

0. PRESENTACIÓN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. ANTECEDENTES	4
1.2. MOTIVACIÓN	5
1.3. SITUACIÓN DE ESPAÑA	13
1.4. DISEÑO BIOCLIMÁTICO	17
1.5. REFRIGERACIÓN NATURAL	20
1.6. TÉCNICAS CONVENCIONALES Y SUMIDEROS AMBIENTALES	22
1.7. ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO	27
1.7.1. Medio Frío	27
1.6.2. Introducción a los sistemas y su funcionamiento	28
1.7.2. Nociones de diseño y tamaño	31
1.8. CLIMA. APLICABILIDAD.	34
2. GOTA AISLADA	36
2.1. DESCRIPCIÓN	36
2.2. FENÓMENO FÍSICO	38
2.3. MODELIZACIÓN	39
2.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	55
2.5. CONCLUSIONES	62
3. SPRAY	63
3.1. PRESENTACIÓN	63
3.2. TECNOLOGÍA ASOCIADA	63
3.3. DEFINICIÓN DEL ESTUDIO	65
3.4. MODELO CFD	67
3.4.1. DEFINICIÓN	67
3.4.2. MODELIZACIÓN	69
3.5. MICRONIZADORES	72
3.5.1. INTRODUCCIÓN	72
3.5.2. ESTUDIO	73
3.5.3. REGISTRO DE RESULTADOS	81
3.5.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	84
3.5.5. CONCLUSIONES	90

3.6. WATER SPRINKLER	92
3.6.1. INTRODUCCIÓN	92
3.6.2. ESTUDIO	92
3.6.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	96
3.6.4. CONCLUSIONES	100
3.7. CONCLUSIONES	101
4. CAPTADORES DE VIENTO – WINDCATCHER-	102
4.1. DESCRIPCIÓN	102
4.2. ESTUDIO	104
4.2.1. DEFINICIÓN	104
4.2.2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	104
4.2.3. ANÁLISIS DE GEOMETRÍAS CONVENCIONALES	105
4.2.4. SIMULACIÓN DE MODELOS CONVENCIONALES	106
4.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	109
5. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PHDC	113
5.1. PRESENTACIÓN	113
5.2. INTRODUCCIÓN	114
5.3. FUNDAMENTOS DE LA HERRAMIENTA AIRFLOW	115
5.3.1. Método del bucle de presiones multizona.	115
5.4. HIPÓTESIS, FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y CARACTERIZACIÓN	119
5.4.1. Propiedades	119
5.4.1.1. Datos climáticos	119
5.4.1.2. Altura sobre el nivel del mar	119
5.4.1.3. Efecto del viento	121
5.4.2. Torre de salida	124
5.4.2.1. Contribución mecánica a la extracción	125
5.4.2.2. Wind-Turbine	126
5.4.3. Torre de entrada	127
5.4.3.1. Micronizadores	128
5.4.3.2. Water sprinkler	130
5.4.3.3. Wetpad	131
5.4.4. Rejillas	137
5.5. MANUAL DEL USUARIO	138
5.6. EJEMPLO: PREDISEÑO USANDO PHDC	146
6. BIBLIOGRAFIA	160
7. ANEXOS	162
7.1. CASOS DE MICRONIZACIÓN	162
7.2. CASOS DE PULVERIZACIÓN	162

7.3. RESUMEN DE RESULTADOS DE MICRONIZACIÓN	162
7.4. RESUMEN DE RESULTADOS DE PULVERIZACIÓN	162
8. AGRADECIMIENTOS	163

0. PRESENTACIÓN

Este proyecto Fin de Carrera ha sido realizado bajo la dirección de D. Servando Álvarez y D. José Manuel Salmerón Lissen del Grupo de Termotecnia del Departamento de Ingeniería Energética de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Con su ayuda y del resto de integrantes del Grupo de Termotecnia se ha hecho posible.

El proyecto ha sido elaborado entre los meses de Julio del 2007 y Febrero del 2009. El objetivo principal de este proyecto es la creación de un programa de prediseño de sistemas de ventilación (pasivos e híbridos); y refrigeración (enfriamiento evaporativo), eficientes y sostenibles, fundamentados en energías renovables.

AirFlow será el nombre de este programa que formará parte de las herramientas informáticas de PHDC, proyecto europeo que tiene como objetivos el diseño y la promoción de edificios pasivos. Las herramientas informáticas de “Passive Hybrid Downdraught Cooling”(PHDC), son dos: AirFlow (motivo de este proyecto) y “Energy & Comfort”, ambos desarrollados por el Grupo de Termotecnia.

Así bajo este enorme eslogan, se resume en esta memoria el trabajo realizado durante estos dos años pasados, en la que se destacan los puntos más importantes.

Cada bloque está autocontenido, con una estructura parecida: se describe el motivo del estudio, sus principales necesidades, modo de obtención de resultados, y, análisis y conclusiones de lo mismos.

Así, en el **capítulo uno, Introducción**, se establece la motivación y necesidad de los sistemas tratados en este proyecto final de carrera, los fundamentos principales de lo mismos y una síntesis de los conceptos necesarios para el entendimiento completo de este proyecto.

En el **capítulo dos, Gota Aislada**, se caracteriza por completo esta mínima unidad que compone los sistemas de enfriamiento evaporativos, a fin de crear la base y los límites de los Spray, capítulo tres, mediante el uso de programación Matlab y CFD Fluent.

En el **capítulo tres, Spray**, se crean los modelos simplificados para ser integrados en otro Software. Se analizan y definen por completo conjuntos de gotas, en un rango amplio de condiciones tanto ambientales como tecnológicas.

El **capítulo cuatro, Wind-Catcher, Captadores de Viento**, define un estudio completo de sistemas de captación de viento, desde análisis de geometrías convencionales hasta recomendaciones de diseño. Surge este capítulo para definir por completo un sistema de impulsión de aire fundamentando en el uso de energías renovables

En el **capítulo cinco, Herramientas informáticas de PHDC**, Passive and Hybrid Downdraft Cooling (Sistemas de enfriamientos pasivos e híbridos para la edificación), que da nombre al proyecto, se define el software AirFlow que permite el prediseño de sistemas de ventilación y climatización integrando estos sistemas mencionados.

A modo de cierre, se presentan **capítulo sexto**, unas conclusiones generales, a modo de balance. Como complemento a la información aportada por la memoria, se acompaña la **bibliografía** más relevante usada en el proyecto, y una serie de **anexos** necesarios para la comprensión total del mismo. Además el CD que acompaña a la memoria, contiene hojas de cálculo con la información obtenida tanto de Matlab como de Fluent, y resúmenes de la misma en forma de gráficas.

1. INTRODUCCIÓN

“El uso racional de la energía en los edificios, no puede concebirse en la actualidad sin la búsqueda de soluciones térmicas aceptables, tanto a nivel epidermis edificatoria, como de la selección de los equipos y sistemas de acondicionamiento. La identificación y el análisis de estas soluciones descansa conceptualmente en la aplicación de la transferencia de calor al sistema térmico constituido por el edificio.”
[D. Servando Álvarez Domínguez. Tesis Doctoral: “Análisis Dinámico del Comportamiento Térmico de Edificios”]

Es esta afirmación la que motiva más aún este proyecto, en el que se va a aventurar el uso de PHDC para mejorar e innovar las instalaciones de climatización y ventilación convencionales, bajo la gran afirmación de que la mejor energía renovable es el propio ahorro, en un sector como es la edificación, en el que el consumo de energía es tan elevado.

1.1. ANTECEDENTES

Los métodos pasivos de enfriamiento y el uso de técnicas naturales para refrigeración ofrecen una solución potencial al elevado consumo de energía por parte de las instalaciones de climatización, aunque la idea básica no es nueva. Existen, por ejemplo, precedentes de captación de aire frío en torres en Oriente Medio, descritas por Bahadori, quién además desarrolla conceptos de la arquitectura Oriental que han sido objeto de gran interés en todo el mundo desde los años setenta con la aparición de diversas crisis energéticas.

En los últimos años, se ha demostrado que se pueden aumentar los caudales y reducir la temperatura de los mismos si se obliga a la evaporación de agua en el interior de la corriente de aire. Este proyecto desarrollará tanto este tema como el marco que le rodea, tomando como partida lo descrito por Cunningham & Thompson [1] en “Passive Downdraught Evaporative Cooling, PDEC tower” – torre de enfriamiento pasivo evaporativo de tiro invertido- Con enfriamientos directos a través de sistemas PDEC la temperatura del aire se puede reducir en un 70-80% - supuesto el sistema en climas secos y calurosos-.

Al final del proyecto, hablaremos de las aplicaciones que hasta la fecha han tenido estas técnicas y líneas de futuro.

El principal antecedente, para este proyecto, es la “Avenida de Europa” en la Exposición Universal de Sevilla (EXPO’92) [2], ya que es un trabajo del Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros d Sevilla, entre otros. Por lo que esa experiencia, ofrecida de una forma excelente, juega un papel fundamental en el desarrollo de este proyecto.

Se deben resaltar también otros experimentos realizados por Givoni , Brian Ford y Pearlmutter y Al , que intentan extender su eficacia bajo techo y no sólo al aire libre; tanto para usos domésticos u oficinas.

1.2. MOTIVACIÓN

El interés por el desarrollo de sistemas pasivos de energía surge como respuesta a la necesidad de controlar termicamente el espacio interior de los edificios, y especialmente, por el deseo de lograr este objetivo mediante el uso adecuado de los procesos de transferencia de la energía, que se producen en forma natural y son parte esencial del equilibrio térmico de todo el planeta.

El aprovechamiento de estos sistemas de energía constituye una alternativa deseable y necesaria, además de congruente con la conciencia ambiental que se ha venido formando en la sociedad a partir de mediados de este siglo. Este redireccionamiento pugna por el restablecimiento del equilibrio de los ecosistemas, negativamente impactados como consecuencia de los efectos provocados por los modelos de desarrollo industrial dominantes en el mundo en los últimos 200 años. El principal argumento, bien conocido, es que están basados en procesos de transformación de la energía procedente de combustibles fósiles y más recientemente, de fisión del átomo.

El desarrollo industrial ha producido una gran cantidad de aplicaciones tecnológicas que se hacen presentes en todos los ámbitos del quehacer humano, sobre todo durante las primeras décadas del pasado siglo. En el caso de la Arquitectura, particularmente en el aspecto del control térmico, el avance tecnológico se manifiesta por medio de la tecnología del acondicionamiento mecánico del aire, dando lugar al control térmico artificial del espacio. Este hecho propicia un distanciamiento entre los diseñadores y los factores climáticos, que evidentemente deben de considerarse en toda pretensión de control térmico natural de la edificación, y puesto que han sido abandonados, aparece una gran tarea en la que el Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros es promotor y de enorme importancia en todo el mundo.

La dependencia de la tecnología para el acondicionamiento del aire se difundió rápidamente en los diseñadores; y junto con la arquitectura del estilo moderno se convirtieron en el movimiento arquitectónico más influyente de gran parte del siglo XX.

Pero este movimiento se alejaba del desarrollo sostenible, como afirma Philip Steadman: “La forma de diseño de acuerdo al movimiento moderno, nunca tuvo en consideración la posibilidad de conjugar el edificio con su entorno y clima “.

Ahora bien, no se duda del valor de la contribución de la arquitectura de estilo moderno, ya que en su momento la tecnología respondió a la necesidad que planteaba el control térmico del espacio, pero es momento de cambiar, de innovar y de crecer, para poder sostener el crecimiento acelerado de la sociedad.

Otra idea falsa, es que la abundancia de energía barata, sobre la que se constituyó la base de sustento del acondicionamiento artificial del espacio habitable, es inagotable o de una durabilidad muy elevada.

No obstante, la tecnología del acondicionamiento mecánico representa un logro muy importante en el desarrollo de la arquitectura; algo similar a la bombilla inventada por Thomas Edison que por causas similares a las enunciadas queda sustituida por bombillas de bajo consumo.

El problema radica en el hecho de que se ha abusado de ésta tecnología al imponerle totalmente la tarea del control térmico del espacio, cuando su función debe consistir en complementar a los sistemas pasivos para lograr un efectivo control térmico de los espacios habitables. El control térmico natural de los espacios habitables ha sido una práctica tradicional en todas las culturas humanas. Los testimonios arquitectónicos de las culturas que se desarrollaron en diferentes regiones climáticas dan muestras de las posibilidades del control térmico mediante el uso adecuado de los materiales y la disposición acertada de los espacios y las formas. Así como el empleo de sistemas pasivos de energía, aún en situaciones climáticas extremas; por ejemplo un igloo esquimal es una solución bien conocida al problema del frío extremo, su forma

semi-esférica desvía los vientos y aprovecha la capacidad aislante de la nieve que lo rodea. La cubierta de hielo que se forma en su interior es un efectivo sello que evita las filtraciones de aire. La retención de calor en este tipo de estructuras permite mantener una temperatura interior de 16°C mientras que en el exterior es de -45°C.

En condiciones de calor extremo la arquitectura de los trogloditas en Túnez constituye una solución acertada, así como las torres de viento en Irán que enfrían y humidifican el aire que es conducido al espacio interior de las edificaciones.

