahorradas, el cual se ha definido anteriormente (ver pag. 158).

	Sin costes por emisiones	Con costes por emisiones (Coste 2)
Payback simple	7 años	6 años
Payback (tasa de descuento 3,5%)	9 años	7 años
TIR 10 años	6,0%	10,1%

⁸⁷ Dato obtenido de (Radov, y otros 2009) para bombas de calor de mediana potencia en edificios terciarios (1£=1,38€).

⁸⁸ Ver Anexo de la Tabla 27.

⁸⁹ Valor de eficiencia corregido considerando el consumo de los ventiladores de las torres de refrigeración de la siguiente forma: $\eta_{\text{corregido}} = \eta_{\text{estacional enfriadoras}} \cdot \frac{P_{\text{enfriadoras}}}{P_{\text{enfriadoras}} + \text{torres de refrigeración}}$. El valor para $\eta_{\text{estacional enfriadoras}}$ ha sido alculado con el programa CE3X-GT de forma análoga a como se ha venido haciendo hasta ahora despreciándose la influencia de la enfriadora de apoyo.

TIR 15 años	11,7%	15,0%
TIR 20 años	14,0%	16,8%

Tabla 43.- Resultados del análisis económico para la medida propuesta en climatización.

Considerando que la vida útil de esta nueva instalación es superior a los 20 años, los resultados del estudio económico resultan muy favorables, ya que permitirán una recuperación de la inversión incluso inferior a la mitad de su vida útil.

11.2.2.2.3 Emisiones ahorradas

Las emisiones totales ahorradas se muestran en la siguiente gráfica para un plazo de 20 años:

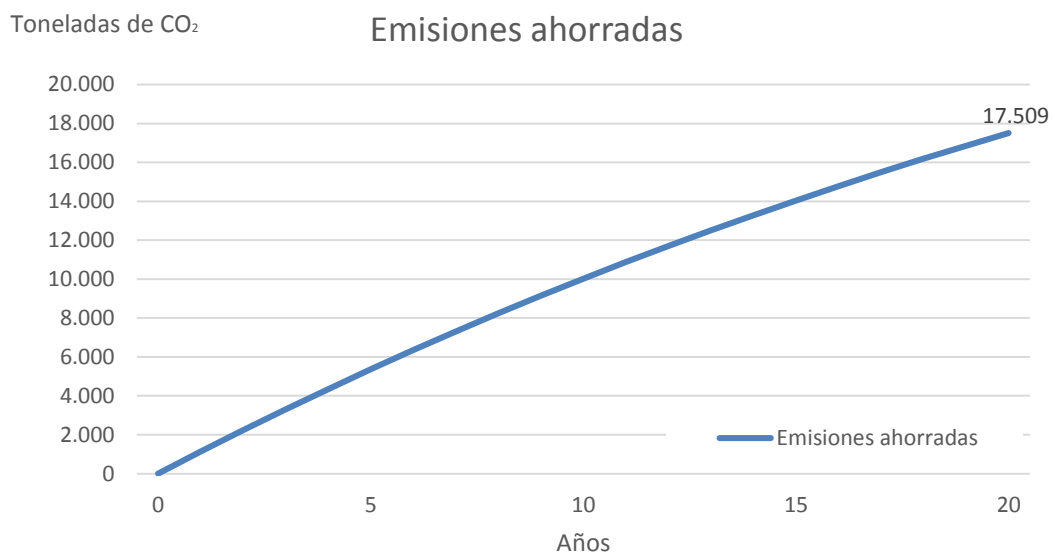


Gráfico 38.- Emisiones ahorradas en climatización con la medida propuesta.

Como vemos, las emisiones ahorradas con esta medida son considerables, ya que año ahorraremos casi un 30% de emisiones de CO₂ en climatización, lo que supone en torno a un 16% de todas las emisiones generadas en la Terminal.

11.2.2.2.4 Planos

Para completar el estudio se han realizado dos planos:

Plano 1.- Plano esquemático de la instalación de climatización.

Plano 2.- Plano físico de la instalación de climatización (Interior).

Plano 3.- Plano físico de la instalación de climatización (Cubierta).

11.3 Reducción de emisiones mediante la generación eléctrica con energías renovables

Dado que toda la energía consumida en el aeropuerto, excepto la correspondiente a los GSE, aeronaves y Grupos Electrónicos, es energía eléctrica suministrada por un proveedor externo a través de la red pública, y dado que la mayor parte de la misma ha sido obtenida por la combustión de combustibles fósiles, una forma muy efectiva de reducir las emisiones será instalar sistemas de autogeneración eléctrica basados en energías renovables, que abastezcan al aeropuerto de energía limpia. Los sistemas propuestos obtenidos de la tabla resumen de la Sección primera del PFC (Tabla 15) son: instalación solar fotovoltaica, turbinas eólicas, y cogeneración.

11.3.1 Instalación solar fotovoltaica

Se considerará la construcción de una instalación solar fotovoltaica conectada a la red interna exclusivamente para autoconsumo, ya que, desde que retiraron los incentivos económicos por inyección a la red pública no resulta rentable vender la energía a la red pública en lugar de autoconsumirla.

La instalación estará formada por paneles solares montados sobre soportes fijos, descartando el uso de mecanismos de seguimiento solar. Además, se realizará la hipótesis de que toda la energía proporcionada por las placas será empleada de forma instantánea en la terminal, es decir, sin que sea necesario el uso de baterías. Esta hipótesis parece a priori razonable, ya que debemos considerar que este edificio necesita de un abastecimiento energético continuo elevado, y que además, la producción máxima que podremos obtener con la instalación fotovoltaica coincidirá presumiblemente con los momentos más calurosos del verano, los cuales se corresponderán a su vez con los momentos de máxima demanda eléctrica del edificio por la alta demanda de refrigeración de las instalaciones y el efecto de la estacionalidad. Una vez obtenido un valor final de la energía eléctrica que podrá ser generada con esta instalación podremos estimar mejor la validez de esta hipótesis.

11.3.1.1 Elección del emplazamiento

A la hora de elegir un buen emplazamiento para la instalación fotovoltaica deberán tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Será necesaria una gran superficie llana y libre de obstáculos, y que no esté destinada a otros usos, como el movimiento de personas o vehículos.
- Éste debe estar lo más expuesto posible a la radiación solar, evitándose en lo posible aquellos que reciban sombra a lo largo del día.
- No debe suponer un peligro para las operaciones en el aeropuerto, evitándose, por ejemplo, aquellos lugares donde exista la posibilidad de colisión con una aeronave que se haya salido de la pista.
- Tendrán prioridad aquellas áreas próximas al Edificio Terminal, ya que éste será el destinatario de la energía generada.

Finalmente, el emplazamiento que mejor cumple con las consideraciones anteriores resulta ser la cubierta de las Salas de Embarque, la cual cuenta con una superficie rectangular de 288x15m², es decir unos 4.320m², completamente libres de obstáculos, con una exposición muy buena a la radiación solar y desprovista en la actualidad de cualquier uso. Esta superficie aparece delimitada de azul en la siguiente fotografía, en la que un boceto de la disposición de los paneles solares ha sido dibujado en color negro:

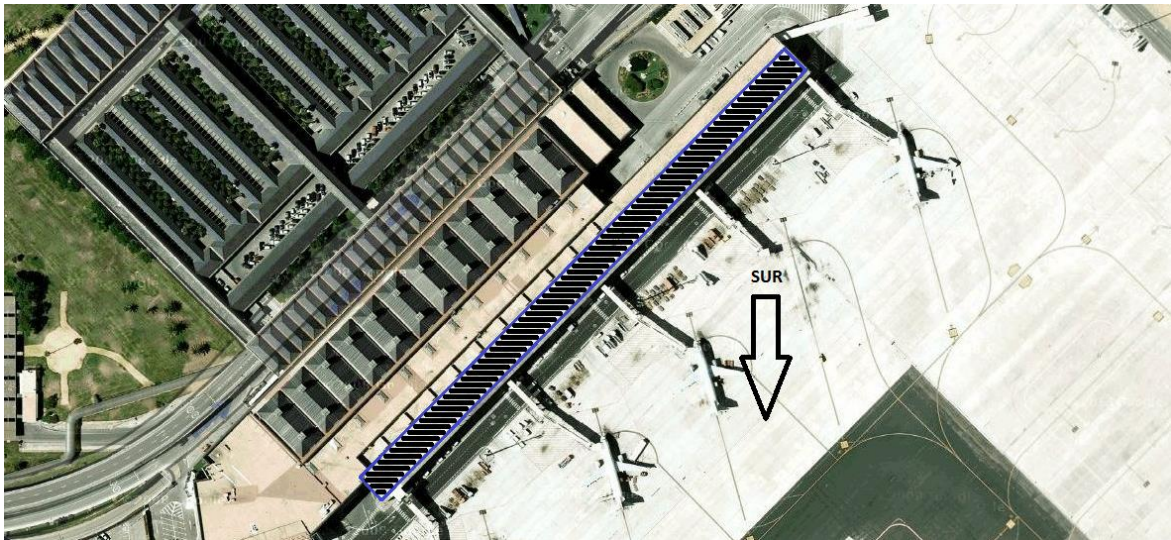


Imagen 47.- Emplazamiento considerado para la instalación fotovoltaica.

Como vemos en el boceto, los módulos deberán estar orientados hacia el Sur, ya que, en el hemisferio norte, es ésta la orientación más eficiente, es decir, la que permite recibir mayor cantidad de radiación a lo largo del año.

11.3.1.2 Elección del tipo de generador y diseño de la instalación

El nuestro caso, para la elección del generador se nos plantea un doble objetivo: por un lado debemos aumentar la rentabilidad, esto es, conseguir paneles con la mejor relación posible potencia/coste, y por otro aprovechar al máximo el espacio disponible, lo que dependerá fundamentalmente de la eficiencia de los paneles.

Como parámetro para seleccionar el módulo empleado se utilizará la relación *Coste por kW_p/Rendimiento*. Se escogerá el módulo con el menor valor de este parámetro de entre los módulos considerados, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Marca Panel	Superficie (mm)	P _{mod} (Wp)	Rendimiento	Precio (€)	Parámetro de elección
SOLARWORLD policristalino	1675x1001	245	14,61%	336	9,39
SOLARWORLD monocristalino	1675x1001	240	14,31%	330	9,61
REC	1665x991	250	15,15%	320	8,45
KYOCERA	1662x990	245	14,89%	372	10,20
SCHOTT policristalino	1685x993	250	14,94%	287	7,68
SCHOTT monocristalino	1652x990	250	15,29%	304	7,95
HYUNDAI policristalino	1645x983	235	14,53%	287	8,40
HYUNDAI monocristalino	1645x983	250	15,46%	303	7,84
SHÜCCO	1639x983	245	15,21%	266	7,39
SUNTECH	1640*992	250	15,37%	245,66	6,39
LDK	1642*994	250	15,32%	238	6,22

Tabla 44.- Comparación de paneles fotovoltaicos⁹⁰.

⁹⁰ Fuente: Listas de precios (TechnoSun 2015) y (Bastan Renovables 2013).

El módulo elegido por tanto será el correspondiente a la marca LDK, modelo 250P-20. Sus principales características se recogen en la siguiente tabla:

Potencia	250 W _p
Corriente en punto de máxima potencia	8,27 A
Tensión en punto de máxima potencia	30,3 V
Tensión a circuito abierto	37,7
Intensidad de corriente a circuito cerrado	8,69
Tensión máxima	1.000 V
Eficiencia del módulo	15,32
Dimensiones	1.642x994x40 mm
Peso	19 kg
Precio (sin IVA)	238,24 €

Tabla 45.- Características principales del módulo elegido.

Para calcular la potencia total máxima de la instalación debemos conocer el número máximo de módulos que podremos instalar, para lo que, a su vez, debemos conocer la inclinación de éstos y la distancia mínima que deberá existir entre las distintas filas de módulos:

- *Cálculo del ángulo de inclinación.*

La inclinación (β) tendrá un valor óptimo (β_{opt}), el cual depende principalmente de la latitud (ϕ) y puede hallarse mediante la siguiente fórmula simplificada, obtenida mediante análisis estadístico:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,60|\phi|$$

Siendo la latitud del aeropuerto de Sevilla unos 37,42°, con la fórmula anterior obtenemos una inclinación óptima de **29,5°** respecto a la horizontal.

- *Cálculo de la distancia entre filas.*

Se ha realizado el diseño con los paneles en posición vertical, ya que los soportes verticales son más baratos que los horizontales y además, considerando la forma geométrica de la cubierta, mediante esta configuración se aprovecha de forma más eficiente el espacio disponible. El espacio entre filas deberá ser igual a la distancia mínima permitida (d_{min}), la cual responde a la siguiente ecuación (IDAE 2011):

$$d_{min} = h \times k$$

Donde h es igual a la altura de los paneles, es decir, $h = l \cdot \sin(\beta_{opt})$. Siendo l la longitud mayor del panel (paneles colocados en vertical), $h = 809$ mm.

k es un factor adimensional al que se le asigna el valor $1/\tan(61^\circ - \text{latitud})$, por tanto para Sevilla (latitud = 37,42°) k es igual a 2,291.

Con esto obtenemos que $d_{min} = 1,128 \cdot l = 1.852$ mm, luego la separación entre dos filas consecutivas será igual a $1,13 \cdot l + l \cdot \cos(\beta_{opt}) = 2 \cdot l = 3.284$ m.

Conocidos estos datos, el número máximo de paneles se ha calculado gráficamente como se puede ver en la Imagen 48, obteniéndose finalmente un total de 1,043 módulos, lo que hace una potencia instalada máxima total de 260,75 kW_p.

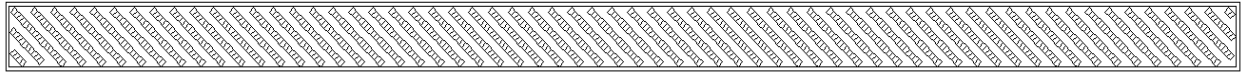


Imagen 48.- Cubierta con el número máximo de módulos fotovoltaicos.

Para esta potencia utilizaremos un solo inversor de conexión a red, opción que nos aportará dos ventajas importantes: en primer lugar, una disminución del coste inicial, derivada de que, en general, un inversor de gran potencia es menos costoso que varios de menor potencia, ya que en un solo aparato se concentran todos los componentes electrónicos, y el mantenimiento es menos costoso; y en segundo lugar, nos permitirá aumentar la tensión del cableado de entrada al inversor, lo que disminuirá las pérdidas energéticas (las pérdidas en un conductor son inversamente proporcionales al cuadrado de la tensión)..

Se ha elegido un inversor TOTAL SOLAR OGC 250 kW, el cual se emplea para instalaciones fotovoltaicas de hasta 275 kW_p. Las principales características del inversor elegido se presentan en la siguiente tabla:

SALIDA	
Potencia nominal CA	250 kW
Tensión nominal CA	400 V
Corriente de salida	361 A
ENTRADA	
Máxima potencia de entrada	275 kW _p
Tensión nominal VDC	576 V
Máximo voltaje de circuito abierto	900 V
Número máximo de entradas	6
Intensidad de entrada máxima (para cada entrada)	100 A
Rango de seguimiento de potencia	450 – 850 VDC
Factor de potencia	> 0,99
OTROS	
Rango de temperaturas	-30°C – +50°C
Eficiencia	96%
Dimensiones (Altura x Ancho x Fondo)	120x185x94,5cm
Peso	1.350 kg
Precio (sin IVA)	36.800 €

Tabla 46.- Características principales del inversor elegido.

Será importante conectar los módulos solares de forma que obtengamos una tensión de entrada cercana a 576 V en condiciones nominales. Para ello conectaremos 19 módulos en serie en un total de 54 ramales, obteniendo

una tensión de 575,7 V (menor al kilovatio de tensión máxima soportada por los módulos). De esta forma, el número de módulos instalados finalmente será de 1.026, con lo que dispondremos de una potencia instalada final de $250 W_p \times 1.026 \text{ módulos} = 256,5 kW_p$, con esta configuración obtenemos además una tensión de circuito abierto de $37,7 V \times 19 \text{ módulos} = 716,3 V$, menor a la tensión máxima admisible del inversor. Colocaremos además 6 cajas de conexión de grupo, cada una de las cuáles unirá 9 ramales, que conectados en paralelo constituirán cada una de las 6 entradas del inversor. La intensidad nominal en cada entrada será de $8,27 A \times 9 \text{ ramales} = 74,43 A$, mientras que la intensidad máxima de cortocircuito será de $8,69 A \times 9 \text{ ramales} = 78,21 A$, el cuál es inferior al valor máximo admitido por el inversor. Aunque sería necesario un estudio más detallado en el que tuviésemos en cuenta la influencia de las variaciones térmicas del clima en los valores de tensión e intensidad de la instalación, entendemos que este estudio excede el objetivo del Pfc, por tanto, los márgenes existentes entre los valores eléctricos de la instalación fotovoltaica y los límites admisibles del inversor para estos valores será considerado suficientemente amplio para suponer que no se producirán problemas de incompatibilidades por este factor.

La instalación constará, por tanto, de tres líneas o tramos diferenciados:

- **Ramal – Conexión de grupo.-** Cables de CC que unen la salida de cada ramal con la caja de conexión de grupo correspondiente, la cual se encuentra junto a cada grupo de módulos. La instalación se diseñará para que la longitud de estos tramos (54 en total) sea la mínima posible. La intensidad en estos tramos será la correspondiente a los módulos, es decir, 8,27 A en condiciones nominales. Se emplearán fusibles para protegerlo de sobreintensidades.
- **Conexión de grupo – Inverso.-** Cables de CC que unen cada uno de las 6 cajas de conexión de grupo con el inversor, y constituyen cada una de las entradas de éste. Por ellos circula una intensidad nominal de 74,43 A. El más largo de estos tramos, tal como puede verse en el plano correspondiente, tiene una distancia aproximada de 600 metros, por lo que suponiendo conductores bipolares de cobre y una caída de tensión del 1,5% (valor máximo recomendado en (IDAE 2011)), la sección mínima más desfavorable necesaria (s_{CC}) será:

$$s_{CC} = \frac{2 \times L_{tr} \times I_{cc}}{U \times 0,015 \times \sigma} = \frac{2 \times 78,21 A \times 130 m}{575,6 V \times 0,015 \times 56 \frac{m}{\Omega mm^2}} = 42 mm^2$$

Donde I_{cc} es la intensidad de cortocircuito, igual a 78,21 A.

L_{tr} es la longitud del tramo (600 m para el caso más desfavorable).

σ es la conductividad del cobre ($56m/\Omega mm^2$).

U es la tensión, que en condiciones nominales será de 575,6 V.

Como vemos, el valor obtenido para este tramo (el más desfavorable) es perfectamente razonable.

Estos tramos se encontrarán protegido por un interruptor magnetotérmico y un protector de sobretensiones transitorias (o descargador de sobretensiones) que proteja la instalación de picos de tensión inesperados como los provocados por la caída de rayos en sus inmediaciones.

- **Inversor – Conexión a la red.-** Tramo de alterna que une el inversor con el punto conexión a la red. Los valores eléctricos en esta línea se corresponden con los valores nominales a la salida del transformador del inversor, 400 V y 361 A. Ya que no se prevé inyección del excedente a la red pública (hipótesis inicial aún por confirmar) la conexión a la red interna podría realizarse en la parte de baja tensión de la Sala de Alta Tensión del Edificio Terminal. Este proceso, por ser la instalación superior a 100 kW de potencia, carece de una norma específica que lo regule, al contrario de lo que sucede para potencias inferiores, casos en los que sí es de aplicación el Real Decreto 1699/2011, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia. A la espera de la creación de una reglamentación al respecto, como ya existe en comunidades como Madrid, Cataluña, Navarra o País Vasco, la principal ley de aplicación directa es el Real Decreto 1955/2000, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. En cualquier caso, deberá informarse de dicha conexión a la compañía eléctrica suministradora (Iberdrola), la que deberá aprobar la conexión comprobando que las condiciones de la acometida no suponen un peligro para la seguridad del suministro eléctrico.

Las protecciones de este tramo se diseñarán para cumplir al menos los requisitos exigidos en el Real

Decreto 1699/2011, por lo que, teniendo en cuenta las protecciones ya incluidas en el equipo inversor, se colocará un descargador de tensiones, un interruptor magnetotérmico, un fusible, y un interruptor diferencial que permita garantizar la seguridad de los usuarios. Además, para prevenir cualquier vertido a la red, la compañía suministradora puede requerir la instalación de un controlador dinámico de potencia que permita ajustar la energía entregada por la instalación a lo que se consume en cada momento y evitar así cualquier tipo de vertido a la red pública.

Los 1.026 módulos estarán colocados físicamente sobre la cubierta en 59 filas de 17 módulos cada una, una fila de 14 y otra fila de 9 módulos.

Para albergar el inversor de la instalación fotovoltaica se empleará una caseta para inversores solares Arco Solar 4800, cuyas dimensiones, 4,8 x 2,4 metros de planta, y 2,55 metros de alto, serán más que suficientes para albergar tanto al inversor como a las protecciones.

A continuación calcularemos la energía eléctrica máxima que podremos obtener en la cubierta del Edificio Terminal para este modelo.

11.3.1.3 Cálculo de la energía generada

La energía eléctrica anual que podemos generar con la instalación fotovoltaica puede calcularse como sigue:

$$E_e = G_a \times PR \times \eta_{mod} \times S_{fot} = G_a \times PR \times P_{fot}$$

donde

G_a es la irradiación anual,

PR es el rendimiento de producción global.

η_{mod} es el rendimiento de los paneles.

S_{fot} es la superficie total de los 1026 paneles.

P_{fot} es la potencia instalada de la instalación.

Para poder resolverla debemos obtener los valores para los componentes de la ecuación:

- **Cálculo de la irradiación anual (G_a).**

La irradiación anual (G_a) sobre la superficie de nuestros paneles será la suma de 3 componentes: la irradiación directa, la difusa y la reflejada. En este caso no será necesario realizar cálculos, ya que existen datos estadísticos mensuales para la localidad de la Rinconada, a tan solo unos 10 kilómetros del aeropuerto a través de la web de la Agencia Andaluza de la Energía. Estos datos se han obtenido para azimut de 0° (Sur) y una inclinación de 30° (inclinación óptima):

Mes	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	ANUAL
G kWh/m ²	107,8	132,9	168,1	187,1	204,7	214,2	223,7	216,4	179,3	145,2	115	88,9	1.983

Tabla 47.- Irradiación mensual para el Aeropuerto de Sevilla.

- **Estimación del coeficiente de pérdidas de producción (PR):**

Estas pérdidas, cuyos valores son tomados de (ASIF 2008), son debidas a:

- Tolerancia y degradación.- Los módulos empleados presentan una tolerancia positiva, luego consideramos que este factor compensará la degradación que pueda producirse. Se tomará por tanto un valor óptimo del 0%.
- Sombras.- Por la situación del Edificio Terminal de Pasajeros, consideraremos que los paneles colocados en su cubierta no se encontrarán en condiciones de sombra por la presencia de montañas, edificios o árboles, a lo largo del día, por tanto, consideraremos un valor óptimo del 1% para estas pérdidas.
- Dispersión de características.- En general los módulos no trabajarán todos en las mismas condiciones, sino que habrá pequeñas disparidades que ocasionaran pérdidas de potencia para el conjunto de la instalación. Se tomará un valor medio del 3,8% para este tipo de pérdidas.
- Suciedad.- Los módulos colocados con una inclinación superior a 15° presentan pérdidas por

suciedad acumulada en general no superiores al 3. En nuestro caso usaremos un valor medio del 2,7%.

- Eficiencia de la conversión AC/DC y otras pérdidas ocasionadas en el inversor.- Tal como podemos calcular en su hoja de especificaciones técnicas, la eficiencia del inversor empleado es del 96%. Por tanto usaremos un valor del 4% de pérdidas ocasionadas por el inversor, el cual se corresponde también con la estimación óptima proporcionada en (ASIF 2008).
- Caída de tensión por cableado.- Se diseñará para cables de un diámetro adecuado que permita minimizar las pérdidas por este concepto, se tomarán no obstante valores medios del 0,8% para continua y 0,8% para alterna.
- Temperaturas de operación de las células solares.- Pérdidas producidas por la diferencia entre la temperatura del ambiente y la temperatura de operación de las placas, aproximadamente un 0,5% por cada grado por encima de los 25°C. Se tomará para esta causa el valor medio del 6,5%.
- Falta de disponibilidad por mantenimiento.- En nuestro caso se tomará un valor óptimo del 1% para este tipo de pérdidas.

En la siguiente tabla se desglosan las pérdidas energéticas y se presenta el valor total obtenido de sumar cada una de las pérdidas anteriores:

Sombras	0%
Tolerancia y degradación	0%
Dispersión	3,8%
Suciedad	2,7%
Eficiencia del inversor	4%
Caída de tensión por cableado	1,6%
Temperaturas	6,5%
Disponibilidad por mantenimiento	1%
Pérdidas totales	19,6 %

Tabla 48.- Estimación de las pérdidas en la instalación fotovoltaica⁹¹.

Teniendo en cuenta estas pérdidas obtendremos un factor de producción global (PR) aproximado de **0,804**.

Con lo que ya estamos en disposición de calcular la energía anual:

$$E_e = G_a \times PR \times P_{fot} = 1.983 \frac{kWh}{m^2} \times 0,804 \times 256,5 kWp = 408.946 kWh$$

Esta energía es muy pequeña comparada con la energía total demandada anualmente por la Terminal de Pasajeros, lo que nos permite afirmar que, salvo contadas excepciones que puedan estar provocadas por un funcionamiento anómalo del aeropuerto, toda la energía producida podrá emplearse directamente en el aeropuerto ya que siempre habrá carga suficiente. Esto puede verse mejor en el siguiente gráfico, en el que se ha empleado la irradiancia mensual para calcular la evolución anual de la producción energética.

⁹¹ Valores tomados de (ASIF 2008), excepto la eficiencia del inversor, la cual corresponde al inversor específico utilizado.