Ahora bien, la necesidad de calentar o enfriar los espacios donde ha vivido el hombre ha sido resuelta de diferentes formas, en diferentes épocas y de acuerdo a las características climáticas de las regiones donde se han desarrollado los grupos humanos y sobre todo en relación a los recursos disponibles. Esta solución no siempre ha sido la más acertada incluso en culturas bien desarrolladas, como lo demuestra la situación a la que enfrentaron las ciudades griegas, que ante la necesidad de calentar sus hogares, destruyeron las hectáreas boscosas que les rodeaban. Eso produjo que ya en el siglo quinto A.c. gran parte de los bosques había desaparecido. La gravedad de la situación de los bosques queda de manifiesto en la comparación que Platón hizo de las colmas y montañas de Ática con los huesos de un cuerpo despojado: “todas las partes mas ricas y blandas han desaparecido, y cuanto permanece es el mero esqueleto de la tierra “.

Como respuesta al problema del acondicionamiento de sus viviendas, y ante la escasez de la madera, los griegos aprendieron a diseñar sus casas de modo que se beneficiaran de las condiciones climáticas y geográficas de su entorno. Habitantes de un clima soleado durante casi todo el año, los griegos desarrollaron una arquitectura encaminada hacia el aprovechamiento de los rayos solares.

Esta arquitectura solar se basaba en la posición cambiante del sol durante las diferentes estaciones. El reloj de sol familiarizó profundamente a los griegos con las variaciones diarias y estacionales del curso solar, sabían que el sol describe en invierno un arco bajo, mientras que en verano pasa bien alto sobre las cabezas; lo cuál les llevo a construir sus casas de manera que la luz solar del invierno pudiera penetrar fácilmente a través de un pórtico cara al sur similar a un porche cubierto.

Sócrates explicaba el sistema en estos términos: “En las casas orientadas al sur, el sol penetra por el pórtico en invierno, mientras que en verano el arco solar descrito se eleva sobre nuestras cabezas y por encima del tejado, de manera que hay sombra “.

Estos simples principios de diseño sirvieron de base a la arquitectura solar de la antigua Grecia, revelándose como una de las tecnologías solares más simples y cuya eficacia ha resultado suficiente durante mucho tiempo.

El problema de la escasez de combustible también se presentó en la antigua Roma. El alto costo de la madera que utilizaban para calentar sus viviendas condujo a los romanos a adoptar las técnicas griegas de arquitectura solar. Añadiendo el hecho de que el imperio romano comprendía una extensión considerable de territorio, por lo que su arquitectura hubo de adaptarse a diferentes ambientes.

Marco Lucio Vitruvio, el eminente arquitecto romano del siglo primero A.c., escribió: “Los edificios particulares estarán bien dispuestos si, desde el principio, se ha tenido en cuenta la orientación y el clima en el que se van a construir, porque esta fuera de duda que habrán de ser diferentes las edificaciones que se hagan en Egipto de las que se efectúen en España; distintas las que se hagan en el Ponto de las que se efectúen en Roma. Ya que estas diferencias dependen siempre de los factores que caractericen a los países, puesto que una parte de la tierra está bajo la influencia inmediata de su proximidad del sol, otra por su distancia de él, y otra por su posición intermedia entre ambas lo que la convierte en templada. Por tanto, puesto que la posición del cielo con respecto a la tierra, la inclinación del Zodiaco y el curso del sol, esta naturalmente dotada de diversas cualidades, conviene atender en la construcción de los edificios a las diversidades de países y a la diferencia de climas “.

Roma supo de las técnicas constructivas solares por los escritos de Vitruvio y, también, a través del contacto directo de los romanos con las colonias griegas establecidas por toda la Italia meridional. Los griegos y romanos, con su escasez maderera, adquirieron conciencia de los límites de sus recursos energéticos y se dieron a la tarea de buscar alternativas de solución.

Estas culturas amenazadas redescubrieron entonces gran parte del anterior conocimiento sobre la energía solar. No obstante, la firme evolución de la Arquitectura, de los sistemas naturales de control técnico y de la tecnología solar se han visto periódicamente interrumpidas por el descubrimiento de combustibles aparentemente baratos y abundantes tales como carbón, petróleo, gas natural y uranio.

El empleo de estos combustibles en los procesos de transformación de energía nos tiene al borde de una crisis que amenaza con desintegrar nuestras sociedades. Así pues, resulta de vital importancia el empleo adecuado de la energía y todavía más el estudio y aplicación de alternativas de transformación energética.

El gasto energético, tan elevado, de climatización conduce actualmente, al desarrollo de sistemas pasivos en cada país en relación con su potencial de desarrollo industrial o su capacidad de transformación energética.

En los países desarrollados un porcentaje de la energía producida es destinada a cubrirla demanda de climatización, de aquí que el desarrollo de los sistemas pasivos sea motivado por el deseo de ahorrar energía disminuyendo la demanda pico de electricidad y establecer una alternativa al uso de energía eléctrica producida por medio de combustibles fósiles.

En países con potencial de desarrollo industrial, donde la tecnología del aire acondicionado no se emplea actualmente a gran escala, el interés en el desarrollo de los sistemas pasivos de control térmico de la edificación está motivado, o debería estarlo, por dos factores principalmente. El primero de ellos corresponde al deseo de reducir el estrés térmico que se experimenta en las edificaciones, ya que éste produce efectos nocivos sobre la salud y la productividad de las personas. El segundo factor, y seguramente el que impulsará en mayor medida el desarrollo, no sólo de los sistemas pasivos, sino todas aquellas alternativas de transformación energética, lo constituye el hecho de que los países en desarrollo no cuentan con los recursos ni la infraestructura para cubrir la creciente demanda de energía.

En el caso de nuestro país, el estudio de sistemas pasivos es muy limitado aún. Aunque representa una opción de ahorro de energía considerable, sobre todo en el sector

terciario, al que se le une la creciente demanda de energía del sector residencial en lo que corresponde a climatización.

La dependencia a los aparatos de climatización puede resultar desastrosa a muy corto plazo: tiene un alto costo de instalación, mantenimiento y de operación que puede repercutir gravemente en la economía familiar, ya que la tendencia actual es la subida gradual del precio de la energía eléctrica. Pero mientras esto sucede, la demanda de los aparatos de aire acondicionado ha experimentado y experimentará un rápido crecimiento.

El alto costo que tendrá a corto plazo este acondicionamiento del aire evidencia claramente, que la utilización de esta tecnología, en la gran mayoría de los casos, no representa actualmente la solución al problema del control térmico de la edificación.

Ante esta disyuntiva los sistemas pasivos se presentan como una alternativa adecuada para lograr un control térmico del espacio habitable; de ahí la importancia de su estudio y aplicación. En este sentido los arquitectos e ingenieros tienen una amplia participación y responsabilidad en el adecuado manejo de estos sistemas, que incluso promueven un desarrollo sostenible, en respeto y armonía con el medio ambiente.

Ahora bien, los sistemas pasivos se emplean tanto para el enfriamiento como

Para el calentamiento. Estos últimos han tenido un desarrollo considerable sobre todo en los países desarrollados en los que las necesidades de calentamiento son amplias ya que el clima característico de estos países es templado; de ahí que el calentamiento pasivo actualmente es bien conocido y dominado aunque su aplicación no ha sido a gran escala todavía, por lo cuál es una tecnología con un fundamento muy conocido pero con una integración y realización muy escasa, lo cuál la convierte en otro campo de estudio e innovación.

En cambio, los sistemas pasivos de enfriamiento han sido objeto de estudio e investigación hasta hace, relativamente, poco tiempo. No obstante, el enfriamiento pasivo constituye una práctica muy antigua que formó parte fundamental de muchas culturas. Esto le ha permitido su continua aplicación prometiendo ser un recurso

importante en el acondicionamiento de los edificios, sobre todo en regiones de clima cálido situadas en la franja intertropical principalmente. Los sistemas pasivos de enfriamiento son sistemas que no necesitan de la participación de energía eléctrica o la de combustibles fósiles para trasladar el calor de un edificio o de una persona a un depósito o absorbedor ambiental. Esta afirmación forma parte de los sistemas de enfriamiento tradicionales que constituían una parte fundamental del diseño arquitectónico en climas cálidos hasta antes de la aparición de la energía eléctrica barata. Recientemente a estos sistemas se les denomina “Sistemas de enfriamiento pasivo e híbrido” en los que se acepta la participación mecánica siempre que contribuyan al mejor funcionamiento de los sistemas.

Al principio de este apartado se ha mencionado el hecho de que uno de los errores de los diseñadores es el acondicionar aplicando en su totalidad sistemas mecánicos, cuando lo ideal sería que funcionaran como complemento a los sistemas pasivos o, mejor dicho, a la concepción bioclimática de la Arquitectura.

La necesidad de climatizar se presenta en el momento en que las condiciones del ambiente en el interior del edificio no son convenientes para el bienestar del hombre, lo que conduce a la definición de un rango de valores de confort, una franja en la que el edificio cree un bienestar a sus ocupantes. Así se diseñan los controles que permiten crear las condiciones climáticas interiores favorables, y demuestra la importancia de un diseño apropiado en el que se priorice la conciencia ecológica de aumentar esa franja de confort, puesto que cuánto mayor sea, menor será el funcionamiento de las máquinas.

De este modo se establece una tarea de control que se define como la diferencia entre las condiciones ambientales dadas y las condiciones requeridas. El diseñador dispone de dos alternativas para cumplir con esta tarea de control

1. Controles pasivos
2. Controles activos

La meta de los Sistemas Pasivos de enfriamiento es la de realizar esta tarea de control, hasta donde sea posible, cubriendo una demanda base por ejemplo, permitiendo la gestionabilidad de estos recursos no controlables (sol, viento...) y abogando porque los sistemas mecánicos satisfagan el restante de la demanda (en el caso óptimo, nulo):

La aplicación del término pasivo en relación al acondicionamiento del espacio es reciente. En la segunda guerra mundial el término pasivo fue empleado para identificar aparatos de control aeroespacial que no requerían de un dispositivo motorizado o eléctrico. Así pues, los investigadores adoptaron el término pasivo para describir sistemas de acondicionamiento basados en fenómenos naturales para su funcionamiento. Los sistemas convencionales de calentamiento y enfriamiento se denominaban “activos” debido al uso de componentes mecánicos para mover y controlar el aire y algunos fluidos, de tal modo que fue lógico que los investigadores llamaran pasivos a aquellos sistemas que no incluían en su funcionamiento dispositivos mecánicos.

A finales de los 60's y principios de los 70's John Yellott y Harold Hay estudiaron el “skytherm” (techo estanque con aislante móvil) describiéndolo como un sistema ejemplar de calentamiento y enfriamiento al que denominaron como un sistema de energía natural.

En los Estados Unidos, el primer uso formal del término “pasivo” relacionado al acondicionamiento del espacio se debe al ingeniero Benjamin T. Rogers quien publicó en 1972 dos artículos titulados “Passive Heat Recovery as an Energy Conservation Measure”, Estos artículos se referían a la aplicación de medidas para optimizar el funcionamiento energético de los edificios y reducir la entropía del universo (aumento del rendimiento, es eficiencia energética).

Este término se ha venido aplicando tanto para el calentamiento como para el enfriamiento. En el caso del calentamiento pasivo, este se consigue por medio de la radiación solar como única fuente de energía, mientras que el enfriamiento pasivo se logra mediante la acción de varios depósitos naturales de energía y una gran variedad de prácticas bioclimáticas en el diseño del edificio.

1.3. SITUACIÓN DE ESPAÑA

Según los últimos datos publicados del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE), el consumo de energía final del Sector Edificación ascendió en el año 2005 a 18.123 ktep sobre un total nacional de 106.940 ktep, lo que representa el 17% del consumo de energía final nacional. De este consumo, 10.793 ktep correspondieron al sector doméstico, es decir un 10% del consumo energético nacional y 7.330 ktep al sector terciario, un 7% sobre el total nacional.

El parque edificatorio español está constituido mayoritariamente por edificios cuyo uso principal es el de vivienda. En el año 2005, el 85% de la superficie construida estaba formada por edificios de viviendas y el 15% restante por edificios destinados a otros usos principalmente administrativo y comercial. En concreto, 389 millones de m² correspondían al sector terciario en sus diferentes usos y el resto 2.300 millones de m² al sector doméstico, de los que 1.600 millones de m² estaban destinados a viviendas principales.

El consumo de energía final en el sector doméstico se distribuye, por usos, de la siguiente forma, para una vivienda media: calefacción (41,7%), agua caliente sanitaria (26,2%), iluminación (9%) y aire acondicionado (0,4%). No obstante lo anterior, estudios recientes (Proyecto CEVIAN: Control Energético de Viviendas en Andalucía; Orden de Incentivos Agencia Andaluza de la Energía) prueban que puede existir una enorme disparidad en el desglose anterior en función de la zona climática de la localidad pudiendo alcanzar valores superiores al 5% en localidades situadas en zonas climáticas 3 o 4.

En cualquier caso, el peso del aire acondicionado, dada su estacionalidad, no alcanza a día de hoy valores de consumo importantes, aunque contribuye a generar picos de demanda eléctrica que contribuyen a ocasionar problemas locales en la

continuidad del suministro eléctrico en los periodos de verano en que se alcanzan las temperaturas exteriores más altas.

Por lo que respecta a los edificios con usos diferentes al de vivienda son los edificios de uso administrativo los que tiene un mayor peso en el consumo de energía del sector terciario, seguido por los edificios destinados al comercio, los restaurantes y alojamientos, edificios sanitarios y educativos. Entre los tres consumidores más importantes se llevan el 87% del consumo de energía del sector: refrigeración (30%), calefacción (29%) e iluminación (28%). La ofimática (4%) y el agua caliente sanitaria (3%) le siguen a gran distancia.

Los edificios tienen como se ve una gran incidencia en el consumo energético nacional y dentro de los usos específicos la refrigeración es el elemento dominante del sector terciario y tiene una tendencia fuertemente creciente en el doméstico. A todo esto hay que añadir que se trata de una incidencia a largo plazo, debido a que se trata de un producto de una gran durabilidad. Se estima que los edificios existentes actualmente en Europa, consumirán más de los 2/3 de lo que el sector de la edificación, en su totalidad, consumirá en el año 2050 (G. Henderson y otros, “Energy labelling of Existing Buildings”, Proceedings of the 2001 ECEEE summer study).

España y los demás países de la Unión Europea han suscrito y asumido importantes compromisos relativos a la reducción del consumo de energía y la mitigación del cambio climático. Citemos por ejemplo el protocolo de Kyoto, la Directiva 2006/32 CE, que define un marco de esfuerzo común para conseguir un ahorro energético de un 9% en el año 2016 y la decisión del Consejo europeo de nueve de marzo de 2007: alcanzar niveles de ahorro del 20% en el horizonte del 2020).

El cumplimiento de todos estos compromisos depende en gran medida de la existencia de intervenciones sustanciales en la energética edificatoria del sector edificación. Por ello, la administración española ha desarrollado programas y medidas de sostenibilidad, contra el cambio climático y de ahorro y eficiencia energética en el sector de la edificación. Entre estas medidas, dos de ellas son especialmente relevantes dentro del contexto de PHDC:

En primer lugar, la transposición de **la Directiva 2002/91/CE** relativa a la eficiencia energética de los edificios. En el espíritu de la directiva subyace la necesidad de acometer tres grupos de medidas con carácter simultáneo:

- El endurecimiento progresivo de la reglamentación sobre calidad térmica de los edificios de nueva planta.

- La promoción de edificios de nueva planta cuyo consumo de energía sea netamente inferior al que se deriva de la aplicación estricta de la reglamentación.

Estos edificios tendrán un reconocimiento oficial como edificios de alta eficiencia energética o edificios de clase A o B.

- En el sector de los edificios existentes, la directiva establece la necesidad de su certificación energética, que conlleva a la identificación, para cada edificio, de una relación de medidas de mejora que, dentro de un contexto de viabilidad técnica y económica, supongan una mejora significativa de la eficiencia de dicho edificio.

La materialización de los objetivos anteriores se ha llevado a cabo hasta la fecha mediante tres reales decretos, de los cuales mencionamos el Código Técnico de la Edificación (CTE) aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo y el Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la Certificación de Eficiencia Energética de Edificios de Nueva Construcción. Falta un tercer real decreto relativo a los edificios existentes cuya publicación debe producirse con anterioridad a enero de 2009 y de la que existen borradores que definen las líneas generales de dicho real decreto.

El segundo programa a destacar es el **Plan de Acción, para el periodo 2008 – 2012, (PAE4+) de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012**, aprobado en el Consejo de Ministros del 20 de julio y que es la continuación del establecido para el periodo 2005-2007 y que a su vez precede a nuevos planes de acción que se extenderán como mínimo hasta 2020.

Los Planes de Acción constituyen en síntesis importantes medidas de acompañamiento a los reales decretos mencionados.

Directamente relacionadas con el proyecto, se establecen explícitamente líneas de ayuda y subvenciones directas asociadas a las siguientes medidas:

– **Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas existentes:** las actuaciones energéticas consideradas dentro de esta medida serán aquellas que consigan una reducción del consumo de energía convencional, mediante actuaciones en sus instalaciones. Se proponen explícitamente actuaciones energéticas del tipo sustitución o mejora del rendimiento de equipos de producción de calor y frío, sustitución de equipos de movimiento de los fluido, utilización de sistemas de enfriamiento gratuito por aire exterior y de recuperación de calor del aire de extracción. Se plantea como objetivo el actuar sobre el 20% del parque de las instalaciones térmicas.

– **Promover la construcción de nuevos edificios** con alta calificación energética”. Se propone que el 17% de la nueva superficie construida en edificios sea de alta clasificación energética, Clase A o B.

En definitiva, la reducción del consumo de energía en edificios nuevos y existentes se constituye en un tema nacional y europeo de máxima prioridad existiendo compromisos formales escalonados en el tiempo, soportados por un desarrollo reglamentario claro y por medidas de acompañamiento a corto, medio y largo plazo que se concretan en líneas de ayuda y subvenciones directas.

La existencia de este marco estable en el que nos encontramos favorece el desarrollo de sistemas y soluciones innovadoras como las que se incluyen en la presente propuesta.

En definitiva, las dos medidas citadas (certificación de edificios existentes y PAE4+) configuran un marco ambicioso en cuanto a número de actuaciones que se van a derivar de la implementación de las dos medidas y en cuanto al alcance y recursos financieros con que se contemplan dichas intervenciones

1.4. DISEÑO BIOCLIMÁTICO

Los edificios relacionados con los servicios representan alrededor de un tercio del consumo total de energía en la Unión Europea. Los edificios residenciales y terciarios han sido identificados como los mayores usuarios finales de la energía, principalmente para la calefacción, la iluminación, los aparatos y los equipos. Numerosos estudios y la experiencia práctica demuestran que existe un gran potencial para el ahorro de energía aquí, probablemente mayor que en cualquier otro sector. Con iniciativas en este ámbito, se puede lograr importantes ahorros de energía, lo que ayudará a alcanzar los objetivos sobre el cambio climático y la seguridad del suministro. Modificaciones en el comportamiento de las tecnologías ya han dado lugar a un máximo del 50% de reducción en energía en algunos países nórdicos. La arquitectura tradicional muestra como se diseñaron sistemas de refrigeración pasiva que no hacían uso de la energía mecánica para funcionar (por ejemplo, torres de refrigeración, torres de viento, fuentes y cal). Un cambio importante se produjo a inicios del siglo XX, cuando W.H. Carrier inventó la refrigeración mecánica (“chiller”) que se desarrolló en gran escala después de Segunda Guerra Mundial. La tecnología del aire acondicionado y la disponibilidad de energía barata permitieron a los arquitectos e ingenieros de edificios mantener una temperatura confortable en cualquier orientación, nivel de aislamiento, sombreado y masa térmica. Así, en muchas partes del mundo, la refrigeración pasiva y las técnicas de diseño fueron abandonadas hasta que han cobrado renovado interés en el último par de décadas alentado por el asunto de la crisis energética y el medio ambiente. En los últimos años, los científicos europeos, los ingenieros y arquitectos han diseñado con éxito innovadores edificios que utilizan técnicas de enfriamiento pasivo, tales como la ventilación natural. La creativa combinación de estas técnicas es posible y, de hecho, se han aplicado con provecho. Sin embargo, son necesarios un cuidadoso diseño, un cálculo detallado, una atenta ejecución y control automático de la operación para lograr una solución satisfactoria.

Un buen diseño bioclimático puede conseguir ahorros de hasta el 70% para la climatización e iluminación de su hogar. Todo ello con un incremento del coste de construcción no superior al 15 % sobre el coste estándar.

El diseño bioclimático no hace referencia a una arquitectura especial, sino simplemente a aquella que tiene en cuenta la localización del edificio y el microclima en el que se integrará, para adaptar el inmueble al enclave en el que será construido.

Actuando sobre aspectos como el color de los muros o de los tejados, se puede ahorrar energía. Las paredes de color claro reducen la ganancia de calor hasta un 35%. Un tejado color claro comparado con uno oscuro puede reducir la ganancia de calor en un 50 %. Un edificio mal orientado y con una forma inadecuada puede necesitar más del doble de energía que uno similar bien orientado.

La forma juega un papel esencial en las pérdidas de calor de un edificio. En líneas generales, se puede afirmar que las estructuras compactas y con formas redondeadas tienen menos pérdidas que las estructuras que tienen numerosos huecos, entrantes y salientes.

La orientación de los muros y ventanas influye decisivamente en las ganancias o pérdidas de calor en un edificio. En zonas frías interesa que los cerramientos de mayor superficie, los acristalamientos y las estancias o habitaciones de mayor uso estén orientados al sur. Y los acristalamientos y superficies orientadas hacia el norte deben ser lo más pequeñas posible.

En zonas muy calurosas, sin embargo, interesa que en las orientaciones con más radiación solar (sur y sureste) se encuentran la menor superficie acristalada posible.

El diseño eficiente de un edificio procurará el máximo aprovechamiento de las energías gratuitas, evitará las pérdidas/ganancias de calor no deseada y optimizará el buen funcionamiento de los equipos.

Actuando sobre la envolvente o piel del edificio se pueden captar, conservar y almacenar recursos energéticos del entorno inmediato. Además, el modo en que se

coloquen los diversos huecos y la distribución de las distintas habitaciones podrá facilitar la ventilación natural.

Las ventanas y cristaleras, los invernaderos, los atrios y patios, con una adecuada orientación, permiten que la radiación solar penetre directamente en el espacio a calentar en invierno, lo que producirá un ahorro de calefacción.

En verano la disposición de los elementos de sombreado, como los voladizos, toldos y persianas, porches, etc., también podrán evitar ganancias de calor, reduciendo así la factura del aire acondicionado. Un modo de evitar las ganancias de calor en verano es el uso de sistemas evaporativos y de rociado de agua. Así, colocar una cortina o lámina de agua en una pared, aumenta la sensación de confort en verano. El calor es absorbido por el agua al evaporarse y la pared se mantiene a una temperatura menor, con el consiguiente efecto refrigerante en el interior de la vivienda.

Los árboles, setos, arbustos y enredaderas, ubicados en lugares adecuados, no sólo aumentan la estética y la calidad ambiental, sino que además proporcionan sombra y protección ante el viento. Por otra parte, el agua que se evapora durante la actividad fotosintética enfría el aire y se puede lograr una pequeña bajada de temperatura, de entre 3 y 6 °C, en las zonas arboladas. Así mismo, los árboles de hoja caduca ofrecen un excelente grado de protección del sol en verano y permiten que el sol caliente la casa en invierno. Además, si rodeamos de vegetación (césped, plantas, etc.) el edificio, en lugar de pavimento de cemento, asfalto o similares, lograremos disminuir la acumulación de calor.

Puede ahorrarse energía en iluminación, a través de diseños que consigan la máxima ganancia de luz, sin sobrecalentamiento indeseado. Recuérdese que la luz natural que entra en la vivienda depende no sólo de la iluminación exterior, sino también de los obstáculos, de la orientación de la fachada, del tamaño de los huecos y espesor de los muros, del tipo de acristalamiento, de los elementos de control solar existentes (persianas, toldos,...), etc. Para optimizar la iluminación natural se precisa una distribución adecuada de las estancias en las distintas orientaciones del edificio, situando, por ejemplo, las habitaciones que se utilicen más durante el día en la fachada sur.

1.5. REFRIGERACIÓN NATURAL

La refrigeración natural consiste en la disipación de calor en edificios mediante un sumidero ambiental a menor temperatura, tales como el aire, el agua, el cielo o la tierra, pudiéndose usar también sistemas que utilizan combustibles fósiles o electricidad, siendo dicho consumo insignificante. Estos son los sistemas de refrigeración tradicionales que en épocas pasadas dominaron el diseño arquitectónico durante mucho tiempo en climas calientes.

La refrigeración natural es llamada pasiva siempre que los procesos usados no requieran el gasto de ninguna energía no renovable, e híbrida en caso contrario.

Las técnicas de refrigeración naturales pueden ser clasificadas según diferentes criterios: la naturaleza del sumidero, del calor y de los fenómenos de transferencia involucrados, el período de almacenaje o el material utilizado, el tipo de uso, etc.

En este caso, una buena distinción sería:

- Sistemas Directos: cuando el sumidero de calor promueve una acción de refrigeración directa sobre la estructura del edificio y/o del aire interior.
- Sistemas Indirectos: cuando el sistema enfría primero un fluido de trabajo, para ser posteriormente descargado (con o sin el almacenamiento intermedio) al edificio.

El Dr. Baruch Givoni realizó una clasificación de sistemas de enfriamiento pasivo y de baja energía basándose en los procesos generados por los depósitos energéticos ambientales, definiendo los sistemas de la siguiente forma:

- Ventilación para el confort
- Enfriamiento convectivo nocturno
- Enfriamiento por radiación nocturna
- Enfriamiento evaporativo directo
- Enfriamiento evaporativo indirecto
- Subsuelo

La aplicación de los anteriores sistemas de enfriamiento, señala el Dr. Givoni, depende tanto del tipo de edificio como del clima. Algunos sistemas funcionan solamente en condiciones climáticas específicas, además de que los límites de las condiciones climáticas en las cuales un sistema de enfriamiento dado puede ser aplicado no son los mismos para distintos países. Las personas que habitan en regiones cálidas pueden tolerar temperaturas más altas antes de experimentar una clara sensación de malestar que aquellas personas que habitan en regiones de clima templado; esto se debe al fenómeno de la aclimatación. En general, la aplicación de estos sistemas de enfriamiento depende principalmente de las condiciones climáticas existentes en los veranos nocturnos de la región dada, en particular de la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo.

Existen otras clasificaciones para los sistemas pasivos de enfriamiento que en términos generales se basan en los dos aspectos antes mencionados y entre las que se encuentran las de David Wright y M. Bahadori (7).