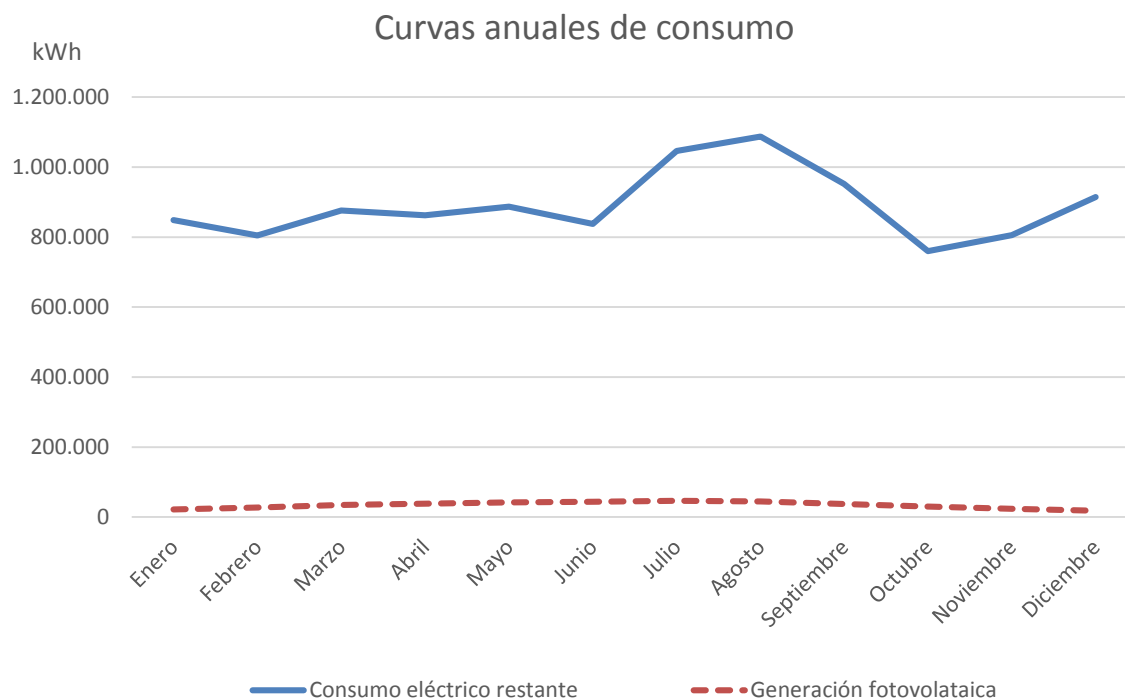


Gráfico 39.- Comparativa entre la curva de generación fotovoltaica y la curva anual de consumo eléctrico de la Terminal⁹².

11.3.1.4 Emisiones ahorradas

Una vez conocido este valor ya estamos en disposición de calcular las emisiones ahorradas (EA_{fot}) mediante la siguiente ecuación:

$$EA_{fot} = EG_{el} - EG_{fot} = 649 - 40 = 609 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}_e$$

donde EG_{el} son las emisiones generadas por el consumo eléctrico, en España 649 gCO₂eq/kWh_e.

EG_{fot} son las emisiones generadas por los paneles solares fotovoltaicos durante su ciclo de vida, aproximadamente 40 gCO₂eq/kWh_e (NREL 2012).

Además, como se ha venido haciendo hasta ahora, consideraremos una reducción de estas emisiones de un 2,3% anual. Las emisiones totales ahorradas se muestran en la siguiente gráfica para un plazo de 40 años coincidente con la vida útil de los módulos.

⁹² Fuente: (Aena Aeropuertos 2011).

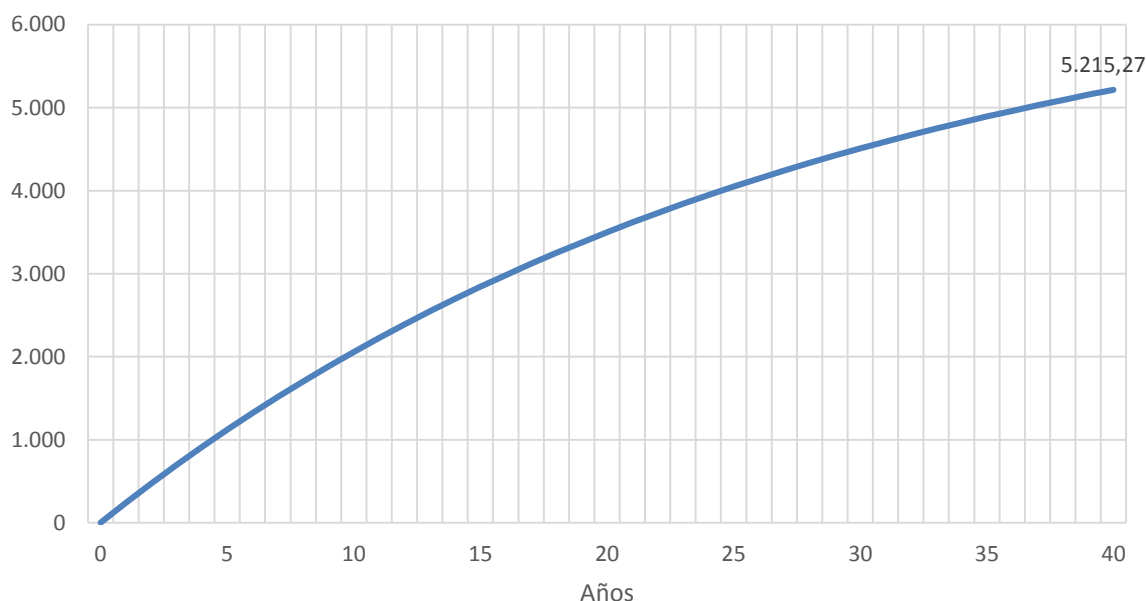


Gráfico 40.- Emisiones ahorradas con la instalación fotovoltaica.

En este caso el volumen de emisiones ahorradas en este caso es relativamente pequeño, ya que anualmente solo lograremos reducir las emisiones de la Terminal en un 3,5%. Esto es debido a que la potencia instalada de la instalación es considerablemente pequeña en proporción a la potencia a la que funciona la Terminal.

11.3.1.5 Estudio económico

Para estimar el coste completo de la instalación fotovoltaica debemos conocer, además del precio de los módulos, el inversor y la caseta, los cuáles son conocidos, los costes de:

- **Soportes.-** Se adquirirán las siguientes estructuras:

Número	Tipo	Precio unidad (€) – Sin IVA	Precio total (€) – Sin IVA
120	Estructura de aluminio para 7 módulos verticales	404,53	48.543,6
62	Estructura de aluminio para 3 módulos verticales	200,37	12.422,94
Total de estructuras			60.966,54

Tabla 49.- Precio de soportes⁹³.

- **Equipamiento eléctrico.-** En general comprenden los conductores, las protecciones, las cajas de conexión y las canalizaciones. Para estimar este coste se tomará el coste unitario calculado en (Sardinero s.f.), donde se realizó un proyecto de instalación fotovoltaica similar al aquí estudiado sobre la azotea de una nave industrial. En particular el coste unitario en dicho estudio para esta partida fue de 74,11€/kW_p, por tanto, en nuestro caso, estos costes sumarían un total aproximado de **19.000 €**.
- **Costes de instalación.-** Estos costes se calcularán de forma homóloga al caso anterior. En este caso los costes unitarios en (Sardinero s.f.) fueron de 250€/kW_p, luego en nuestro caso ascenderían a un total de

⁹³ Fuente: Precios obtenidos de (Bastan Renovables 2013).

unos **64.000 €**.

Resumiendo, los costes de la instalación serían:

Concepto	Precio (sin IVA)
Módulos	244.434,24 € (238,24 € x 1026 módulos)
Soportes	60.966,54 €
Inversor	36.800 €
Caseta inversor	3.590 €
Controlador dinámico de potencia⁹⁴	695 €
Equipamiento eléctrico	19.000 €
Instalación	64.000 €
TOTAL	434.888 €

Tabla 50.- Desglose de costes de la instalación fotovoltaica.

Como datos de entrada del estudio de viabilidad se han empleado, además del coste inicial:

Coste operativo⁹⁵	40 €/kWp
IPC	2,4%
Coste electricidad (sin IVA)	0,086 €/kWh
Incremento interanual de la tarifa eléctrica	3,5%
Tasa de descuento	3,5%

Tabla 51.- Datos de entrada del estudio económico de la instalación fotovoltaica.

El estudio de viabilidad económica ha proporcionado los siguientes resultados:

	Sin costes por emisiones	Con costes por emisiones (Coste 2)
Payback simple	11 años	9 años
Payback (tasa de descuento 3,5%)	12 años	11 años
TIR 20 años	8,07%	12,98%
TIR 30 años	10,72%	12,98%
TIR 40 años	11,67%	12,98%

Tabla 52.- Resultados del estudio económico de la instalación fotovoltaica.

Considerando que la vida útil de estas instalaciones ronda los 40 años (ASIF 2008), los resultados del estudio económico resultan muy favorables, luego a los beneficios medioambientales, que suponen un ahorro de más de 5.200 toneladas de CO₂ durante su vida útil, hay que sumar el beneficio económico que suponen los plazos

⁹⁴ Precio correspondiente al controlador dinámico de potencia CDP0 de la marca circuitor.

⁹⁵ Valores tomados de www.coenersol.com, para plantas de conexión a red colocadas en cubierta. Corresponden a 10 €/kWp debidos a seguros y coberturas de riesgos y 30 €/kWp debidos al mantenimiento técnico de la planta.

de payback obtenidos y que permitirán que la instalación proporcione beneficios económicos durante la mayor parte de su vida útil.

11.3.1.6 Planos

Para completar el estudio se han realizado dos planos:

Plano 4.- Plano esquemático de la instalación fotovoltaica.

Plano 5.- Plano físico de la instalación fotovoltaica.

11.3.2 Instalación eólica

Como se vio en la Sección A del presente PfC, las instalaciones eólicas en aeropuertos presentan mayores problemas operativos, especialmente por el riesgo de violación de las servidumbres aeronáuticas al penetrar las superficies limitadoras de obstáculos, es por ello que en este apartado analizaremos solo la opción de incorporar una instalación mini-eólica, en la que los aerogeneradores usados serán de pequeña altura, con lo que se evitará este problema. Se tratará de una instalación conectada a red para autoconsumo, y las mismas consideraciones realizadas en el apartado anterior al respecto para la instalación fotovoltaica serán válidas en este caso.

11.3.2.1 Elección del emplazamiento

Si bien en el caso de la instalación fotovoltaica la elección del emplazamiento resultó relativamente sencilla, en este caso será una decisión más delicada. Para determinar el emplazamiento será determinante conocer la dirección del viento dominante, o las principales direcciones, en caso de no existir una claramente predominante. Esta información será obtenida de la Rosa de Vientos del Aeropuerto de Sevilla, la cual se presenta a continuación:

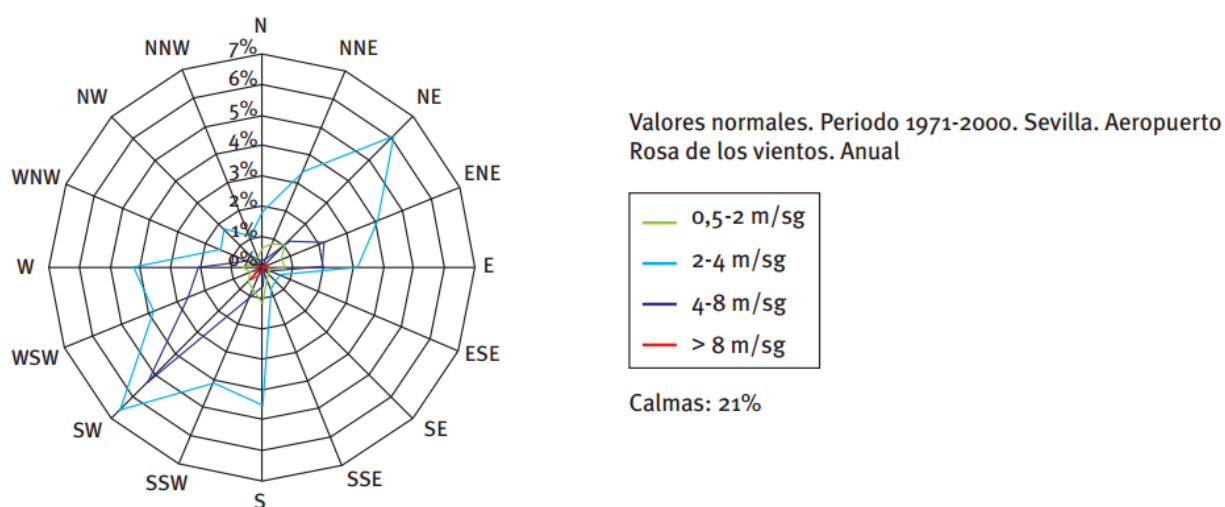


Imagen 49.- Rosa de Vientos del Aeropuerto de Sevilla⁹⁶.

Como vemos, la dirección dominante es suroeste, por tanto, debemos colocar los aerogeneradores mirando en dicha dirección. Otras consideraciones a tener en cuenta para la colocación de estos aparatos son las siguientes:

- Las turbinas deben formar hileras perpendiculares a la dirección principal del viento de forma que el flujo que cada una reciba se vea perturbado lo menos posible por las demás. Por este motivo, tanto las hileras entre sí como los aerogeneradores dentro de cada hilera deberán guardar distancias de separación mínimas, las cuales dependerán principalmente del tipo de aerogenerador empleado y del diámetro del rotor.
- Deberán evitarse zonas cercanas a edificios u otros obstáculos que pudieran obstruir el flujo o generar turbulencias.
- La presencia de accidentes del terreno con pendientes suaves, como pequeñas colinas o lomas, podría ejercer una influencia muy positiva si los aerogeneradores son colocados en la cima de estas, ya que el aire, al subir estas pendientes se va acelerando, y es en el punto más alto donde alcanza su velocidad máxima.
- La potencia proporcionada por las turbinas aumentará con la altura, ya que el viento tiende a aumentar su velocidad al aumentar la distancia respecto al suelo y disminuir la influencia de la capa límite. Es por ello que los tejados o cubiertas de los edificios podrían constituir buenos emplazamientos. En estos casos convendrá no situar los aerogeneradores al filo de las paredes exteriores (en la cara del viento dominante), sino un poco retrasados, y así evitar las turbulencias generadas en el viento incidente al

⁹⁶ Fuente: (IDAE 2010c).

escalar éstas. Asimismo, tampoco deberán colocarse de espaldas a muros u otros obstáculos que puedan generar turbulencias.