Este proyecto va a concentrar los principios físicos, la aplicabilidad, las tecnologías más relevantes y los métodos de mejorar la eficacia de los principales sistemas de refrigeración natural, tanto pasivos como híbridos (PHDC, Passive Hybrid Downdraft Cooling)

1.6. TÉCNICAS CONVENCIONALES Y SUMIDEROS AMBIENTALES

Un rasgo común de las técnicas de refrigeración indirectas naturales es la disponibilidad de un medio a una temperatura más que la del aire del edificio.

La diferencia conceptual entre la refrigeración convencional y la refrigeración basada en sumideros ambientales se va a definir resumiendo cada uno por separado.

En sistemas convencionales el aire por lo general es enfriado normalmente con agua fría producida en una enfriadora mediante un ciclo frigorífico.

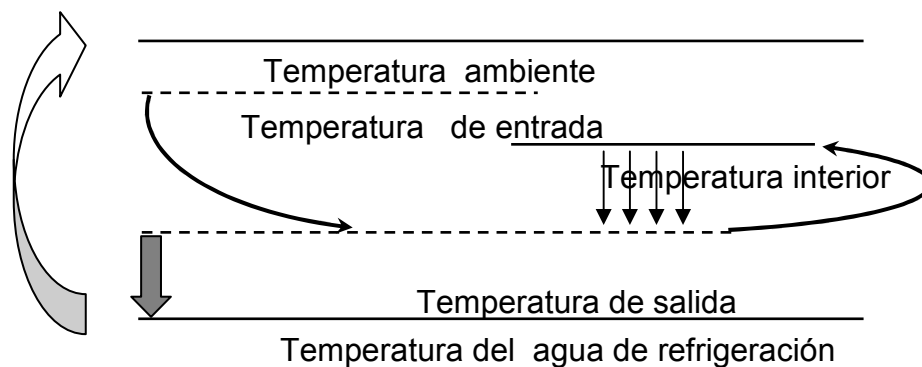


Figure 1. Sistema convencional.

El sumidero ambiental promueve un enfriamiento sobre un fluido de trabajo (agua o aire) con o sin almacenamiento de energía, para refrescar el aire interior del edificio.

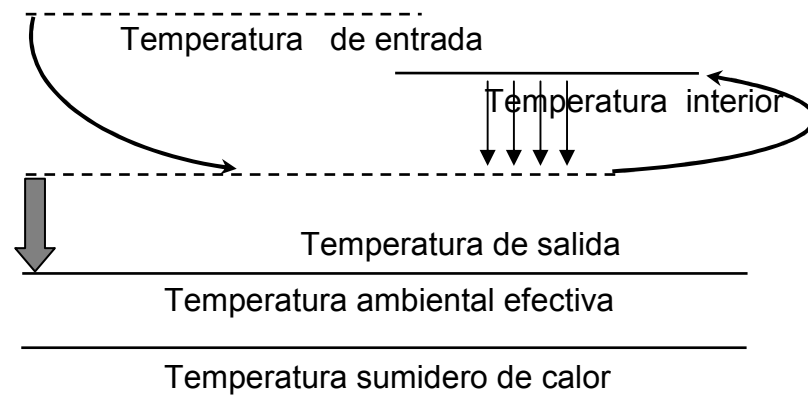


Figure 2. Enfriamiento por sistemas naturales

La disponibilidad de los sumideros según la técnica usada es muy variable, así como la capacidad de los mismos de evacuar ese calor del fluido de trabajo. Estos dos efectos son caracterizados en términos de una temperatura ficticia a la que se denominó temperatura eficaz ambiental (Álvarez, 1997) definida como la temperatura real a la cuál el calor ese calor se transfiere.

Un resumen de los elementos de PHDC podría ser:

Enfriamiento evaporativo	Medio Frío (sumidero)	Temperatura efectiva del ambiente	Disipar	Fluido de trabajo	Medio caliente
Directo	Temperatura bulbo húmedo	Temperatura bulbo húmedo	Temperatura bulbo húmedo	Aire ambiente	Temperatura interior del edificio
Indirecto	Temperatura bulbo húmedo	Temperatura bulbo húmedo	Intercambiador de calor	Aire ambiental	Temperatura interior del edificio
Regenerativo	Temperatura de punto de rocío	Temperatura de punto de rocío	Intercambiador de calor	Aire ambiental	Temperatura interior del edificio

Tabla 1. Elementos PHDC

Descartando los sistemas regenerativos, las aplicaciones PHDC dependen de los siguientes factores:

1. El clima, que proporciona la disponibilidad del sumidero de calor en términos de su nivel termal - la temperatura de bulbo húmedo - y su variabilidad a lo largo del año y del día.
2. Las necesidades del edificio (perfiles de carga térmica del mismo). La combinación de 1 y 2 nos marcarán el grado en que nuestro sistema es capaz de combatir las cargas de ese edificio.
3. La eficacia de esta tecnología conduce a llevar el aire ambiente a lo más cercano a su temperatura de bulbo húmedo.

El consumo de electricidad (en ventiladores y/o bombas) con las técnicas PHDC es muy bajo comparado con requerido por sistemas de refrigeración convencionales (compresores, ventiladores y/o bombas).

Las principales desventajas de las técnicas PHDC son:

1. En días muy calientes, estas técnicas podrán ser insuficientes para satisfacer las necesidades del edificio y será necesario la presencia de un sistema auxiliar.
2. Podría suceder que las técnicas PHDC fuesen inútiles, es decir, que la humedad exterior fuese lo suficiente alta como para no ser efectivo el enfriamiento evaporativo, o en el caso de intercambios con fluido de trabajo, no consigamos que su temperatura sea inferior a la que necesitamos en el aire interior.

Es este segundo punto el limitante del uso de PHDC, ya que va a incrementar el coste de inversión inicial, siendo en la realidad unos de los principales parámetros de decisión. Sin embargo, será necesario siempre quedarse con el concepto: usar todas las propiedades naturales al máximo, sea por ejemplo: se tuviera disponibilidad de agua y el problema antes enunciado, podríamos plantearnos la utilización de duchas en lugar de sistemas evaporativos. Además del ahorro de ventiladores que esto supondría (impulsarían el mismo usando el tiro inducido por estas duchas), podríamos enfriar.

En conclusión, usar el concepto significa, que cuando un enfriamiento no es posible, quizás sea posible conducir el aire con el menor gasto de energía asociado. PHDC no solo engloba técnicas de refrigeración si no técnicas de movimiento de aire de manera óptima y eficiente.

La viabilidad económica va a ser clave en el desarrollo de estas técnicas como más adelante explicaremos, solo un coste de mantenimiento y operación bajo justificará el uso de estas técnicas, ya que en cuanto a costes de inversión, pueden llegar a ser más elevados que los propios de instalaciones convencionales. De ahí que su uso para edificios no residenciales pueda estar justificado; y en la actualidad para edificios residenciales solo cuando no se requiera ningún sistema auxiliar de refrigeración.

1.7. ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

1.7.1. Medio Frío

Es el proceso que sucede cuando ponemos en contacto agua con aire no saturado y caliente. Este proceso es la suma de dos efectos, que vamos a evaluar desde el punto de vista de una gota aislada en primer lugar (Un completo informe sobre esta temática está desarrollado en el bloque correspondiente a gota aislada):

-Un efecto sensible, debido a la diferencia de temperaturas entre la gota y el aire no perturbado.

-Un efecto latente, causado por la transferencia de calor y masa producida por la diferencia de humedad entre el aire circulante no saturado y la superficie de la gota. Puesto que será mayor la concentración de humedad en la superficie de la gota se producirá la evaporación de la misma para mantener el equilibrio másico (disminuirá su tamaño). Esto sucederá hasta el momento que saturemos el aire.

Estos dos efectos son opuestos: el efecto sensible va a tender a elevar el nivel térmico de la gota, mientras que la energía latente absorbida por el agua evaporada enfría la gota. El resultado es una temperatura de equilibrio conocida como temperatura de bulbo húmedo.

En segundo lugar, el estudio del aire: el aire ha reducido su temperatura. Ha cedido energía por convección-conducción a la gota, y además por el proceso de transferencia de masa y energía, en el que ese agua de la superficie de la gota ha absorbido energía para evaporarse.

La cantidad de energía que se requiere para convertir una unidad de masa de agua de líquido a vapor es del orden de $2.260 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

La capacidad de transferencia al aire depende de su temperatura de bulbo húmedo, de su humedad relativa y presión, como principales factores, ya que el resto están relacionados (Bowman et al, 2001). Por el ejemplo, para las condiciones típicas de verano de Sevilla, (38°C , la humedad relativa del 30 %), la temperatura de bulbo húmedo es 23.5°C .

1.6.2 Introducción a los sistemas y su funcionamiento

Para hacer un resumen de lo que en capítulos posteriores se definirá de manera extensa se pueden definir estos sistemas, de modo simplificado, como una torre de impulsión más:

- Micronizadores y/o
- Water sprinkler y/o
- Sistemas por medio poroso

Estos sistemas se conocen como sistemas de enfriamiento directo evaporativo y son recomendables en zonas climáticas de baja humedad. Su funcionamiento es enfriar el aire y difundirlo por el edificio.

Básicamente, los tres sistemas antes mencionados son los que pueden ser usados como sistemas evaporativos directos:

1. El primer sistema usa filas de micronizadores (inyectores que generan una niebla de gotas de tamaños cercanos a las 10 micras). En este caso las pequeñas gotas de agua son evaporadas totalmente antes del final de la torre.
2. Water sprinkler, o “ duchas ” no son evaporadas totalmente, ya que habrá tamaños de gotas del orden de milímetros, lo que se requiere recuperar y recircular el exceso del agua.
3. El sistema poroso consiste en medios porosos hechos de celulosa o de arcilla impregnados continuamente de agua y por los que se hace circular el aire. Su grosor varía típicamente entre 5 cm a 10 cm. El tamaño de cada celda varía entre 1 mm a 2 cm.

En términos de criterios de diseño, el empleo de micronizadores produce una mejor regulación del sistema y una reducción significativa de las pérdidas de presión en comparación con el medio poroso. Así como el empleo de micronizadores reduce el consumo de agua y crea un efecto de tiro invertido mayor que los sistemas por duchas.

Es útil el uso de sistemas evaporativos indirectos, cuando no se admita un aumento de la humedad del . En estos sistemas una corriente de aire exterior (el aire primario) es enfriada sin ganar la humedad, transfiriendo calor a una corriente enfriada con un sistema evaporativo (corriente secundaria). Los sistemas indirectos más modernos intercambiadores de calor por placas. La corriente primaria se hace pasar por placas delgadas mojadas por fuera por la corriente de aire secundario. Los plásticos son

materiales ideales por su coste, peso y resistencia de corrosión. La eficacia podrá ser mejorada mediante aletas y optimizando los caudales tanto primario como secundario.

El diagrama psicrométrico (figura 3) muestra las condiciones del aire ambiental (E0), las condiciones de salida de aire que es enfriado por el sistema de refrigeración directo evaporativo (E1) y las condiciones de salida de aire que es refrescado por el sistema de refrigeración indirecto evaporativo (E2).

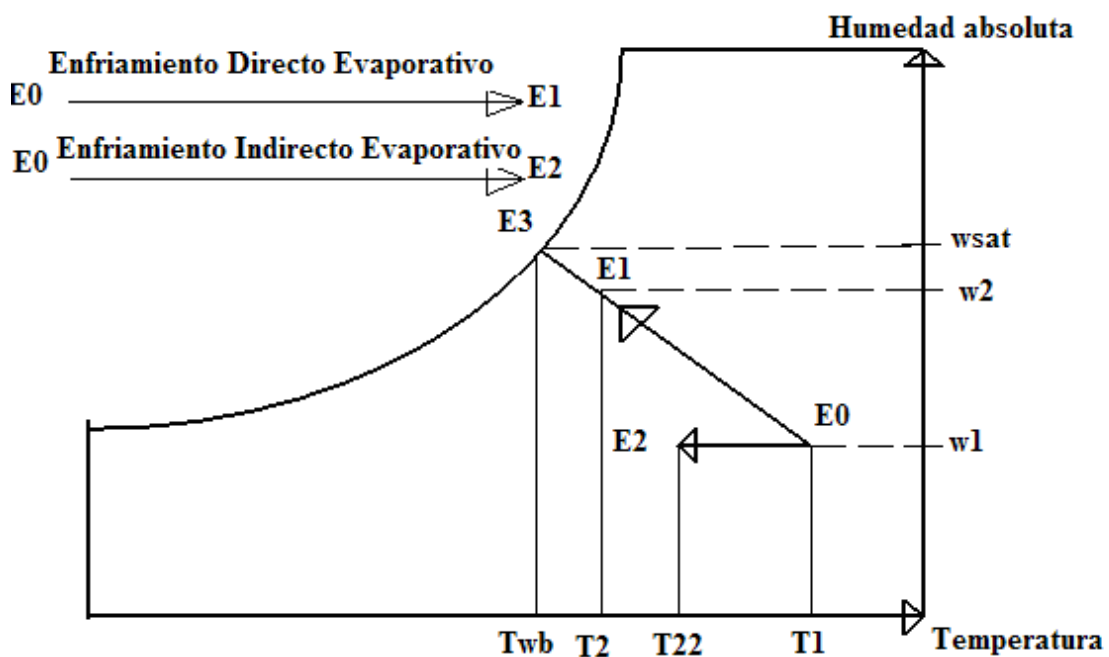


Figura 3: Diagrama Psicrométrico

1.7.2. Nociones de diseño y tamaño

Un diseño correcto requiere el uso de un CFD (Computational Fluid Dynamic), es decir analizar el edificio en detalle.

La optimización del diseño de la torre (o cuerpo de impulsión) implica muchas cuestiones conectadas:

- Altura de la torre
- Forma, tamaño y posición de las entradas.
- Forma, tamaño y posición de las salidas.
- Posición relativa de entradas y salidas.
- Disposición de las torres en el edificio.

En esta sección vamos a mostrar e ilustrar algunas de las principales conclusiones referentes al diseño.

– Salidas

El área de las salidas debe ser estudiada con detalle por dos motivos, por intentar ser capaz de expulsar la mayor cantidad de calor y para intentar igualar los caudales por cada piso, a fin de tener la mayor uniformidad posible.

Como ejemplo las actuaciones realizadas en un edificio de referencia en Catania y desarrollado por MCA (Arquitectos de Mario Cuccinella) en el marco de proyecto de PDEC. (Uso de técnicas de enfriamiento evaporativo para edificios no residenciales: evaluación de mercado, contrato No 4.1030/C/00-009/2000, parcialmente financiado por Comisión Europea de desde el 01/03/2001 a hasta el 31/12/2003).

Existen dos posibilidades:

Una extracción sin ventiladores, en la que tengamos que extremar el análisis de las fuerzas de flotabilidad para garantizar el correcto movimiento del aire. Es una opción posible como se demuestra en el edificio TRC construido en Ahmedabad que lleva funcionando satisfactoriamente los diez últimos años pasados.

La instalación de ventiladores, que permita regular el flujo, controlado la eficacia de la evaporación en cada momento.

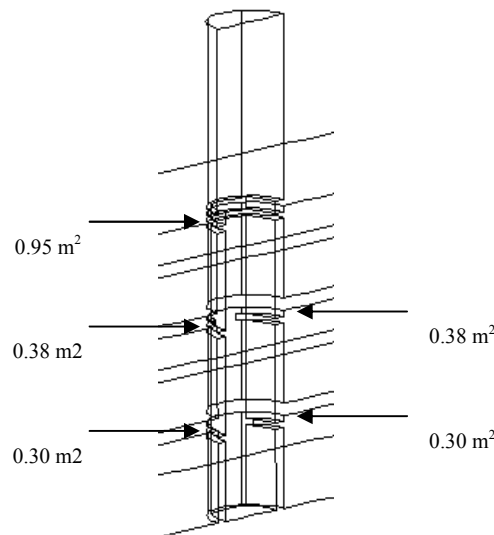


Figura 4: Áreas de entrada

– Entradas

Las áreas de admisión suelen ser más grandes en los primeros pisos (superiores), para garantizar el mismo caudal por plantas, ya que los efectos del tiro inducido son directamente proporcionales a la altura.

El área de admisión debe ser distribuida alrededor de la torre, ya que los mejores resultados se obtienen cuando es extendida a todo el perímetro.

Posición relativa entrada-salida

El principal factor a vigilar es el cortocircuito, que el aire entre y salga sin pasar por el edificio, por ejemplo si se colocan adyacentes en distancias cortas.

Por ejemplo, la siguiente imagen muestra perfil de las líneas de corriente de una sección de un espacio donde la entrada de aire está la esquina derecha y la salida de aire en la inferior izquierda. Allí podemos ver que el aire entra el contacto con paredes 1 y 2, pero no tanto con 3 y 4. Más información en cuánto a este tema pueden encontrarse en el artículo sobre ventilación nocturna desarrollado por “Salmerón et al., 2007”.

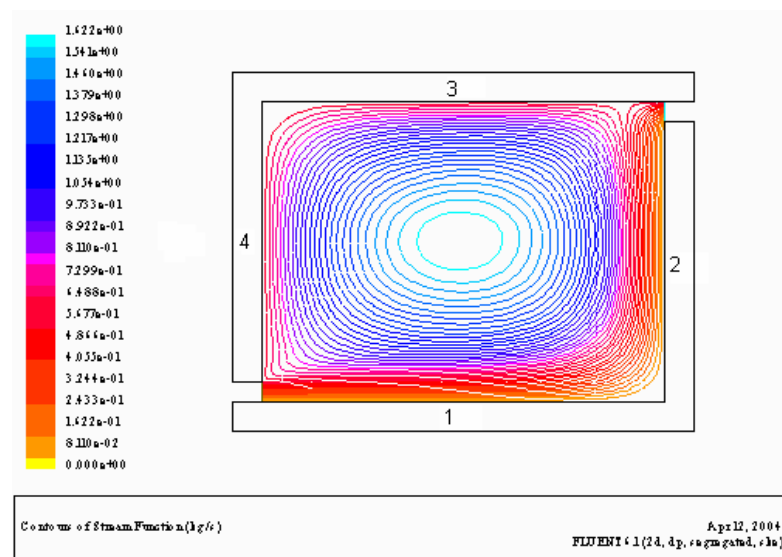


Figura 5: Líneas de corriente usando Fluent © software

1.8. CLIMA. APLICABILIDAD.

Una primera estimación de la aplicabilidad de las técnicas PHDC según la región puede ser obtenida de los datos climáticos. Hay una gran variedad de variables que nos pueden ayudar a medir esta aplicabilidad (“Alvarez, 1997”).

La caracterización del ambiente juega un papel fundamental en el correcto desarrollo de la aplicación, puesto que como ya se ha comentado todo va a girar dependiendo de las condiciones del aire a la entrada, las cuales mediante automatismos vamos a conocer y ponerlas iterativamente en juego.

Partiendo de estas condiciones podemos realizar un diseño nominal de nuestra instalación, a fin de optimizar de la manera más precisa el sistema a su entorno, sabiendo que esto nos servirá para el prediseño y la pre-elección, pero el funcionamiento será regulado continuamente mediante los automatismos mencionados. En nuestro orden de parámetros, temperatura, humedad y velocidad de viento.

La siguiente figura muestra la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo exterior y la seca exterior en días de grado en España, esta diferencia es nuestro potencial de enfriamiento de un aire exterior

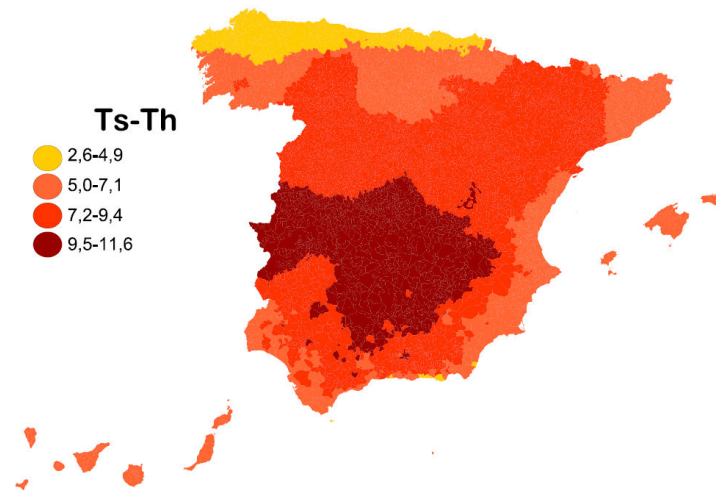


Figura 6: Diferencia Temperatura de Bulbo húmeda Exterior y Seca. Promediado durante 24 horas para junio - septiembre.

Las zonas rojas son los lugares en los que las técnicas evaporativas son más aplicables.

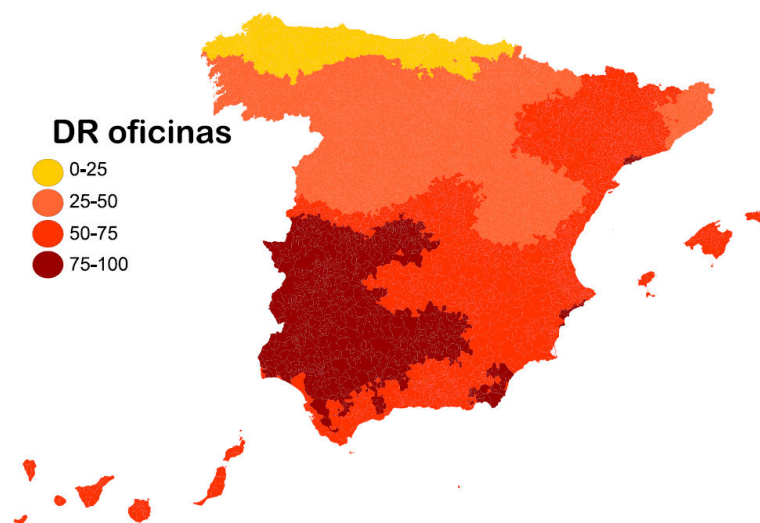


Figura 7: Energía demandada por el edificio de referencia en kWh/m². Con unas ganancias internas de 15 W/m² durante 12 horas al día.

El mapa debajo muestra los valores de la energía de refrigeración máxima específica obtenida de julio a septiembre, asumiendo una temperatura de interior de 25 ° C. El integral es ampliado al período de operación (de 8 a.m. a 6 p.m.) de un edificio de oficinas usado como referencia.

2. GOTA AISLADA

2.1. DESCRIPCIÓN

El objetivo de este capítulo es la descripción del comportamiento evaporativos de una gota en el aire con el interés de sistemas de enfriamiento de aire basados en la evaporación de gotas en suspensión. Otra posible aplicación sería la del enfriamiento simultáneo e aire y agua basados en el empleo de surtidores de agua pulverizada.

Las gotas se suspenden en la atmósfera de aire caliente, al entrar en contacto con el aire las gotas se evaporan tomando la energía necesaria del mismo, que como consecuencia se enfría. Puesto que el aire frío pesa más que el caliente, se produce un movimiento neto de caída del aire frío que puede ser utilizado para acondicionar una zona ocupada a la vez que se posibilita el acceso de aire no tratado que le da continuidad al proceso.

Los parámetros fundamentales de la gota, que más van a interesar, serán su diámetro y el tiempo que tarda la gota en evaporarse.

A razón de las dos aplicaciones mencionadas, y adelantando acontecimientos, aparece una distinción:

En los primeros sistemas, en los que se buscará enfriar el aire, buscaremos evaporar la mayor cantidad de agua en el menor tiempo posible. Para ellos se buscará aumentar la superficie de intercambio, es decir, disminuyendo el tamaño de gotas (aumentar la relación área-volumen), con gotas de diámetros del orden de 10 micras. Este sistema se conoce como micronización.

En los otros sistemas de enfriamiento, las gotas apenas se evaporan tamaños de orden de milímetros, aunque sí lo suficiente para que reduzca su temperatura a unos niveles apreciables enfriando el aire. Esto obligará a la recirculación del agua. Estos sistemas se denominan como Water Sprinkler (“Duchas”).

Así pues, se hará una distinción entre dos tipos de gotas:

- Gotas del orden de las 10micras de diámetro. De estas gotas interesará el tiempo que tarda en evaporarse bajo las distintas condiciones ambientales (Evaporación completa).
- Gotas del orden de 1mm de diámetro. Interesará el porcentaje evaporado, ligado a la evolución de su diámetro, además de las variaciones con el tiempo.

Aunque se haga esta distinción entre sistemas de enfriamiento y tamaños de gotas, el desarrollo teórico será el mismo para ambos casos. La distinción se hará posteriormente de cara a simplificar las ecuaciones.

Para la realización de este estudio, se tomarán las ecuaciones que definen el problema, se traducirán al programa Matlab, con él analizaremos teóricamente la gota para después corroborar todo el estudio mediante CFD Fluent, que asumiremos como validación práctica y experimental.

2.2. FENÓMENO FÍSICO

Este punto trata el análisis cualitativo de lo que ocurre a una gota aislada (no interacciona con otras gotas) que evoluciona en aire a unas determinadas condiciones de temperatura y humedad, partiendo de una velocidad relativa inicial entre el aire y la gota.

Las condiciones iniciales serán la temperatura y el diámetro de la gota al salir del dispositivo de micronización/pulverización, así como la velocidad relativa de la misma.

Al haber velocidad relativa entre aire y agua (si no la hubiera, por tener velocidades similares, se pondría entender que la gota está suspendida en el aire), existe un intercambio de cantidad de movimiento. Aparece una fuerza de rozamiento sobre la gota, que hará que la velocidad horizontal tienda a la del aire y la vertical a la de caída libre. Además la gota se verá afectada unas fuerzas de flotabilidad y de gravedad.

Gracias al conjunto de fuerzas definiremos la trayectoria de la gota, la cuál nos puede servir para evaluar distancia de evaporación o choques.

Para que haya equilibrio másico en la interfase de separación es necesario que la presión parcial del vapor de agua en la interfase sea la correspondiente a la temperatura de la gota. Si el aire no está saturado, la concentración de humedad en la interfase será mayor, provocándose una difusión del vapor desde la interfase hacia las zonas más alejadas con concentraciones menores. Para mantener esa presión en la interfase se estará obligando a que la gota se evapore, disminuyendo su tamaño.

Termicamente, hay que destacar los dos efectos contrapuestos, la reducción de temperatura de la gota debido a la evaporación que sufre, a ese calor latente de vaporización del agua; y el aumento debido a la transferencia convectiva de calor con

un aire más caliente. Estos dos efectos se contraponen, harán que se alcance un equilibrio, en el que todo el calor absorbido por la gota sea el necesario para evaporarse.