- Deberá valorarse la proximidad al Edificio Terminal, ya que la energía generada deberá ser transportada a este posteriormente.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se ha determinado como lugar más óptimo la cubierta del Edificio Terminal, en particular aquella situada a una cota aproximada de 13,8 metros, la cual se representa enmarcada en azul en la Imagen 50. En la misma imagen se señala un posible obstáculo que podría perturbar el aire recibido en los aerogeneradores aguas abajo del mismo. Este obstáculo no es sino el letrero de SEVILLA que mira hacia la pista de vuelo recibiendo a los pasajeros tras el aterrizaje. Al tratarse de un obstáculo poroso debe evitarse la colocación de aerogeneradores a una distancia en la dirección del viento de entre 7 y 10 veces la anchura del letrero, la cual es aproximadamente 1 metro, debiendo existir, por tanto, una separación de entre 7 y 10 metros. Este obstáculo también podrá ignorarse si existe una separación de al menos 10 metros entre éste y la altura inferior del rotor, circunstancia que difícilmente podrá darse en nuestro caso debido a la cercanía de la superficie horizontal interna que impide colocar aerogeneradores con mástiles altos. Estas distancias mínimas han sido obtenidas de (Agencia Andaluza de la Energía 2011).



Imagen 50.- Emplazamiento propuesto para la instalación eólica e identificación de obstáculos.

11.3.2.2 Elección del tipo de generador y diseño de la instalación

En la actualidad existe una amplia gama de micro-turbinas eólicas, divididas principalmente en turbinas de eje horizontal (HAWT) y de eje vertical (VAWT) (ver pag. 84). Los principales requisitos que debemos considerar en nuestra tarea de encontrar un aerogenerador apropiado se enumeran a continuación:

- La altura del mástil no debe ser demasiado elevada, esto es importante ya que no debemos penetrar la superficie horizontal interna, que en el aeropuerto de Sevilla, con pista de Aproximación Instrumental de No Precisión y Clave de Aeródromo 4E, se encuentra a una altura de 45 metros. Considerando que los aerogeneradores se encuentran sobre la cubierta a una altura aproximada de unos 14 metros, la altura máxima disponible para los aerogeneradores es de 31 m.'
- Debe soportar bien las altas temperaturas de la zona.
- El modelo de aerogenerador debe estar diseñado para su empleo en cubiertas de edificios, cuidando que no se introduzcan vibraciones que puedan suponer un perjuicio estructural o generar altos niveles de ruido, a su vez estos no deben ser pesados, en cuyo caso podría necesitarse realizar un refuerzo estructural de la cubierta que podría disparar los costes de la instalación.

- Es preferible emplear modelos diseñados para funcionar con vientos a baja velocidad como los que generalmente nos encontraremos en el aeropuerto, además deberán buscarse modelos que trabajen bien en presencia de turbulencias como las que podremos esperar en la cubierta del edificio a baja altura y con la existencia de obstáculos como el letrero antes comentado.
- Debido al poco espacio disponible será preferible emplear aerogeneradores que necesiten poca separación unos de otros y dispongan de una alta relación potencia/peso.
- Por último, un factor primordial en la elección será el factor coste/potencia del aerogenerador, el cual conviene que sea lo más reducido posible. También habremos de buscar aerogeneradores con elevada vida útil y fiabilidad que puedan aumentar la rentabilidad de la instalación, así como de fabricantes fiables que ofrezcan buenas garantías y ofrezcan productos de calidad.

Considerando estos requisitos y comparándolos con la comparativa realizada en el 5.3.2, parece, a priori, que los candidatos más apropiados se encontrarán dentro de la gama de aerogeneradores de eje vertical.

- Modelo elegido

Tras realizar una extensa búsqueda centrándonos en este tipo de aerogeneradores, el modelo que finalmente ha sido elegido, por ajustarse mejor al conjunto de requisitos antes expuestos, es el aerogenerador de eje vertical **Aeolos-V 5kW**. A continuación se ofrece una descripción básica del producto en la que se mostrarán aquellos datos más importantes o que serán de utilidad más adelante:

- Especificaciones técnicas:

Tipo de rotor	Darrieus H de 3 palas
Altura del rotor	3,6 m
Diámetro del rotor	4 m
Peso de la turbina	285 kg
Temperatura de operación	-20°C – 50°C
Vida útil	20 años
Velocidad de encendido	2,5 m/s
Velocidad máxima	55 m/s
Nivel de ruido	<45 dB
Garantía	5 años

Tabla 53.- Especificaciones técnicas del aerogenerador elegido.

- Curva de potencia:

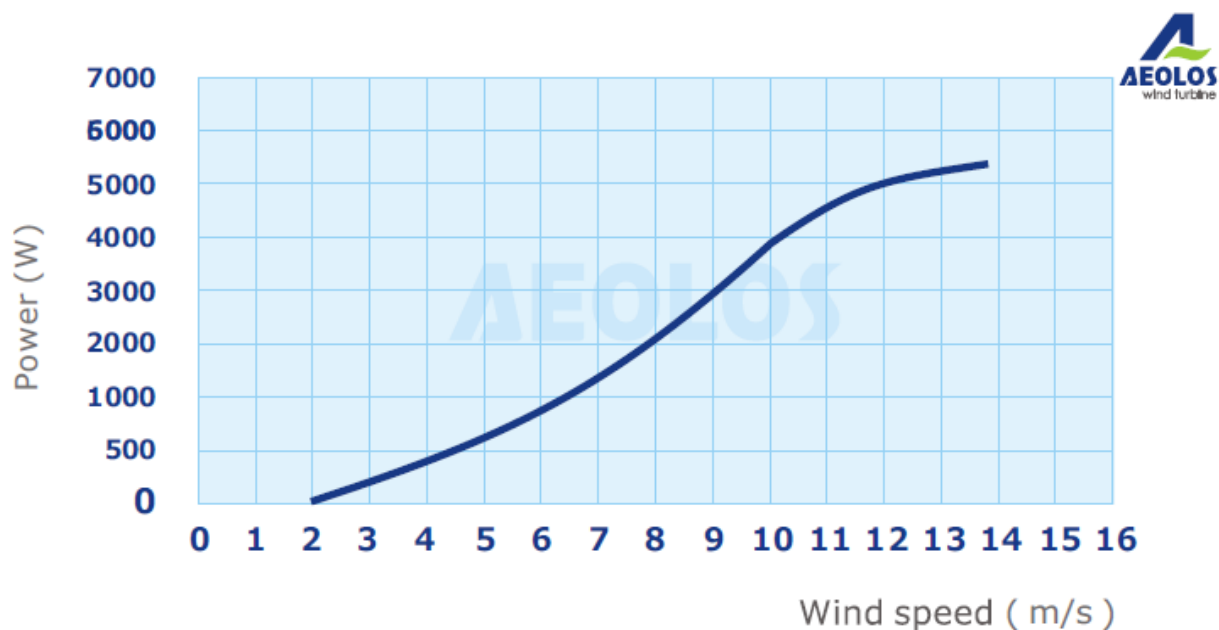


Gráfico 41.- Curva de potencia del aerogenerador elegido⁹⁷.

- Componentes y precios:

Componentes	Precio sin IVA (€)
Turbina	10.549
Mástil para cubiertas (5 m)	1.386
Costes de instalación, inversor/es, conexiones eléctricas y seguros (estimación)⁹⁸	4.774
TOTAL	16.709

Tabla 54.- Precios por componentes del aerogenerador considerado⁹⁷.

Como podemos comprobar, este modelo cumple muy satisfactoriamente con la mayoría de requisitos: baja altura (8,6 metros rotor + 5 metros de mástil), soporta altas temperaturas, posee bajo nivel de ruido (45 dB es el correspondiente a una conversación), baja velocidad de encendido y buena eficiencia a bajas velocidades, buena relación coste/potencia (~3.000 €/kW cuando este valor, para otros productos similares, es de 5.000 € o superior (Orrell y Rhoads-Weaver 2014)), fabricante de calidad reconocida, buen periodo de garantía... Además, se ha seleccionado esta versión de 5kW, en lugar de la de 10 kW ya que esta última se considera muy pesada (solo la turbina pesa casi 700 kg), mientras que para este modelo, el peso de la turbina no llega a los 300 kg. En cualquier caso, si existiese algún riesgo estructural debido al peso, este puede ser solucionado colocando un soporte bajo el aerogenerador que sirva para distribuir el peso sobre una superficie mayor, además, dicho soporte, si está bien diseñado, podría evitar problemas por las posibles vibraciones que pudiesen existir.

- Número de aerogeneradores

En principio se adoptará el criterio de colocar la mayor cantidad de aerogeneradores posibles respetando las distancias mínimas entre ellos, para las que se tomará un valor de 5D en dirección paralela al viento dominante y 3D en la dirección perpendicular (Babiri 2011), donde D es el diámetro del rotor, siendo en este caso $D = 4\text{m}$. El número máximo de aerogeneradores se ha calculado gráficamente como puede verse en la siguiente imagen:

⁹⁷ Fuente: Cortesía de AEOLOS Wind Turbine.

⁹⁸ Se ha utilizado un valor del 40%, estimado en función de los datos recogidos en (CANWEA 2008).



Imagen 51.- Resultados del cálculo del emplazamiento óptimo de los aerogeneradores.

Como vemos, en la cubierta pueden ser colocados hasta un máximo de 19 aerogeneradores. El siguiente paso será calcular la energía eléctrica anual producida por cada uno de ellos.

11.3.2.3 Cálculo de la energía generada

En primer lugar, para hallar la energía generada por la instalación, debemos obtener la distribución de velocidades del viento en la zona a lo largo del año, información que podemos obtener de la Rosa de Vientos, la cual, además de indicarnos la dirección dominante, también nos da información de la distribución anual de los vientos en función de su potencia y dirección. Sumando los vientos para las distintas direcciones se obtiene la siguiente distribución:

Velocidad (m/s)	Porcentaje (%)
0 – 0,5 (Calma)	21
0,5 – 2	10,5
2 – 4	48
4 – 8	19,5
>8	1

Tabla 55.- Distribución de la velocidad de vientos en el Aeropuerto de Sevilla según la información suministrada por la Rosa de Vientos.

Estos valores están distribuidos en rangos demasiado grandes como para ser usados directamente en el cálculo de la energía anual producida, para el que será preferible disponer de los valores de probabilidad en rangos de 1 m/s. Para conseguir esto se ha recurrido al cálculo numérico para obtener la curva de la función de densidad de probabilidad de la distribución de Weibull que mejor estima nuestro histograma de velocidades (Gráfico 42), ya que se sabe que dicha función modela de forma bastante aceptable, en la mayoría de los casos, el comportamiento del viento en un lugar determinado. El proceso ha sido realizado usando el programa informático MATLAB. La función de Weibull se corresponde con la siguiente ecuación, la cual depende de dos parámetros (λ y k) que deberán ser estimados:

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k} & x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (\lambda, k) > 0$$

donde x en este caso es la velocidad.

λ es el parámetro de escala.

k es el parámetro de forma.

Los valores obtenidos en nuestro caso de los parámetros son $\lambda = 3,072$ y $k = 4.368$.

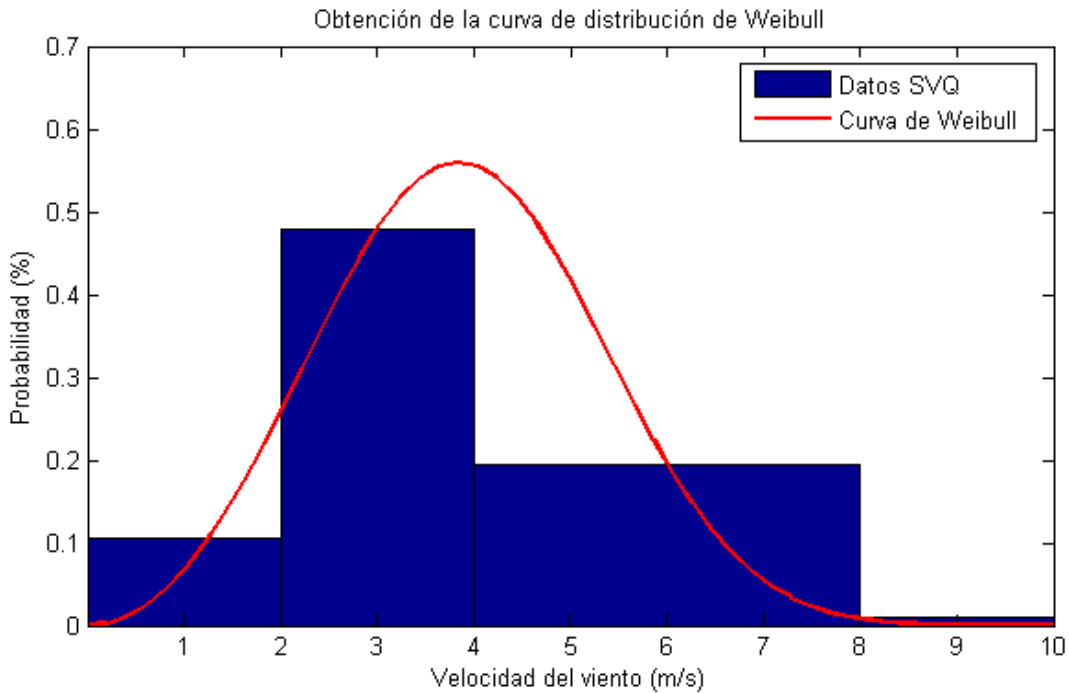


Gráfico 42.- Obtención de la Curva de distribución de Weibull a partir de los datos de la Rosa de Vientos.