2.3. MODELIZACIÓN

Para la creación de un modelo es necesario hacer una serie de hipótesis previas, que alejarán el modelo del fenómeno físico real, pero permitirán la aplicación de correlaciones empíricas sencillas ampliamente estudiadas:

- Gota esférica : En realidad las gotas no serán esféricas, sobre todo cuanto mayor sea el radio, ya que al aumentar éste disminuye la importancia de la tensión superficial (cohesión de la gota), y aumenta la de la velocidad relativa, lo que implicará mayores esfuerzos y deformaciones de la gota. De esta manera la gota se modelará como una gota esférica de forma que se conserve el volumen de la real, despreciando esta deformación para los tamaños estudiados.

- Gota aislada: Es decir no interactuará a lo largo de su vida con ninguna otra gota ni con estelas. Esta suposición conlleva el tratamiento independiente de cada gota.

- Temperatura constante en el interior de la gota. Como se puede apreciar en la figura, esto no es del todo cierto, pero para el rango de variación de la temperatura de la gota ($\sim 10^\circ\text{C}$) así como para el tamaño de gotas considerado se caracterizará la temperatura de la gota con un valor constante.

- Temperatura, presión de vapor y presión en el aire uniforme. Esta hipótesis llevaría aparejada la existencia de campos esféricos de temperatura, presión y concentraciones, que como ya se ha comentado, no es del todo cierto, menos aún cuando la gota está en movimiento (quizás una suposición a cilíndricos fuese más apropiada). Así, como ocurre con la temperatura de la gota, se tomará un valor característico de toda la distribución alrededor de la gota, para cada una de las magnitudes mencionadas. Esta hipótesis se adopta para poder establecer el equilibrio másico en la interfase en un único punto como representativo de toda la superficie de la gota. En lo que respecta a la difusión de masa e intercambio convectivo, no afectará nada, pues se tomarán correlaciones experimentales que se expresarán de una manera global para toda la gota.
- Transferencia radiante despreciable. En la ecuación de la energía de la gota, no aparecerá el término del intercambio radiante. Esto se corresponde con los sistemas de enfriamiento que se estudiarán, en los cuales el intercambio radiante no juega un papel relevante.

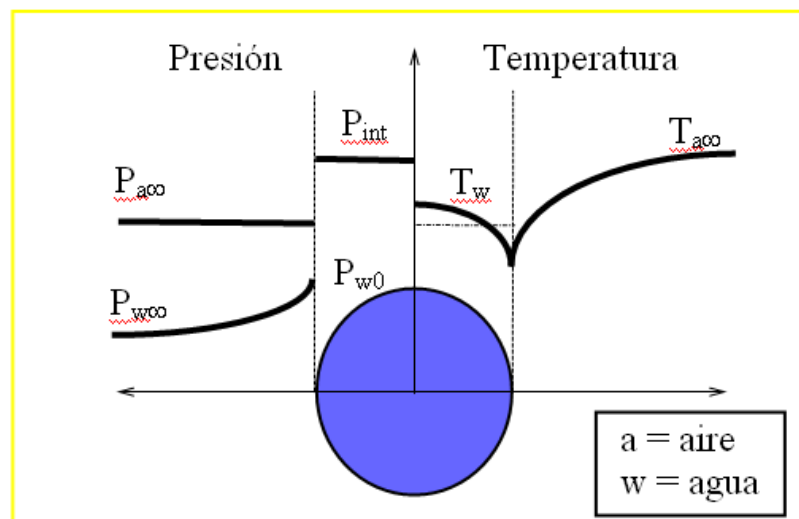


Figura 8. Campos de presión y temperatura.

ECUACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

Aplicaremos *Fuerza = Masa x Aceleración*, la 2º Ley de Newton.

- Fuerza de la gravedad $F_g = M \cdot g$

M masa de la gota

g aceleración de la gravedad

- Fuerza de flotabilidad $F_f = \rho \cdot V \cdot g$

ρ densidad del aire

V volumen de la gota

- Fuerza de fricción $F_k = f \cdot A \cdot k$

f factor de fricción

A área frontal de la gota

K energía cinética asociada a la gota

Resultando:

$$F_g + F + F_k = M \cdot a$$

a aceleración de la gota

Sustituyendo:

$$M = \rho_l \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

ρ_l densidad del agua

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Teniendo en cuenta la dirección de estas fuerzas, flotabilidad y gravedad son las únicas en vertical (nuestra referencia, eje y), y la fuerza de rozamiento opuesta a la velocidad, podemos descomponer:

$$F_{kx} = F_k \cdot \frac{v_x}{v}$$

$$F_{ky} = F_k \cdot \frac{v_y}{v}$$

Resumiendo, las ecuaciones en x e y quedan:

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{3}{8} f \frac{v \cdot v_x}{r} \frac{\rho}{\rho_l}$$

$$\frac{dv_y}{dt} = g \left(\frac{\rho}{\rho_l} - 1 \right) - \frac{3}{8} f \frac{v \cdot v_y}{r} \frac{\rho}{\rho_l}$$

Si se supone que no disminuye de tamaño, que no se evapora, se podría obtener la trayectoria de la gota, partiendo de una posición y una velocidad inicial, integrando estas ecuaciones.

Destacar de la ecuación en el eje y la forma y contenido de la misma. Por un lado el término gravitarlo y la flotabilidad que harán que la gota se acelere y caiga más rápidamente. Por otro, la fuerza de rozamiento, que hará que disminuya su velocidad. Pasa un cierto tiempo, la velocidad de la gota no variará, al igualarse estos dos términos. Esta velocidad se denomina velocidad terminal de caída, y es a la que tenderá la gota en su movimiento vertical. La única variable de la velocidad terminal y del tiempo en alcanzarla es el radio de la gota. Su valor, se obtiene igualando las fuerzas comentadas:

Para ello necesitamos el valor del factor de fricción el cuál mediante la correlación propuesta por Gauvin y Torobin para una esfera, válida para número de Reynolds menores de 200, se puede expresar:

$$f = \frac{24}{\text{Re}} \cdot (1 + 0.15 \cdot \text{Re}^{0.687})$$

$$V_{\text{terminal}} = \frac{2 \cdot r_g^2 \cdot \rho_l \cdot g \cdot (1 - \rho/\rho_l)}{9 \cdot \mu \cdot (1 + 0.15 \cdot \text{Re}_{\text{terminal}}^{0.687})} \quad \text{con} \quad \text{Re}_{\text{terminal}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot r_g \cdot v_{\text{term}}}{\mu}$$

Al variar con el radio, para micronización esta velocidad tiene poco sentido, pero en el caso de pulverizadores, el tamaño de las gotas, nos va a dar una buena aproximación de la relación espacio-tiempo de las mismas.

ECUACIÓN DE BALANCE DE MASA

Se planteará la ecuación de balance de masa sobre la superficie de la gota mediante la ecuación de transporte de masa. Se supondrá nula la solubilidad del aire en agua ($W_B = 0$). De esta manera para toda la superficie de la gota se cumplirá:

$$W_A = \rho \cdot K_y \cdot S \frac{Y_{A0} - Y_{A\infty}}{1 - Y_{A0}}$$

W_A agua evaporada por unidad de tiempo

K_y coeficiente global de transferencia de masa

S superficie exterior de la gota

Y_A fracción másica de vapor (Y_{A0} interfase / $Y_{A\infty}$ en el aire)

Por conservación de la masa, se reflejará este transporte en una reducción del radio de la gota:

$$W_A = -\rho_l \cdot S \cdot \frac{dr}{dt}$$

Igualando ambas expresiones:

$$\rho_l \cdot \frac{dr}{dt} = -\rho K_y \frac{Y_{A0} - Y_{A\infty}}{1 - Y_{A0}}$$

Mientras que exista esa diferencia de concentración entre la humedad absoluta de la interfase y la del aire no perturbado, la gota seguirá reduciendo su tamaño, ocurrirá este fenómeno de evaporación. Ese gradiente existirá siempre que el aire no esté saturado (suponiendo que la gota ha alcanzado la temperatura de equilibrio), en cuyo caso la gota no disminuirá de tamaño.

ECUACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA

En un balance global sobre toda la gota evaluaremos los intercambios energéticos:

- Transferencia convectiva. Intercambio de energía entre la gota y el aire debido a la diferencia de temperaturas entre ambos.

$$E_c = A \cdot h \cdot (T_\infty - T)$$

A superficie exterior de la gota h coeficiente de película

- Transferencia evaporativa. La evaporación de la gota precisa de una determinada energía (Calor latente de evaporación).

$$E_v = -W_A \cdot H$$

W_A agua evaporada por unidad de tiempo

H calor latente de vaporación del agua

- Energía de la interfase. Debido a la tensión superficial hay una energía asociada a la interfase de separación entre los medios. Al disminuir el radio de la gota, la superficie de separación será menor y por lo tanto disminuirá la energía asociada a la interfase.

$$E_i = -8 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho_l \cdot r} W_A$$

σ tensión superficial

- Energía de compresión. Al disminuir el radio, debido a la tensión superficial, aumentará la presión en el interior de la gota, lo cuál lleva aparejado una energía.

$$E_p = \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{-2 \cdot \sigma}{3 \cdot \rho_l \cdot r} W_A$$

- Otro término es el correspondiente a la disipación viscosa.

Para los tamaños de gotas que se manejan ($10\mu\text{m}$: 1mm) los términos energéticos asociados a la tensión superficial se pueden despreciar frente a los términos convectivos y evaporativos. Los términos asociados a la tensión superficial son más importantes cuanto menor sea el radio de la gota, así por ejemplo, para una gota de $0.1\mu\text{m}$ de diámetro los términos energéticos asociados a la tensión superficial suponen un 0.35% del término evaporativo. Lo comentado es aplicable a la disipación viscosa.

Planteando la ecuación del balance de energía en la gota:

$$M_g \cdot C_{p_g} \cdot \frac{dT_g}{dt} = E_e + E_c$$

Se observa que el término evaporativo tiene a disminuir la temperatura de la gota, mientras que el término convectivo hará que la temperatura de ésta aumente. Se alcanzará así pues una temperatura de la gota de equilibrio en la que los términos evaporativo y convectivo se contrarrestarán, es decir, el calor latente de vaporización necesario para la evaporación será justo el que se esté absorbiendo del ambiente por la diferencia de temperaturas entre fases, como ya se comentó.

Sustituyendo:

$$M_g \cdot C_{p_g} \cdot \frac{dT_g}{dt} = h \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (T_\infty - T_g) - \rho \cdot K_y \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot \frac{Y_{A0} - Y_{A\infty}}{1 - Y_{A0}} H$$

Igualando a cero el término de la derecha de la expresión anterior, se puede calcular a la temperatura de equilibrio (T_{eq}):

$$\frac{dT_g}{dt} = 0 \quad 0 = h \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot (T_\infty - T_{eq}) - \rho \cdot K_y \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot \frac{Y_{A0} - Y_{A\infty}}{1 - Y_{A0}} H$$

$$T_{eq} = T_\infty - \rho \frac{K_y}{h} \cdot \frac{Y_{A0} - Y_{A\infty}}{1 - Y_{A0}} \cdot H$$

Dadas unas condiciones de aire exterior (T_∞ y $Y_{A\infty}$) existe un solo valor de T_{eq} y es la temperatura de bulbo húmedo del aire en esas condiciones. Por tanto, transcurrido un tiempo la gota alcanzará una temperatura de equilibrio igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

ECUACIONES ADIMENSIONALES

Se van adimensionalizar las ecuaciones anteriores para poder establecer las dependencias funcionales, así como evaluar los distintos coeficientes de transferencia (f , h , K_y)

En general, las correlaciones para la determinación de los mismo están hechas de forma adimensional de forma que las relaciones serán lo más generales y simplificadas posible.