Una vez disponemos de esta curva podemos obtener la distribución de velocidades de forma inversa como se ve en el siguiente gráfico:

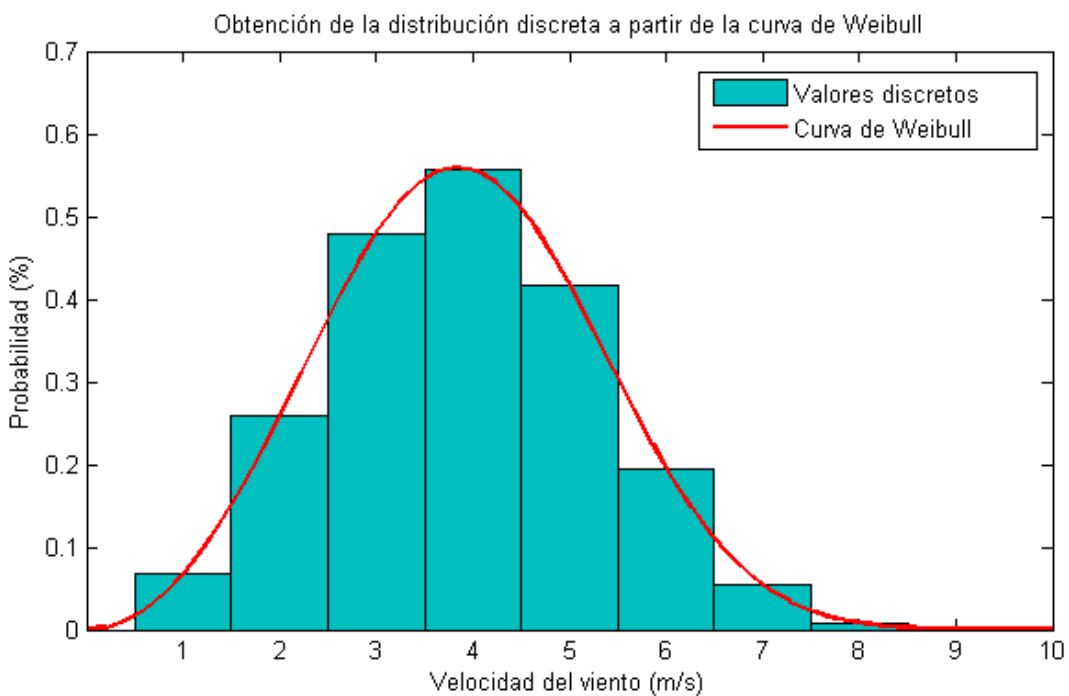


Gráfico 43.- Obtención de la distribución discreta de la velocidad del viento a partir de la curva de Weibull.

Una vez disponemos de esta información ya estamos en disposición de hallar una estimación de la energía eléctrica producida anualmente, tarea que es realizada en la siguiente tabla:

Rango	%	Horas	Potencia	Energía
0-1 m/s	2%	141,04	-	-
1-2 m/s	15%	1.321,01	-	-
2-3 m/s	38%	3.299,89	0,10	329,99
3-4 m/s	55%	4.780,33	0,33	1.553,61
4-5 m/s	51%	4.462,34	0,53	2.342,73
5-6 m/s	30%	2.656,91	0,70	1.859,84
6-7 m/s	11%	962,72	1,00	962,72
7-8 m/s	2%	198,85	1,60	318,16
8-9 m/s	0%	21,90	2,50	54,75
9-10 m/s	0%	0,88	3,50	3,07
TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA POR CADA TURBINA				7.424,9

Tabla 56.- Estimación de la energía eléctrica anual generada por cada turbina⁹⁹.

11.3.2.4 Emisiones ahorradas

Las emisiones ahorradas serán las asociadas a la electricidad que se dejará de adquirir a la red eléctrica menos las emisiones asociadas al ciclo de vida de los aerogeneradores.

$$EA_{eo} = EG_{el} - EG_{eo} = 649 - 41 = 608 \text{ gCO}_2\text{eq/kWh}_e$$

donde EG_{el} son las emisiones generadas por el consumo eléctrico, en España 649 gCO₂eq/kWh_e.

EG_{eo} son las emisiones generadas por los aerogeneradores durante su ciclo de vida, aproximadamente 41 gCO₂eq/kWh_e (Lenzen y Munksgaar 2002).

Las emisiones totales ahorradas durante la vida útil de estos aerogeneradores se muestra a continuación:

⁹⁹ Es importante destacar que, en realidad, la energía generada será algo menor, ya que en este caso no estamos teniendo en cuenta pérdidas por conducción en los cables y transformación de la energía. Esto, sin embargo, no será relevante en el resultado final, el cual se espera sea desfavorable por las pobres características del viento en la zona

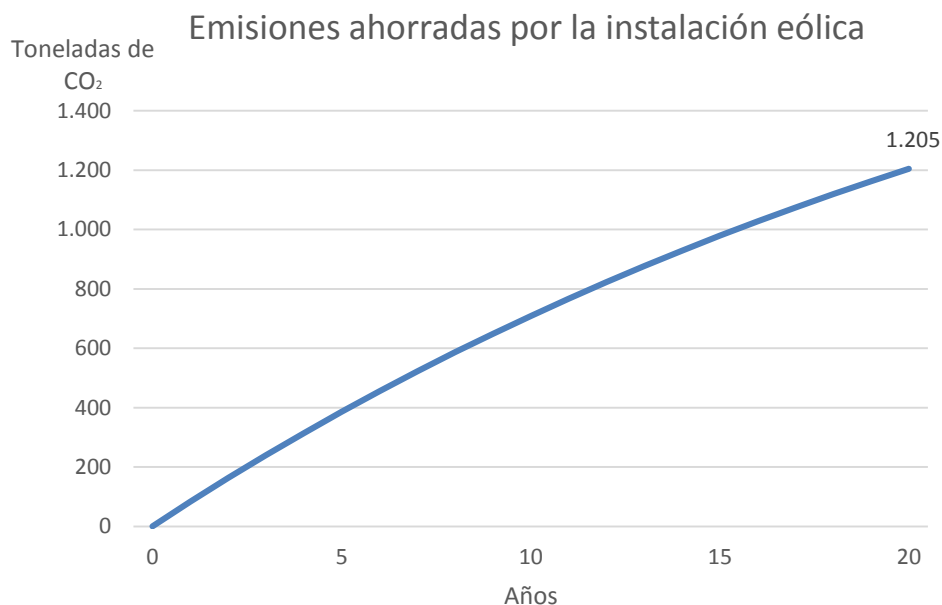


Gráfico 44.- Emisiones ahorradas por la instalación eólica.

Debido a lo insignificante de la potencia instalada en relación a la total de la Terminal, las emisiones que se podrán ahorrar con esta medida son bastante pobres, no alcanzando ni el 1% anual de las totales generadas en la Terminal. Por tanto, la contribución de esta mejora a huella de carbono del aeropuerto puede considerarse prácticamente despreciable.

11.3.2.5 Estudio económico

En este momento estamos en disposición de calcular la rentabilidad de los aerogeneradores. Como datos de entrada del estudio de viabilidad se han empleado:

Inversión inicial	16.709 € × 19 = 317.471€
Coste de O&M anual¹⁰⁰	275 € × 19 = 5.225 €
IPC	2,4%
Coste electricidad (Sin IVA)	0,086 €/kWh
Incremento interanual de la tarifa eléctrica	5,5%
Tasa de descuento	3,5%

Tabla 57.- Datos de entrada del estudio económico de la instalación eólica.

El estudio de viabilidad económica ha proporcionado los siguientes resultados:

	Sin costes por emisiones	Con costes por emisiones (Coste 2)
Payback simple	20 años	18 años
Payback (tasa de descuento 3,5%)	27 años	24 años
TIR 20 años	-0,16%	-1,37%

Tabla 58.- Resultados del estudio económico de la instalación eólica.

¹⁰⁰ Valor obtenido de (Energy Saving Trust 2014). 200£ ≈ 275€

Considerando que la vida útil de estos equipos ronda los 20 años, para los plazos de payback obtenidos concluimos que esta instalación resulta inviable económicamente

11.3.3 Instalación de cogeneración/trigeneración.

En nuestro caso, debido a la importancia de la refrigeración en el consumo de la Terminal, estudiaremos la implantación de un sistema de trigeneración, es decir, una instalación compuesta de un equipo de cogeneración que nos permita obtener electricidad y calor, más una máquina de absorción que nos permita transformar parte del calor obtenido en energía frigorífica. De esta forma se restarán horas de operación a los equipos de frío y calor CLIMAVENETA, mientras que generaremos electricidad para abastecer el resto de instalaciones de la Terminal, obteniendo un rendimiento global muy elevado.

Un primer paso para determinar la viabilidad de este sistema consiste en analizar las curvas anuales de demanda de climatización y consumo eléctrico (obviamente sin incluir consumo eléctrico por climatización), las cuales se muestran a continuación:

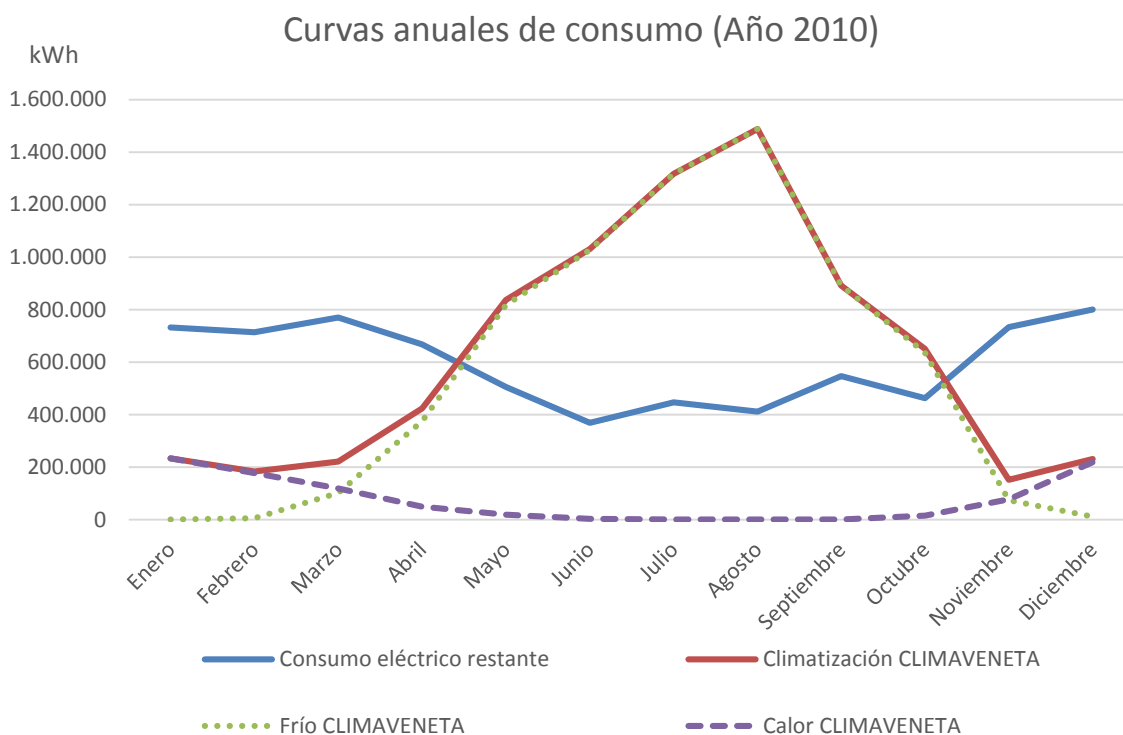


Gráfico 45.- Curvas anuales de consumo¹⁰¹.

Este perfil no resulta el más apropiado ya que cuando la demanda de energía térmica aumenta, la demanda de energía eléctrica disminuye y viceversa. Este fenómeno puede ocasionar que, por ejemplo, en los meses de invierno se produzca un exceso de energía calorífica o en los meses de verano un exceso de energía eléctrica.

Para aumentar la rentabilidad de estos equipos será vital elegir un diseño que minimice la potencia instalada (de lo que dependerá fundamentalmente el coste de los equipos), a la vez que maximice la energía aprovechada. El diseño más conservador en este sentido puede realizarse dimensionando el sistema para satisfacer las necesidades de calefacción, ya que al poseer un consumo anual mucho menor que el consumo eléctrico y de frío, podemos asegurar que tanto para electricidad como para refrigeración, la cantidad de horas que el sistema podrá funcionar a pleno rendimiento con la seguridad de que toda la energía generada puede ser usada será muy elevada. Este diseño resultará en un sistema de trigeneración de una potencia relativamente pequeña (micro-cogeneración), sin embargo, podrá funcionar durante todo el año a plena potencia, lo que maximizará su rentabilidad. Considerando el Gráfico 31 vemos que la capacidad calorífica óptima del sistema de cogeneración debe ser un 60% del total, esto es, 752 kW, valor con el que se podrá cubrir aproximadamente un 80% de la

¹⁰¹ Los datos de consumo eléctrico han sido obtenidos del Aeropuerto de Sevilla. Los datos de consumo de los equipos CLIMAVENETA mensuales se han obtenido a partir de los valores de demanda térmica obtenidos en la Tabla 32, el cuál ha sido distribuido mensualmente usando los datos de la Tabla 61 de grados día para cada mes.

demanda.

Para esta potencia, el equipo de cogeneración más apropiado, tal como puede verse en la comparativa realizada en la Tabla 8, es el motor de combustión interna, el cual presenta un precio considerablemente menor al sistema por turbina de gas y por pila de combustible. Este sistema que puede usarse de forma conjunta con una enfriadora de absorción de simple efecto que nos permita generar frío.

Antes de entrar en un análisis en profundidad para esta alternativa, debido a la incertidumbre que posee desde el punto de vista de su rentabilidad, haremos algunos cálculos que nos permitirán determinar si vale la pena entrar en un estudio más exhaustivo. Para ello usaremos los datos recogidos en la Tabla 8 y otros factores económicos adicionales, que se muestran a continuación:

Equipo de cogeneración por motor de combustión interna	
Coste de capital unitario¹⁰²	1.518 €/kW _e
Coste de O&M	0,01415 €/kWh
Eficiencia eléctrica	31%
Eficiencia térmica	44%
IPC	2,4%
Coste gas natural	0,041 €/kWh
Incremento interanual de la tarifa de gas natural	5,8%
Incremento interanual electricidad	5,5%

Tabla 59.- Datos de entrada del estudio económico para cogeneración.

Haciendo sólo unas pocas cuentas llegamos a la conclusión de que el proyecto no será en absoluto rentable, lo que es debido fundamentalmente a sus altos costes iniciales (aproximadamente un millón euros para la capacidad considerada), y al escaso ahorro que obtendremos en el consumo, ya que, si con 1kW de gas natural, a un precio de 0,41 €, pueden generarse 0,44 kW_t y 0,31 kW_e con este sistema, con los equipos actuales el coste de generación de la misma cantidad de energía es similar. Además, ya que el incremento interanual del coste del gas natural es superior al correspondiente a la electricidad con esta medida solo conseguiremos aumentar el coste y nunca recuperar la inversión.

Tampoco tiene sentido considerar el equipo de absorción, ya que en general su COP será menor a la unidad (menos eficiente que calefacción) y su precio es muy elevado (entre 750 y 800\$ para equipos de efecto simple (Energy Experts 2011)), mientras que el precio del kW_t para refrigeración con los equipos actuales es incluso menor al de calefacción. Resulta obvio, por tanto, que esta opción es inviable.

Para que la cogeneración/trigeneración fuese una alternativa viable se necesitaría un sistema de menor precio por unidad de potencia y con mejores eficiencias, como podría ser el caso de las turbinas de gas. Éstas, sin embargo, solo pueden ser usadas para potencias más elevadas (de entorno a los 5 MW_e), que resultarían en diseños ineficientes para nuestro caso (se desperdiciaría gran parte de la energía térmica generada).

¹⁰² Fuente: (Lako 2010).

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

- ACI – Airports Council International
- ACS – Agua Corriente Sanitaria
- ACU – Air Conditioning Unit (Unidad de Aire Acondicionado)
- AFUE - Annual Fuel Utilization Efficiency (Eficiencia Anual de Consumo de Combustible)
- APU – Auxiliary Power Unit (Unidad Auxiliar de Potencia)
- ASU - Air Start Unit (Unidad de arranque neumático)
- BEV – Battery Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico de Batería)
- BMS – Sistema de Gestión de Edificios (Building Management System)
- CAT – Categoría de Aeródromo
- CDA – Continuous Descent Approach (Aproximación en Descenso Continuo)
- CFL – Compact Fluorescent Lamp
- CH – Confort Higrotérmico
- CHP Combined Heat and Power (Generación eléctrica combinada con calefacción)
- CHCP - Combined Heat Cooling and Power (Generación eléctrica combinada con calefacción y enfriamiento)
- CMMS – Computerized Maintenance Management System (Sistemas de Gestión Computerizada de Mantenimiento)
- CNG – Compressed Natural Gas (Gas natural Comprimido)
- COP – Conference of the Parties (Conferencia de las Partes)
- COP - Coefficient Of Performance (Coeficiente de Rendimiento)
- CTE - Código Técnico de Edificación
- EASA – European Aviation Safety Agency
- ECO – Employee Commute Options (Opciones de Desplazamiento para los Empleados)
- EER - Energy Efficiency Ratio (Indice de Eficiencia Energética)
- EMCS – Energy Management Control System (Sistemas de Control de Gestión Energética)
- EU ETS - European Union Emissions Trading Scheme (Mercado Europeo de Derechos de emisión)
- EV – Electric Vehicle (Vehículo eléctrico)
- FAF – Final Approach Fix (Punto de Aproximación Final)
- FCEV – Fuel-Cell Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico de Celda de Combustible)
- FCFS - First-Come-First-Service
- GEI – Gases de Efecto Invernadero
- GPU – Ground Power Unit (Grupo Electrónico)
- GSE – Ground Support Equipment (Equipos de Asistencia en Tierra a las Aeronaves)
- GWP – Global-Warming Potencial (Potencial de Calentamiento Global)
- HAWT – Horizontal Axis Wind Turbines
- HEV – Hybrid Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico Híbrido)

HID – High Intensity Discharge (Descarga de Alta Intensidad)

HRJ – Hydroprocessed Renewable Jet-fuel (Combustible de aeronaves Renovable Hidroprocesado)

HSPF - Heating Season Performance Factor (Factor de Rendimiento Estacional para Calefacción)

IATA – International Air Transport Association (Asociación de Transporte Aéreo Internacional)

IDAE – Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía

IEE - Intelligent Energy – Europe (Energía Inteligente – Europa)

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático)

IRC – Índice de Rendimiento de Color

ISO - International Organization for Standardization

LED – Light Emitting Diodes (Diodos Emisores de Luz)

LPG – Liquefied Petroleum Gas (Gas Licuado del Petróleo)

LTO – Landing and Take-Off

MIT – Massachusetts Institute of Technology (Instituto de Tecnología de Massachusetts)

O&M – Operaciones y Mantenimiento (Operations and Maintenance)

ICAO – International Civil Aviation Organisation (Organización de Aviación Civil Internacional)

PAPI – Precision Approach Path Indicator (Indicador de Trayectoria de Aproximación)

PCA - Pre-Conditioning Air (Aire Pre-Acondicionado)

PCI – Poder Calorífico Inferior

PEV – Plug-in Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico Enchufable)

PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable)

PHR - Power to Heat Ratio (Relación energía eléctrica-calorífica)

PHR_{aer} – PHR demandado por el aeropuerto

PHR_{CHP} – PHR del sistema CHP

RITE - Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios

SCOP - Seasonal Coefficient of Performance (Coeficiente de Rendimiento Estacional)

SEER - Seasonal Energy Efficiency Ratio (Índice de Eficiencia Energética Estacional)

SP – Spark-spread

STAR - Stewards of Tomorrow’s Airport Resources

TIM – Time-In-Mode

TMA - Transportation Management Association (Asociación para la Gestión del Transporte)

UPS – Uninterruptable Power Supply

UTA – Unidad de Tratamiento de Aire

VASI – Visual Approach Slope Indicator (Indicador Visual de Pendiente de Aproximación)

VAWT – Vertical Axis Wind Turbines

VOC - Volatile Organic Materials - (Materiales Orgánicos Volátiles)

Bibliografía

- ACI. "Guidance Manual: Airport Greenhouse Gas Emissions Management." 2009.
- Ackerman, Holly. "FIDS, BIDS and RIDS, Could One Size Fit All?" *Airport Magazine.Net* 21, no. 2 (2009): 24-26.
- Aena Aeropuertos. *Análisis Energético Edificio Terminal del Aeropuerto de Sevilla*. Aena Aeropuertos, 2011.
- AEOLOS. *Horizontal Axis Wind Turbine VS Vertical Axis Wind Turbine*. AEOLOS Wind Turbine, n.d.
- Aeropuerto de Sevilla. *2012 Información Ambiental*. Aena Aeropuertos, 2012.
- Aeropuerto de Sevilla. *Plan Director*. Ministerio de Fomento, 2001.
- Agencia Andaluza de la Energía. *Guía de la Energía Eólica*. Agencia Andaluza de la Energía, 2011.
- AGES. *Aircraft Ground Energy System*. Innox Steel Technology (IST), n.d.
- AirportWatch. <http://www.airportwatch.org.uk>. 2012. <http://www.airportwatch.org.uk/2012/09/world-travel-and-tourism-council-online-forum-on-climate-change/> (accessed Septiembre 2, 2015).
- Aldridge, K., M. Carreno, T. Rye S. Ison, and I. Straker. "Car Parking Management at Airports: A Special Case?" *Transport Policy* 13, no. 6 (2006): 511-521.
- ASHRAE. *Commercial/Institutional Ground-Source Heat Pump Engineering Manual*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1995.
- ASIF. "Informe Anual 2008." 2008.
- ATAG. *Beginner's Guide to Aviation Efficiency*. Noviembre 2010b.
- . "The Right Flightpath to Reduce Aviation Emissions." *UNFCCC Climate Talks*. Air Transport Action Group, 2010a.
- BAA London Gatwick Airport. "Gatwick Airport Climate Change Report." London, 2009.
- Babiri, John O. "Potencial order of Magnitude Enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays." *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2011.
- Balakrishnan, Hamsa, Indira Deonandan, and Ioannis Simaiakis. *Opportunities For Reducing Surface Emissions Through Surface Movement Optimization*. MIT International Center for Air Transportation (ICAT), 2008.
- Balaras, C.A., E. Dascalaki, A. Gaglia, y K. Droutsa. «Energy Conservation Potential, HVAC Installations and Operational Issues in Hellenic Airports.» *Energy and Buildings* 35, nº 11 (2003): 1105-1120.
- Barrett, S. R. H., R. E. Britter, y I. A. Waitz. «Global Mortality Attributable to Aircraft Cruise Emissions.» *Environmental Science and Technology* 44, nº 19 (2010): 7736-7742.
- Barrett, Stephen B., and Philip. M. Devita. *Airport Cooperative Research Program (ACRP) Synthesis 28: Investigating Safety Impacts Of Energy Technologies On Airports And Aviation*. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2011.
- Bastan Renovables. "Catálogo General 2013." 2013.
- Benya, James, Lisa Hescong, Terry McGowan, Naomi Miller, and Francis Rubinstein. *Advanced Lighting Guidelines*. New Buildings Institute, Inc., 2003.
- Berry, Fiona, Sarah Gillhespy, and Jean Rogers. *Airport Cooperative Research Program (ACRP) Synthesis 10: Airport Sustainability Practices*. Washington D.C: Transportation Research Board, 2008.

- Bloomberg. “Renewable Energy Now Cheaper Than Fossils Fuels in Australia.” *Bloomber New Energy Finance* (Bloomberg New Energy Finance), 2013.
- Boeing. *Current Market Outlook 2013-2032 Market Analysis*. Seattle: Boeing Commercial Airplanes, 2013.
- Boerstra, A., P. Op’t Veld, and H. Eijdens. “The Health, Safety and Comfort Advantages of Low Temperature Heating Systems: a Literature Review.” *Proceedings of the Healthy Buildings conference 2000*. Espoo, Finland, 2000. 6-10.
- Buckley, Paul. “French-German Collaborators Claim Solar Cell Efficiency World Record.” *EE Times-Europe*, 2014.
- Budd, Thomas, Stephen Ison, and Tim Ryley. “Airport Surface Access in the UK: A Management Perspective.” *Research in Transportation Business & Management* 1 (2011): 109-117.
- Bullough, John D. *Issues with Use of Airfield LED Light Fixtures*. Washington D.C.: Airport Cooperative Research Program (ACRP), 2012.
- Bullough, John D., Zongjie Yuan, and Mark S. Rea. “Perceived Brightness of Incandescent and LED Aviation Signal Lights.” *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 2007.
- CANWEA. *Small Wind Turbine Purchasing Guide*. 2008.
- Carbon Trust. <http://www.carbontrust.com/resources/guides/carbon-footprinting-and-reporting/carbon-footprinting>. 2008.
- Cardona, E., A. Piacentino, y F. Cardona. «Energy Saving in Airports by Trigeneration. Part I: Assessing.» *Applied Thermal Engineering* 26 (2006): 1427-1436.
- Carr, Geoffrey. “Sunny Uplands.” *The Economist*, 2013.
- CARRIER. *Carrier Design Manual*. Décima Ed. Carrier Corporation, 1974.
- Center for Sustainable Building Research. “Window Materials & Assemblies: Emerging Technologies.” University of Minnesota (CSBR-UMN), 2007.
- Chèze, Benoît, Pascal Gastineauc, and Julien Chevallier. “Forecasting World and Regional Aviation Jet Fuel Demands to the Mid-term (2025).” *Energy Policy* 39, no. 9 (2011): 5147–5158.
- Commonwealth of Pennsylvania. «The Pennsylvania Green Buildings Operations and Maintenance Manual.» 2002.
- Conerly, Bill. “Oil Price Forecast: 2015-2016.” *Forbes* (Forbes), 2014.
- Coogan, Matthew A. *Transit Research Cooperative Program (TCRP) Report 62: Improving Public Transportation Access to Large Airports*. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2000.
- Cook, J., y otros. «Quantifying the Consensus on Anthropogenic Global Warming in the Scientific Literature.» *Environmental Research Letters* 8, n° 2 (2013).
- Coughlin, Jason. *Third-Party Financing and Power Purchase Agreements for Public Sector PV Projects*. U.S. Department of Energy Technical Assistance Project for State and Local Officials, 2009.
- Cros, Christophe, and Carsten Frings. “Alternative taxiing means – engines stopped.” *Alternative Taxiing Means – Engines Stopped (Airbus Workshop)*. 2008.
- D. S. Lee, David W. Faheyb, Piers M. Forsterc, Peter J. Newtond, Ron C.N. Wite, Ling L. Lima, Bethan Owena, Robert Sausenf. “Aviation and Global Climate Change in the 21st Century.” *Atmospheric Environment* 43 (2009): 3520-3537.
- D.S. Lee, G. Pitarib, V. Grewec, K. Gierensc, J.E. Pennerd, A. Petzoldc, M.J. Prathere, U. Schumannc, A. Baisf, T. Berntseng, D. Iachettib, L.L. Lima, R. Sausen. “Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Aviation.” *Atmospheric Environment* 44, no. 37 (2010): 678-734.
- DeVault, Travis L., et al. “Rethinking Airport Land-cover Paradigms: Agriculture, Grass, and Wildlife Hazards.” *Human - Wildlife Interactions* 7, no. 1 (2013): 10-15.
- DOE. *A Consumers Guide: Heat Your Water With the Sun: Solar Heating for Bussiness and Industry*. U.S. Department of Energy, 2003.