Las variables adimensionales que se adoptarán serán:

- $\xi = \frac{r}{r_i}$ radio adimensional
- $\mathcal{G} = \frac{T - T_{bh}}{T_i - T_{bh}}$ temperatura adimensional
- $\tau = \frac{t}{t_0}$ tiempo adimensional

$$t_0 = \frac{\rho_l \cdot r_i^2}{2\rho \cdot D_{AB} \cdot \gamma_{bh}}$$

Tiempo característico de evaporación de la gota, lo que tardaría en evaporarse la gota suponiendo en toda su evolución velocidades relativas nulas y temperatura constante e igual a la temperatura de bulbo húmedo en todo el tiempo de evolución (integrando la ecuación de conservación de la masa con $T = T_{eq}$ y $v = 0$ desde $r = r_o$ hasta $r = 0$)

- $V_x = \frac{v_x}{v_{term}}$ velocidad adimensional en eje x

- $V_y = \frac{v_y}{v_{term}}$ Velocidad adimensional en eje y
- $\gamma = \frac{Y - Y_\infty}{1 - Y}$ Parámetro adimensional de la fracción másica

Introduciendo las variables adimensionales en las ecuaciones de cantidad de movimiento:

$$\frac{v_{term}}{t_0} \cdot \frac{dV_x}{d\tau} = \frac{-3}{8} f \frac{v \cdot v_{term} \cdot V_x}{r_i \cdot \xi} \frac{\rho}{\rho_l}$$

$$\frac{v_{term}}{t_0} \cdot \frac{dV_y}{d\tau} = g \left(\frac{\rho}{\rho_l} - 1 \right) - \frac{3}{8} f \frac{v \cdot v_{term} \cdot V_y}{r_i \cdot \xi} \frac{\rho}{\rho_l}$$

Agrupando términos y sustituyendo t_0 :

$$\frac{dV_x}{d\tau} = \frac{-3}{8} f \frac{v \cdot \rho_l \cdot r_i}{2 \cdot \rho \cdot D_{AB} \cdot \gamma_{bh}} \frac{V_x}{\xi} \frac{\rho}{\rho_l}$$

$$\frac{dV_y}{d\tau} = \frac{\rho_l \cdot r_i^2 \cdot g}{2 \rho \cdot D_{AB} \cdot \gamma_{bh} \cdot v_{term}} \left(\frac{\rho}{\rho_l} - 1 \right) - \frac{3}{8} f \frac{v \cdot \rho_l \cdot r_i}{2 \cdot \rho \cdot D_{AB} \cdot \gamma_{bh}} \frac{V_y}{\xi} \frac{\rho}{\rho_l}$$

Introduciendo los números:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Sc} = \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}}$$

$$\frac{dV_x}{d\tau} = \frac{-3}{8} f \frac{1}{4} \text{Re} \cdot \text{Sc} \cdot \frac{V_x}{\xi^2} \frac{1}{\gamma_{bh}}$$

$$\frac{dV_y}{d\tau} = \frac{Sc}{4 \cdot \gamma_{bh}} \left[\frac{2 \cdot \rho_l \cdot r_i^2 \cdot g}{\mu \cdot v_{term}} \left(\frac{\rho}{\rho_l} - 1 \right) + \frac{3}{8} \cdot f \cdot \text{Re} \cdot \frac{V_y}{\xi^2} \right]$$

Adimensionalizando la ecuación de balance de masa:

$$\frac{\rho_l \cdot r_i}{t_0} \frac{d\xi}{d\tau} = -\rho \cdot K_y \cdot \gamma$$

Agrupando términos e introduciendo el valor de t_0 :

$$\frac{d\xi}{d\tau} = -\frac{\rho \cdot K_y \cdot r_i}{2 \cdot \rho \cdot D_{AB} \cdot \gamma_{bh}} \cdot \gamma$$

Introduciendo el número de Sherwood, se tiene:

$$Sh = \frac{K_y \cdot D}{D_{AB}}$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{-1}{4 \cdot \xi} \cdot Sh \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{bh}}$$

Haciendo lo mismo con la ecuación de la energía:

$$\frac{\rho_l \cdot Cp \cdot (T_i - T_{bh})}{t_0} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = 3 \cdot \frac{h}{r} \cdot ((T_\infty - T_{bh}) - (T_i - T_{bh}) \cdot \theta) - 3 \cdot \frac{\rho \cdot K_y \cdot H}{r} \cdot \gamma$$

Agrupando términos e introduciendo el valor de t_0 :

$$\frac{d\mathcal{G}}{d\tau} = \frac{3h}{r} \cdot \frac{r_i^2}{2 \cdot \rho \cdot D_{AB} \cdot \gamma_{bh} \cdot Cp} \cdot (\mathcal{G}_\infty - \mathcal{G}_0) - \frac{3 \cdot K_y \cdot H \cdot r_i^2}{2 \cdot r \cdot Cp \cdot (T_i - T_{bh}) \cdot D_{AB}} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{bh}}$$

Introduciendo los números de Sherwood, Nusselt y Lewis:

$$Nus = \frac{hD}{k} \quad Le = \frac{Sc}{Pr} \quad Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k}$$

$$\frac{d\mathcal{G}}{d\tau} = \frac{3}{4 \cdot \xi^2} \cdot \left(\frac{Nu \cdot Le}{\gamma_{bh}} \cdot \frac{Cp_a}{Cp} \cdot (\mathcal{G}_\infty - \mathcal{G}_0) - Sh \cdot \frac{H}{Cp \cdot (T_i - T_{bh})} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{bh}} \right)$$

Se puede ver que en el caso de que la temperatura inicial de la gota sea la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura adimensional no estará bien definida. En ese caso lo que ocurre es que la temperatura de la gota no evoluciona ya que desde un principio tiene la temperatura de bulbo húmedo que coincide con la temperatura de equilibrio. En este caso la ecuación de la energía, que es la única en la que existe la indeterminación, no es necesario su integración pues se convierte en $\frac{dT}{dt} = 0$, y por tanto $T = T_0 = T_{bh}$.

A modo de recopilatorio:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{-1}{4 \cdot \xi} \cdot Sh \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{bh}}$$

$$\frac{dV_x}{d\tau} = \frac{-3}{8} f \frac{1}{4} Re \cdot Sc \cdot \frac{V_x}{\xi^2} \frac{1}{\gamma_{bh}}$$

$$\frac{dV_y}{d\tau} = \frac{Sc}{4 \cdot \gamma_{bh}} \left[\frac{2 \cdot \rho_l \cdot r_i^2 \cdot g}{\mu \cdot v_{term}} \left(\frac{\rho}{\rho_l} - 1 \right) + \frac{3}{8} \cdot f \cdot Re \cdot \frac{V_y}{\xi^2} \right]$$

$$\frac{d\vartheta}{d\tau} = \frac{3}{4 \cdot \xi^2} \cdot \left(\frac{Nu \cdot Le}{\gamma_{bh}} \cdot \frac{Cp_a}{Cp} \cdot (\vartheta_\infty - \vartheta_0) - Sh \cdot \frac{H}{Cp \cdot (T_i - T_{bh})} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{bh}} \right)$$

- Variable independiente: τ (tiempo)
- Variables dependientes: $\varepsilon, v_x, v_y, \vartheta$ Son las variables que definen el estado de la gota en cada instante: radio, velocidades, temperatura y posición.
- Propiedades físicas: $\mu, \rho, Cp, \rho_g, Cp_g, D_{AB}, H$. En el intervalo de temperaturas en el que trabajamos se consideran constantes.
- Coeficientes de transferencia: f, h, K_y Los coeficientes de transferencia se evalúan según las correlaciones experimentales:

$$f = \frac{24}{Re} \cdot (1 + 0.15 \cdot Re^{0.687})$$

$$K_y \text{ se despeja de } Sh = 2 + 0.6 \cdot Re^{1/2} Sc^{1/3}$$

$$h \text{ se despeja de } Nus = 2 + 0.6 \cdot Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

- Condiciones de contorno en el infinito (aire): $Y_{A\infty}$ T_{∞} Están definidos por las condiciones del aire.
- Condiciones de contorno en la superficie de la gota: Y_{A0} La humedad absoluta se evalúa en la superficie de la gota como la correspondiente presión de vapor a la temperatura de la gota. Para la presión de vapor se usa la correlación polinómica basada en datos experimentales, válida para temperaturas $273 \text{ K} < T < 323 \text{ K}$
- Condiciones iniciales: $\xi = 1$ v_{x0} v_{y0} $\mathcal{G} = 1$

El problema queda definido y cerrado, su solución será obtenida mediante el método de Runge-Kutta de 2º orden, puesto que la trayectoria está desacoplada, no se va a tener en cuenta, además la información que puede aportarnos no es relevante en nuestra aplicación.

2.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El objeto de este estudio es la determinación de cómo influyen los diferentes parámetros que intervienen en el problema, en la evolución de la gota, y en los resultados que se esperan de ellas. De esta manera se podrán descartar ciertas variables porque no intervengan en el problema o porque su influencia sea prácticamente nula, para posteriormente el estudio de sprays.

Además de la resolución por Runge-Kutta a través del programa MATLAB, se va a realizar el mismo estudio usando el CFD FLUENT alternando resultados, de esta manera se podrá ver la sensibilidad de ambos métodos de resolución y afinar los modelos CFD para después implementar sprays y ambientes.

Características iniciales de las gotas

Los parámetros principales de las gotas serán su diámetro inicial, su temperatura inicial y su velocidad/dirección de salida del dispositivo.

Diámetro Inicial

El análisis de este parámetro se hará a partir el tiempo de evaporación, este marcará el comportamiento de la gota en el ambiente: en primer lugar alcanzará la temperatura de equilibrio de ese ambiente y después comenzará a evaporarse.

En cualquier caso, las condiciones del aire ambiente serán fundamentales y requerirán un estudio individual, por eso ahora fijaremos el ambiente a 30 °C y 30 % de

humedad relativa determinan el nivel térmico mínimo que pueden alcanzar las gotas y que coincide con la temperatura del bulbo húmedo.

Tiempo de evaporación

Se analizará su evolución para diferentes diámetros, estudiando la relación entre el diámetro de la gota en cada instante y el inicial con respecto al tiempo, fijando la temperatura inicial de la gota a 30 °C.

Si se representa en forma logarítmica se puede observar un orden de magnitud para *estos tiempos de evaporación al variar el diámetro*.

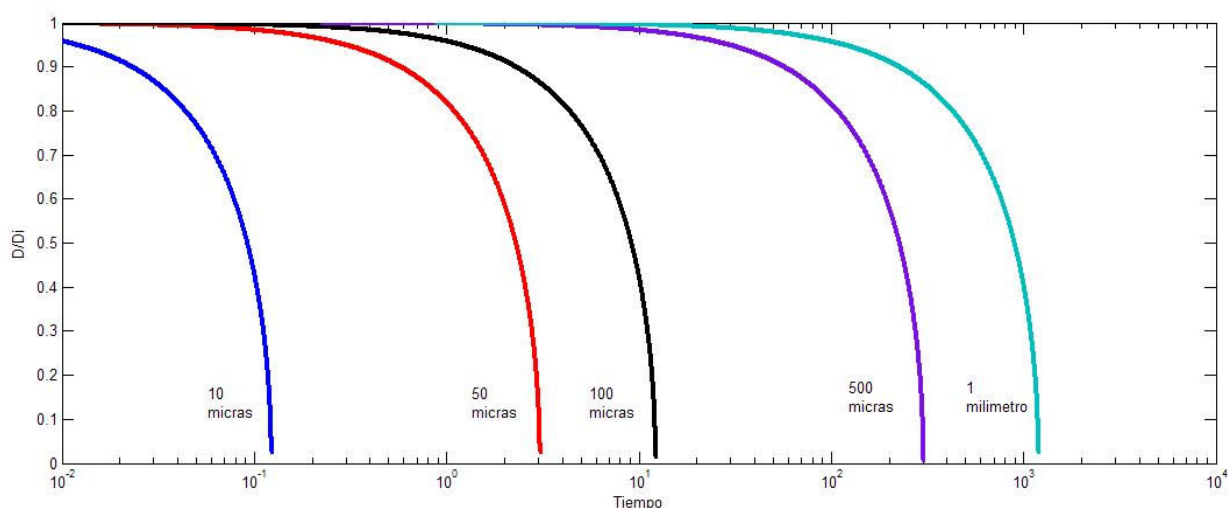


Figura 9. Evolución del diámetro de la gota normalizado con respecto al tiempo para un ambiente a 40 °C y 30 % de humedad relativa.

Esta gráfica ilustra que el tiempo de vida aumenta con el diámetro más que proporcionalmente con el diámetro, proporcional al cuadrado del radio (estudio de órdenes de magnitud en las ecuaciones).

Además para tamaños mayores de 50 micras requieren grandes tiempos para evaporarse, y hablar de grandes tiempos es hablar de distancias, por lo que su uso en micronización quedará descartado.

La relación espacio-tiempo, se realizará a través de la velocidad terminal, ya que la gota la mayor parte de su vida viajará a esa velocidad.

Incluso el siguiente epígrafe ya queda representado en la gráfica, desde que la gota es lanzada hasta que comienza a reducir su tamaño pasan unos segundos, admirables en el primer tramo horizontal al inicio, ese tiempo es el que consume para ponerse a temperatura de bulbo húmedo.

Se puede establecer una primera clasificación atendiendo a este parámetro:

Gotas Micronizadas

En el diseño de un sistema de tratamiento de aire basado en micronizadores el objetivo principal consiste en conseguir un tamaño de gotas tal que estas se evaporen completamente antes de llegar al plano de ocupación, o dicho en otros términos, para un tamaño de gotas determinado, se trata de producir la micronización a una distancia que permita que las gotas se evaporen completamente.

A título de ejemplo, si la altura a la que se encuentran los micronizadores es tal que las gotas emplean un segundo desde que abandonan el micronizador hasta que el plano de ocupación, para garantizar la total evaporación, el radio de las gotas debería ser del orden de $15 \mu m$ (suponiendo un ΔT realista de $10^\circ C$). En el mercado existen micronizadores que producen gotas de tamaño inferior a $10 \mu m$, con lo que se demuestra la viabilidad técnica del proceso descrito.

Gotas Pulverizadas (“Duchas-Water Sprinkler”)

Una de las condiciones fundamentales para el diseño adecuado de un sistema de pulverización de agua consiste en conseguir que las gotas, durante el tiempo que están en contacto con el aire, experimenten un enfriamiento apreciable.

Temperatura inicial de la gota

Usaremos ahora nuestro modelo FLUENT que nos permite inyectar cinco gotas a diferente temperatura pero con el resto de parámetros similares de una manera sencilla. Para ello fijaremos el diámetro de la gota a 30 micras.