- . <http://www.afdc.energy.gov>. 2015. http://www.afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_benefits.html (accessed Septiembre 1, 2015).
- DOI. *Greening of the Interior*. Department of Interior, 2008.
- EIA-DOE. *Energy Efficiency: Definition*. 2003.
- Energy Experts. <http://energyexperts.org>. Edited by Washington State University Extension Energy Program. 2011. <http://energyexperts.org/energysolutionsdatabase/resourcedetail.aspx?id=2344> (accessed Septiembre 3, 2015).
- Energy Saving Trust. <http://www.energysavingtrust.org.uk>. 2014. <http://www.energysavingtrust.org.uk/domestic/wind-turbines> (accessed Septiembre 3, 2015).
- EnergyTrend. <http://pv.energytrend.com>. 2014. <http://pv.energytrend.com/pricequotes.html> (accessed 10 27, 2014).
- European Commission. <http://ec.europa.eu>. n.d. http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm.
- Evans, Tim Dwyer and Yan. "Gas-absorption Heat Pumps." *CIBSE*, 2010.
- FAEN. <http://www.faen.es/>. 2008. <http://www.faen.es/nueva/controler.php?id=81&idIdioma=ES>.
- Fox, David, and Chris Michael. "Glass Fundamentals as Applied to LED Technology." *Illuminating Engineering Society Aviation Lighting Committee Technical Conference*. Austin, Texas: Illuminating Engineering Society, 2003. 19-23.
- FPL. "Water-cooled Chillers." www.fpl.com. n.d. <https://www.fpl.com/business/pdf/water-cooled-chillers-primer.pdf>.
- Galludo, M.G., and R. Sanjurjo Navarro. *Sistemas energéticos en aeropuertos*. Fundación Aena, 2006.
- Geest, Peter J. van der. *Wind Turbines Near Airports: Problems and Solutions for wind Turbines Siting in the Vicinity of Airports*. NLR Air Transport Safety Institute, 2010.
- Graham, Anne. *Managing airports: An International Perspective*. 3. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.
- Grimms, N.R., and R.C. Rosaler. *Manual de Diseño de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado*. McGraw-Hill, 1996.
- Guillamón, M. G. Galludo y J.M. *Gestión Energética y Medioambiental en Instalaciones Aeroportuarias*. Fundación Aena, 2004.
- GWEC & Greenpeace. "Global Wind Energy Outlook." 2014.
- Hari, Thushara Kandaramath, Zahira Yaakob, and Narayanan N. Binitha. "Aviation Biofuel from Renewable Resources: Routes, Opportunities and Challenges." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (2015): 1234-1244.
- Humphreys, Ian, and Stephen Ison. "Changing Airport Employee Travel Behaviour: The Role of Airport Surface Access Strategies." *Transport Policy* 12, no. 1 (2005): 1-9.
- ICAO. *ICAO Annual Report 2013*. International Civil Aviation Organization, 2014.
- IDAE. "Ahorro y Recuperación de Energía en Instalaciones de Climatización." Madrid, 2012.
- IDAE. "Condiciones Climáticas Exteriores de Proyecto." 2010c.
- IDAE. "Condiciones de Aceptación de Procedimientos Alternativos a LIDER y CALENER. Anexos." Madrid, 2009c.
- IDAE. «Diseño de Sistemas de Bomba de Calor Geotérmica.» Madrid, 2010b.
- IDAE. "Energía de la Biomasa." 2007.
- IDAE. "Escala de Calificación Energética. Edificios Existentes." Madrid, 2011.
- IDAE. «Guía Técnica de Diseño de Centrales de Calor Eficientes.» Madrid, 2010a.
- IDAE. «Guía Técnica de Instalaciones de Biomasa Térmica en Edificios.» Madrid, 2009b.
- IDAE. «Guía Técnica de Instalaciones de Calefacción Individual.» Madrid, 2008.

- . <http://www.idae.es/>. 2008. <http://www.idae.es/index.php/idpag.847/re/menu.322/mod.pags/mem.detalle> (accessed Septiembre 1, 2015).
- IDAE. “Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red.” 2011.
- IDAE. “Prestaciones Medias Estacionales de Equipos y Sistemas de Producción de Frío y Calor en Edificios de Viviendas.” 2013.
- IDAE. “Prestaciones Medias Estacionales de las Bombas de Calor en Edificios.” Madrid, 2014.
- IDAE. “Torres de Refrigeración.” Madrid, 2007.
- INFRAS/IWW. “External Effects of Transport.” Paris, 1995.
- Interagency Working Group on Social Cost of Carbon. *Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis*. United States Government, 2015.
- IPCC. *Aviation and the Global Atmosphere*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1999.
- IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2014.
- Ison, S., G. Francis, I. Humphreys, and T. Rye. *Airport Car Parking Management: Issues and Policies*. Washington D.D.: Transportation Research Board, 2008.
- Jacobs Consultancy, Walker Parking Consultants, & Mannix Group and DMR Consulting. *Airport Cooperative Research Program (ACRP) Report : Guidebook for evaluating airport parking strategies and supporting*. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2010.
- Jardine, Christian N. *Calculating the Environmental Impacts of Aviation Emissions*. Oxford: Environmental Change Institute, 2005.
- Jha, A.R. *Wind Turbine Technology (PhD)*. CRC Press, 2010.
- Kazda, Antonin, and Robert E. Caves. *Airport Design and Operation*. 2. Bradford: Emerald, 2008.
- Koroneos, C., G. Xydis, and A. Polyzakis. “The Optimal Use of Renewable Energy Sources – The Case of the New International Makedonia Airport of Thessaloniki, Greece.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010): 1622-1628.
- Lako, Paul. *Combined Heat and Power*. International Energy Agency, IEA-ETSAP, 2010.
- Lau, Craig R., Joel T. Stromgen, y Daniel J. Green. *Airport Cooperative Research Program (ACRP) Synthesis 21: Airport Energy Efficiency and Cost Reduction*. Washington D.C: Transportation Research Board, 2010.
- Lenzen, M., and J. Munksgaar. *Energy and CO2 Life-cycle Analyses of Wind Turbines - Review and Applications*. Sydney, Australia: Elsevier, 2002.
- Liu, M., D. E. Claridge, y D. W. Turner. «Continuous Commissioning Guidebook,» Maximizing Building Energy Efficiency and Comfort.» 2002.
- López, Miguel Villarrubia, Luis Jutglar Banyeras, and Ángel Luis Miranda Barreras. *Manual de Calefacción*. 2012.
- Lynch, B., y M. O'Rourke. «ANSI/ASHRAE 55-2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.» Rocky Mountain ASHRAE Technical Conference, 2008, 2008.
- Macintosh, A., y L. Wallace. «International Aviation Emissions to 2025: Can Emissions Be Stabilised without Restricting Demand?» *Energy Policy* 37, nº 1 (2009): 264–273.
- Mandell, S. «Carbon Emission Values in Cost Benefit Analyses.» *Transport Policy* 18, nº 6 (Noviembre 2011): 888-892.
- Marsh, Lannie, Ryan Cole, Michelle Lanning, and Nicole Sellers. *Light Emitting Diodes: An Efficient Choice for Airport Lighting*. Kent, Ohio: Kent State University, 2008.
- Mazaheri, M., G.R. Johnson, and L. Morawska. “An Inventory of Particle and Gaseous Emissions from Large Aircraft Thrust Engine Operations at an Airport.” *Atmospheric Environment* 45 (2011): 3500-3507.

- Mehrpooya, Payam. *Improvement of Vertical-axis Wind Turbine Performance Via Turbine Coupling*. Illinois Institute of Technology, 2014.
- Milan, J. *Greening Airports: Advanced Technology and Operations (Green Energy and Technology)*. London: Springer, 2011.
- Miyoshi, Chikage, and Keith J. Mason. "The Damage Cost of Carbon Dioxide Emissions Produced by Passengers on Airport Surface Access: the Case of Manchester Airport." *Airport Journal Transportation Geography* 28, no. 1 (2013): 137-143.
- Morrow, Kevin, Dimitri Hochard, and James Francfort. *Cost Benefit Analysis Modeling Tool for Electric vs. ICE Airport Ground Support Equipment - Development and Results*. The Idaho National Laboratory is a U.S. Department of Energy National Laboratory, 2007.
- Mumma, S.A. "Designing Dedicated Outdoor Air Systems." *ASHRAE Journal*, May 2001: 29-31.
- NRCAN. *Description of Heating Project Load and Energy Calculation*. Natural Resources CANada, 2011.
- NREL. *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics*. National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- Nygren, Emma, Kjell Aleklett, and Mikael Höök. "Aviation Fuel and Future Oil Production Scenarios." *Energy Policy* 37 (2009): 4003-4010.
- Olesen, B.W. "Radiant Floor Cooling System." *ASHRAE J.* 50, no. 9 (2008): 16-22.
- OMS. *7 Millones de Muertes Cada Año Debidas a la Contaminación Atmosférica*. OMS Centro de Prensa, 2014.
- Orrell, A.C., and H.E. Rhoads-Weaver. "Distributed Wind Market Report 2013." DOE, 2014.
- PECI. *Building Commissioning: The Key to Quality Assurance*. U.S Department of Energy, 1998.
- PECI. "Fifteen O&M Best Practices for Energy Efficiency," O & M Best Practices Series." 1999c.
- PECI. "Operation and Maintenance Assessments." 1999b.
- PECI. «Putting the 'O' Back in O&M Best Practices in Preventive Operations, Tracking, and Scheduling.» 1999a.
- Pehrson, John. *Airport Cooperative Research Program (ACRP): Airport Ground Support Equipment (GSE): Emission Reduction Estrategies, Inventory and Tutorial*. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2012.
- Pels, Eric, Peter Nijkamp, and Piet Rietveld. "Access to and Competition Between Airports: A Case Study for the San Francisco Bay Area." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37, no. 1 (2003): 71-83.
- Perl, Anthony, Judith Paeterson, and Marc Pérez. "Pricing Aircraft Emissions at Lyon-Satolas Airport." *Transportation Resource Partners* 2, no. 2 (1997): 89-105.
- PNNL & PECI. *Advanced Energy Retrofit Guides: Retail Buildings*. U.S Department of Energy, 2011.
- Quiroga, Juan A. Domínguez. *Modelado y Caracterización de una Máquina de Absorción de Doble Efecto (Proyecto Fin de Carrera)*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2009.
- Radov, Daniel, Per Klevnäs, Adil Hanif, Mahmoud Abu-Ebid, Nick Barker, y Jeremy Stambaugh. «The UK Supply Curve for Renewable Heat.» NERA & AEA, 2009.
- Rainey, D. "Power Distribution for All-LED Circuit." *Airport Magazine*, 2007: 26-29.
- REE. *El Sistema Eléctrico Español 2013*. Red Eléctrica de España, 2014a.
- REE. *El Sistema Eléctrico Español 2014*. Red Eléctrica de España, 2015.
- . <http://www.ree.es>. 2014b. <http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/fotonoticias/2014/01/las-emisiones-de-co2-asociadas-la-generacion-electrica-en-el>.
- Reynolds-Feighana, Aisling J., and Kenneth J. Button. "An Assessment of the Capacity and Congestion Levels at European Airports." *Journal of Air Transport Management* 5, no. 3 (1999): 113-134.

- Ricard, Diane M. *Airport Cooperative Research Program (ACRP) Synthesis 36: Exploring Airport Employee Commute and Parking Strategies*. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2012.
- Riley, Evan, and Scott Olson. "A Study of the Hazardous Glare Potential to Aviators from Utility-Scale Flat-Plate Photovoltaic Systems." *ISRN Renewable Energy*, 2011.
- Rohles, F.H., S.A. Konz, and B.W. Jones. "Enhancing Thermal Comfort with Ceiling Fans." *Proceedings of the Human Factors Society 26th Annual Meeting*. 1982. 118-122.
- RTE. <http://www.rte-france.com>. 2014. <http://www.rte-france.com/fr/developpement-durable/eco2mix/donnees-nationales/emissions-de-co2-par-kwh-d-electricite-produite-en-france>.
- Sacramento Municipal Utility District. <http://smud.apogee.net/>. 2015. <http://smud.apogee.net/comsuite/content/ces/?id=1091>.
- Salgado, J.M, and F. Navarro. *Eficiencia Energética en los Edificios*. EDITOR ANTONIO MADRID VICENTE, 2011.
- Sardinero, Israel Blanco. *Instalación Solar Fotovoltaica Conectada a Red sobre la Azotea de una Nave Industrial*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos II de Madrid, n.d.
- Seidenman, P., and D. Spanovich. "Green Airports." *Airport Magazine*, Enero-Febrero 2008.
- Sikorski, Evgenia. "Air-Conditioning of Parked Aircraft by Ground-Based Equipment." *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Purdue University, 2010.
- SOLAIR. www.solair-project.eu. 2009. <http://www.solair-project.eu/143.0.html>.
- Stettler, M.E.J., S. Eastham, and S.R.H. Barrett. "Air Quality and Public Health Impacts of UK Airports. Part I: Emissions." *Atmospheric Environment*, 2011: 5415-5424.
- Sullivan, G. P., R. A. Pugh, P. Melendez, y W.D. Hunt. *Operations & Maintenance, Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency*. U.S. Department of Energy, 2010.
- Sullivan, G. P., R. Pugh, y W. D. Hunt. «Metering Best Practices. A Guide to Achieving Utility Resource Efficiency.» 2007.
- Sunderland, Faye. *Electric Car Repair Bill 35% Less than Combustion Car*. TheGreenCarWebsite, 2012.
- TechnoSun. "Lista de precios P.V.P Energía Solar Fotovoltaica." 2015.
- Thompson, Terry, Bruno Miller, Charles Murphy, Stephen Augustine, Tyler White, and Sofia Souihi. "Environmental Impacts of Continuous-descent Operations in Paris and New York Regions." *Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*. 2013.
- Tol, R.S.J. «The Social Cost of Carbon: Trends, Outliers and Catastrophes.» *Economics - The Open-Access, Open-Assessment E-Journal 2*, 2008: 1-24.
- Trigo, G.L., and V. R. Ángulo. "Guía de la Energía Térmica." Madrid, 2013.
- Tucker, S., and A. Smith. *Local Airports for Local People? A Review of the UK Policy to Encourage Sustainable Growth of Regional Airports*. Association for European Transport, 2007.
- Turner, W. D., M. Verdict, B. Yazdani, H. Huff, y K. Clingenpeel. *ACRP Research Results Digest No. 2: Model for Improving Energy Use in U.S. Airport Facilities*. Washington D.C.: Transportation Research Board of the National Academies, 2007.
- U.S. Fed News Service. *Prescott Airport Gets New Taxiway Light*. U.S. Fed News Service, 2006.
- UNFCCC. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Naciones Unidas, 1992.
- VALNU. "Reforma de la Instalación de Climatización del Edificio 6C de la Universidad Politécnica de Valencia." 2014.
- West, Brian H., Alberto J. Lopez, Timothy J. Theiss, Ronald L. Graves, John M. Storey, and Samuel A. Lewis. *Ahorro de combustible y Emisiones del Saab 9-5 Bipower Optimizado de Etanol*. SAE Soporte Técnico, 2007.
- Wilson, Lindsay. *Shades Of Green: Electric Cars' Carbon Emissions Around the Globe*. Shrink That Footprint, 2013.

Wybo, Jean-Luc. "Large-scale Photovoltaic Systems in Airports Areas: Safety Concerns." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21 (2013): 402-410.

12.1 Anexo 1.- Tabla 27

- Los valores de vida útil se corresponden con valores típicos para cada una de las tecnologías, en particular, los valores usados se han tomado de las siguientes fuentes:
 - Enfriadora refrigerada por agua: ASHRAE Equipment Life Expectancy - Centrifugal Packaged Chiller.
 - Instalación geotérmica: http://www.energyagency.org.uk/en/ground-source-heat-pump_46650/ - Obtenido de ponderar la vida útil de la bomba de calor (20 años) y del sistema de captación (50 años) por el precio de estos componentes (50% del total para ambos) según <http://www.geothermalgenius.org/thinking-of-buying/average-cost-of-geothermal-heat-pump-installation.html>.
 - Caldera de condensación de gas natural: ASHRAE Equipment Life Expectancy – Steel Water-tube Boiler.
 - Caldera de biomasa: – (IDAE 2007). Caldera de biomasa comercial para calefacción centralizada
- Las eficiencias nominales han sido tomados de equipos reales:
 - Enfriadora refrigerada por agua: CARRIER 19XR / XRV.
 - Instalación geotérmica: DIMPLEX SI 130 TUR+ (equipos en cascada).
- Las eficiencias estacionales se han obtenido de la siguiente forma en cada uno de los casos:
 - Enfriadora.- Se ha estimado con el programa CE3-X-GT a partir de los valores nominales, para el clima existente en la ciudad de Sevilla, gran terciario de intensidad alta – 24 h. (según lo establecido en (IDAE 2009c)), y antigüedad de los equipos menor a 5 años.
 - Geotermia.- El rendimiento estacional de la bomba de calor geotérmica, sin embargo, ha sido calculado usando el método proporcionado por IDAE en (IDAE 2013) y (IDAE 2014) para el que se ha empleado una Tª de distribución de refrigeración de 7°C, y una temperatura de condensación (o de distribución) en calor de 45°C, para una Tª del test del COP = 35°C (tal como aparece en la hoja de especificaciones técnicas de la bomba de calor geotérmica considerada) y sistema de captación vertical. Para refrigeración se ha utilizado el factor de ponderación correspondiente a bloques de viviendas con captadores verticales. Debido a la incertidumbre que suponen las previsibles pérdidas energéticas ocasionadas en las conducciones de los posibles emplazamientos de captadores hasta la Central Energética, así como al desconocimiento de la conductividad de estos terrenos, se aplicará un factor de seguridad del 0,8 para la eficiencia de refrigeración y un 0,85 para calefacción (cuyo valor estacional ha sido calculado de un modo más exacto).

Los valores de rendimiento estacional de las calderas son los correspondientes a equipos reales, en particular:

 - Caldera de condensación de gas natural: LeaverBrooks ClearFire®-LC.
 - Caldera de biomasa: Byworth Biomass Boilers (valor para la gama de productos).
- La inversión inicial ha sido obtenida de (Radov, y otros 2009), excepto en el caso de enfriadora, la cual ha sido obtenida de la estimación proporcionada en (FPL s.f.) considerando para \$1 = 0,89 € y 1 ton = 3,517kW.
 - Enfriadora.- El coste total de una planta enfriadora se estima entre unos 1.500-1.800 \$/ton. El valor final se calculado escogiendo el valor central (1.650 \$/ton).
 - Caldera de gas natural.- El coste es el correspondiente a una instalación de gas natural de potencia comprendida entre los 350 kW y los 3.600 kW.

- Geotermia.- El coste es el correspondiente a la instalación para un gran edificio terciario con sistema de captación vertical (a priori el más viable para nuestro caso particular). Ya que los costes dados se refieren a calefacción, para obtener los costes iniciales en refrigeración se ha multiplicado el correspondiente a calefacción por la razón de rendimientos nominales $\eta_{\text{calefacción}}/\eta_{\text{refrigeración}}$. Debido a la incertidumbre existente por las características del emplazamiento de captadores, así como por la lejanía de las opciones encontradas respecto a la Central Energética, se ha considerado oportuno multiplicar este coste por un factor de seguridad tanto para calefacción como para refrigeración de un 1,2.
- Caldera de biomasa.- Los costes corresponden a la instalación completa para un gran edificio terciario (public large) de potencia comprendida entre 350 y 1.600 kW

Nota: Los precios de la caldera de gas natural, geotermia y caldera de biomasa, están dados en libras esterlinas y corresponden al año 2009. Por ello, estos valores han sido transformados a euros con la correspondencia 1 £ = 1,38 € y han sido multiplicados por el RPI (Retail Price Index) británico entre los años 2009 y 2014. En caso de ofrecerse un rango de valores se ha tomado siempre el valor intermedio.

- El porcentaje subvencionable se corresponde con los valores máximos según los criterios del programa Andalucía+, siguiendo el método reducido según las bases establecidas en la Orden del 4 de Febrero de 2009.
- El precio de los combustibles ha sido obtenido como:

$$c_t = \frac{c_0}{\eta_e}$$

Donde η_e es el rendimiento estacional del sistema y c_0 es el coste por unidad de energía térmica contenida en el mismo, este último valor ha sido obtenido de:

- Electricidad.- Obtenido a partir del coste eléctrico unitario para el Aeropuerto de Sevilla (Tarifa 6.1 Iberdrola) proporcionado por el propio Aeropuerto para el año 2010. Este valor ha sido estimado para el año 2014 aplicando el incremento del coste de la tarifa eléctrica entre estos años obtenido de EUROSTAT. – 0,086 €/kWh_e. No incluye el IVA.
- Gas natural.- Gas natural Fenosa Tarifa 3.4 (Junio 2015). – 0,0411 €/kWh. Sin IVA.
- Pélets.- Pélets a granel AVEBIOM.- Media 2014 (Índice de precios del pellet doméstico en España 2014). Se ha descontado el 21% de IVA.- 0,0413 €/kWh.
- Los costes de mantenimiento han sido tomados de (Radov, y otros 2009). En caso de ofrecer un rango de valores se ha tomado el valor intermedio. Para obtener los costes de mantenimiento en refrigeración, en el caso de la geotermia, se ha multiplicado por la razón de rendimientos nominales: $\eta_{\text{calefacción}}/\eta_{\text{refrigeración}}$. En el caso de las enfriadoras se ha tomado el valor obtenido de (Sacramento Municipal Utility District 2015) para enfriadoras condensadas por agua centrífugas de 1.000 tons (1ton =3,517kW). Los dólares de 1995 han sido trasladados al valor de 2014 multiplicando por el CPI (Consumer Price Index) entre los años 2009 y 2014
- El incremento interanual de los precios ha sido obtenido:
 - Electricidad y Gas natural: Media para los años 2003-2014 (EUROSTAT). Estos valores se han corregido con la variación del IPC para la misma serie histórica.
 - Pellet: Media para los años 2012-2014 (AVEBIOM).
- Las emisiones por unidad energética producida (e_t) han sido obtenidas mediante:

$$e_t = \frac{e_0}{\eta_e}$$

Donde e_0 son las emisiones por unidad energética contenida. Estos valores han sido obtenidos de (IDAE 2011):

	Electricidad	Gas natural	Biomasa
c_0 (gCO₂/kWh)	649	204	Neutro

Tabla 60.- Factores de emisiones de CO₂.

12.2 Anexo 2.- Curvas monótonas de carga

Las curvas monótonas de carga relacionan cada valor de la fracción de carga térmica máxima con el número de horas anuales en las que la carga térmica es mayor o igual a esta fracción. Estas curvas han sido elaboradas conforme al método indicado en (NRCAN 2011) tanto para calefacción como para refrigeración. En ambos casos el método seguido es el mismo.

Este proceso depende solo de factores climáticos, como son los grados-día, y la temperatura de diseño:

- Grados-día.- Son un indicador de la temperatura mensual en un lugar determinado. Se definen como:

$$GD_{j,refrigeración} = \sum_{i=1}^{N_j} \max(T_{m,i} - T_b, 0)$$

$$GD_{j,calefacción} = \sum_{i=1}^{N_j} \max(T_b - T_{m,i}, 0)$$

Donde GD_j son los grados-día del mes j .

N_j es el número de días del mes j .

$T_{m,i}$ es la temperatura media del día i .

T_b es la temperatura base, en nuestro caso 18°C.

Para el Aeropuerto de Sevilla son:

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Noviembre	Diciembre
Calor	268	203	136	56	22	4	0	0	0	17	89	251
Frío	0	1	18	66	144	181	232	262	157	112	13	2

Tabla 61.- Grados-día para el Aeropuerto de Sevilla¹⁰³.

En primer lugar, para corregir el hecho de que cada mes tenga un número distinto de días, se calculan los grados-día por día (gd):

$$gd_j = \frac{GD_j}{N_j}$$

A continuación, los 12 valores de gd_j se ordenan de mayor a menor, siendo gd'_j los grados-día por día y N'_j los días de cada mes para $j = 1, \dots, 12$, ordenados según este criterio.

A continuación se generan 14 valores temporales (eje x de la curva).

$$C_0 = 8760$$

$$C_i = C_{i-1} - (N'_{i-1} + N'_i) \times 12 \quad (i = 1, \dots, 12)$$

$$C_{13} = 0$$

Donde los valores C_i ($i = 1, \dots, 12$) se corresponden con los valores centrales para cada mes.

La fracción de potencia (D) correspondiente a cada uno de estos valores es:

$$D_0 = D_1$$

$$D_i = \frac{gd'_i}{\Delta T} F_i$$

¹⁰³ Para una temperatura base de 18°C. Fuente: www.wunderground.com

$$D_{13} = 1$$

Donde $\Delta T = |T_{dis} - T_b|$, y T_{dis} es la temperatura de diseño para el Aeropuerto de Sevilla:

T^a de diseño calefacción (T_{dis, cal})	4,5°C
T^a de diseño refrigeración (T_{dis, ref})	37,6°C

Tabla 62.- Temperatura de diseño para el Aeropuerto de Sevilla.

F_i es igual a 1 para refrigeración, y para calefacción se utilizan los siguientes valores empíricos que representan la influencia de la ganancia solar, los vientos y la ocupación:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F_i	1	0,59	0,59	0,68	0,75	0,64	0,66	0,66	0,67	0,76	0,78	0,9

Tabla 63.- Valores de los coeficientes F_i para calefacción.

La curva monótona de carga se podrá obtener ya a partir de los 14 puntos (C_0, D_0), (C_i, D_i) y (C_{13}, D_{13}).