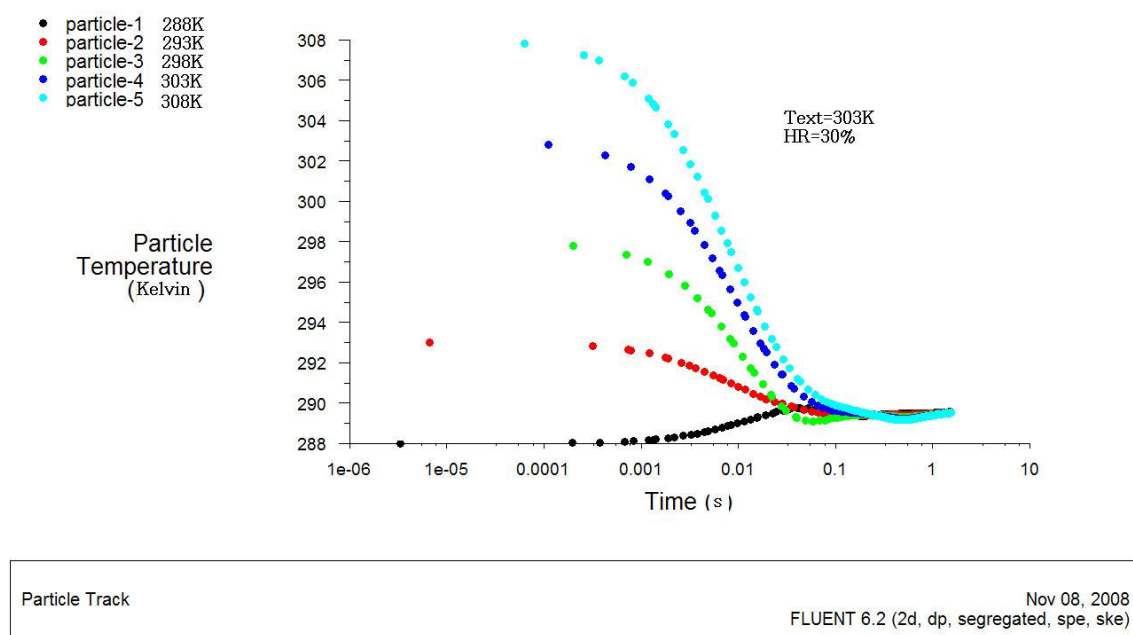


Figura 10: Evolución en FLUENT de la temperatura de la gota con el tiempo.

En la gráfica se muestra el comportamiento de cinco gotas diferentes, caracterizadas en la zona izquierda superior con cinco temperaturas diferentes, desde 15 °C hasta 35°C de temperatura inicial.

La conclusión es clara: la temperatura inicial de la gota tiene una influencia despreciable. El ambiente a 30°C y 30 % de humedad relativa, fija la temperatura de bulbo húmedo en 290 K, todas las gotas evolucionan en aproximadamente un segundo a esa temperatura.

Por lo cuál, se elimina esa concepción de que si se inyecta agua fría el proceso es más rápido y eficiente.

Velocidad Relativa (Velocidad inicial y ángulo de salida del inyector)

En todos los casos anteriores se han analizado los distintos parámetros tomando una velocidad relativa aire-gota nula. Esto permitió en su momento simplificar las ecuaciones, pero en la mayoría de los casos no es estrictamente correcta la suposición de velocidad nula. Estudiar la velocidad relativa es analizar la velocidad de salida del inyector que es cuando mayor diferencia de este parámetro podemos encontrar.

En primer lugar, para el caso de micronización, la velocidad relativa es un parámetro despreciable ya que el tiempo de evaporación no va a variar significativamente y la variación de los coeficientes de transferencia es muy pequeña.

El caso de pulverización es bien diferente, la velocidad terminal y el tiempo de frenado son mayores a medida que aumenta el diámetro. Al ser mayor el tamaño el número de Reynolds tendrá más influencia. Por esta razón, a la hora de instalar estos sistemas de pulverización se debe tener en cuenta la trayectoria si se quiere que no incidan sobre superficies, ya que tanto la velocidad de salida como el ángulo jugarán un papel importante en el recorrido de las mismas.

En ambos casos, el hecho de que exista velocidad de aire favorece en gran medida el proceso de enfriamiento, una guía básica de diseño es pues el favorecer un movimiento de aire aunque sea ligero. De esta forma, no solo se consigue un mayor enfriamiento de la gota, si no que se garantiza la utilización efectiva del aire enfriado y la continuidad del proceso.

CONDICIONES EXTERIORES

Se estudiará por último el comportamiento de las gotas en ambientes de temperatura y humedad distintos.

Se ha optado por intentar simular un verano en dos lugares diferentes, un primer caso en los países del Sur de Europa A1 y un segundo caso en un clima más del norte de Europa A2. Así con gotas de 30 micras tendremos dos casos:

- Caso A1: $T_{ext} = 40^{\circ}C$ $\omega_{ext} = 0.012$ (HR=25%)
- Caso A2: $T_{ext} = 30^{\circ}C$ $\omega_{ext} = 0.015$ (HR=60%)

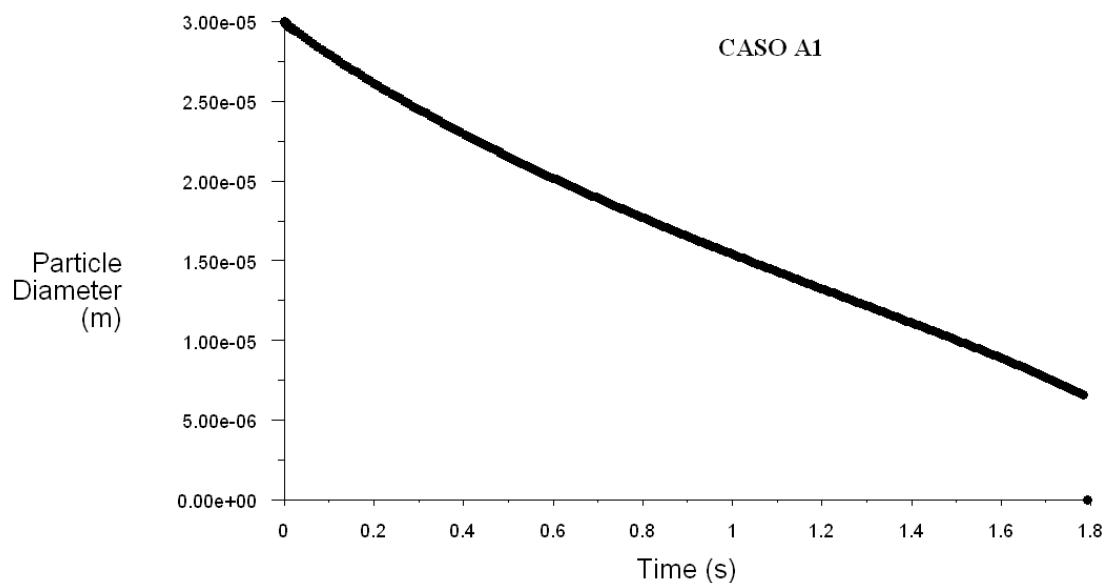


Figura 11. Evolución del diámetro de una gota de 30 micras en Fluent caso A1

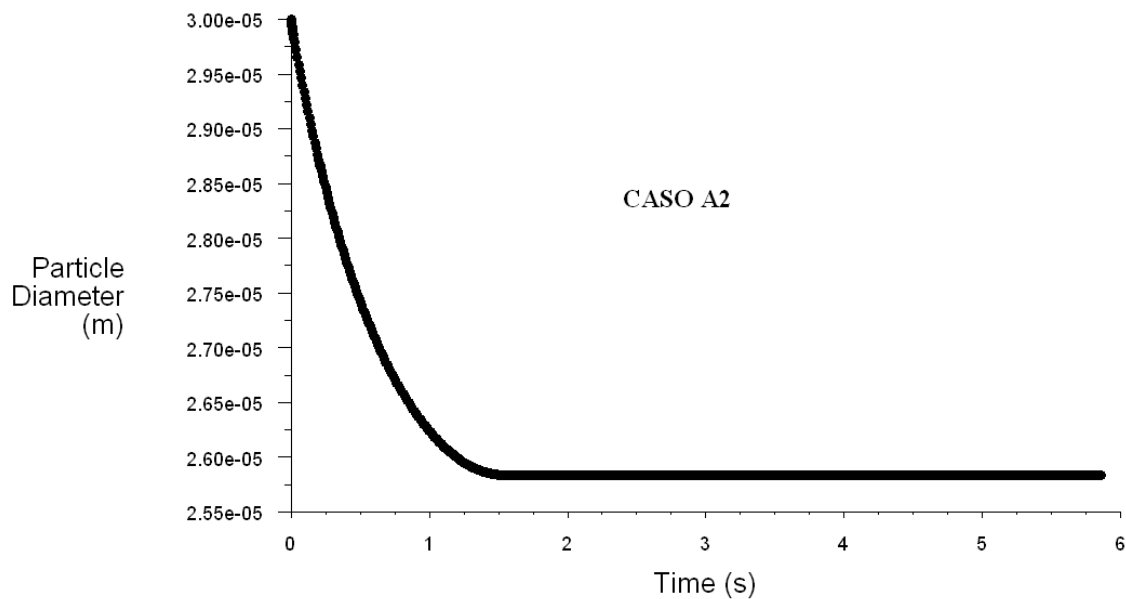


Figura 12. Evolución del diámetro de una gota de 30 micras en Fluent caso A2

Como cabía de esperar el comportamiento de la gota es radicalmente distinto en ambientes húmedo y en ambientes secos. La gota penetra más en ambientes en donde la humedad relativa es mayor, resultado este lógico ya que al ser el gradiente de concentraciones entre la superficie de la gota y el aire exterior menor se producirá una menor evaporación y por tanto el radio de la gota disminuye más lentamente que en el caso de aire seco (A1), en la gráfica del caso A2, se puede ver como se va evaporando hasta que el aire exterior se satura, esto es porque es un ambiente cerrado el estudiado, pero la conclusión es que en casi el mismo tiempo que antes se evaporaba por completo ahora pasa a tener un diámetro de 25 micras.

2.5. CONCLUSIONES

- El comportamiento de la gota varía acusadamente con el diámetro de la misma. Por lo que se hace esa clasificación de micronización (diámetros menores de 60 micras) y pulverización (diámetros mayores), de esta manera acotamos la aplicabilidad de estas técnicas.
- En el caso de micronización, tanto el ángulo de salida como la velocidad de inyección no tiene apenas influencia en el comportamiento de la gota y tan sólo en el caso de pulverización podría ser importante para evitar goteo.
- La temperatura inicial no tiene una influencia relevante, tan solo en instantes iniciales marcará un transitorio
- Las condiciones del aire exterior son el parámetro más importante en la vida de la gota. Esto sistemas funcionan muy mal en ambiente húmedos.

3. SPRAY

3.1. PRESENTACIÓN

En el presente capítulo se van a tratar los aspectos relacionados con la implementación de modelos de sprays en el programa CFD FLUENT (Computal Flow Dynamics Fluent).

Tras la realización del estudio de gotas aisladas, es momento de integrar conjuntos completos de las mismas, para poder crear modelos simplificados que después permitan incorporar esta tecnología al sistema de refrigeración de un edificio convencional a través del programa de prediseño AirFlow (PHDC

3.2. TECNOLOGÍA ASOCIADA

Sprays es la dispersión de partículas creada por atomizadores, que transforman una masa de líquido en una distribución física de pequeñas partículas en una atmósfera gaseosa. Los sprays se caracterizan por: un tamaño representativo de las partículas que lo forman, un caudal vehiculado y una presión de trabajo. De esta manera podemos establecer dos tipos: los micronizadores (gotas de tamaños inferiores a 60 micras) y los sprinkler (ó duchas, con tamaños superiores).

Un atomizador ideal debe conseguir una buena atomización en un amplio rango de velocidades de flujo, con una respuesta rápida a los cambios de dicha velocidad.

Los atomizadores se caracterizan por una gran velocidad relativa entre el líquido y el aire circundante, pudiéndose clasificar en función del método utilizado para lograr esta alta velocidad, como:

- Atomizadores de presión
- Atomizadores de rotación
- Atomizadores de doble fluido
- Atomizadores electrostático
- Atomizadores ultrasónicos

Los atomizadores más utilizados son los de presión, que transforman la presión en energía cinética. Dentro de este tipo los más usuales son los atomizadores simples y dúplex.

Los atomizadores símplex, tiene una cámara de turbulencia previa al orificio de salida, lo que le proporciona una gran velocidad angular que origina un vórtice en el flujo. De esta forma el líquido sale del atomizador con forma cónica, con un ángulo de apertura entre 30° y 180° pudiendo ser los conos huecos o sólidos.

Los atomizadores dúplex, son análogos al símplex pero con dos conjuntos de conductor tangenciales, uno primero para bajos caudales y el otro secundario para grandes flujos.

En este capítulo se pretende simplificar tanto el dispositivo como el resultado de su funcionamiento, es decir, atomizador más spray darán lugar a una correlación, que será nuestro resultado, y la entrada a nuestro programa PHDC.

3.3. DEFINICIÓN DEL ESTUDIO

Este apartado va a ser fundamental en el desarrollo del estudio de este bloque, puesto que sentará las bases de nuestro modelo e incluso marcará las líneas de análisis más importantes.

El primer punto a tratar es la modelización del dispositivo que creará los sprays, es decir, el inyector. Se va a modelizar como un elemento puntual, en el modelo CFD estableceremos unas condiciones de contorno en un punto del mismo, es condiciones de contorno serán las siguientes:

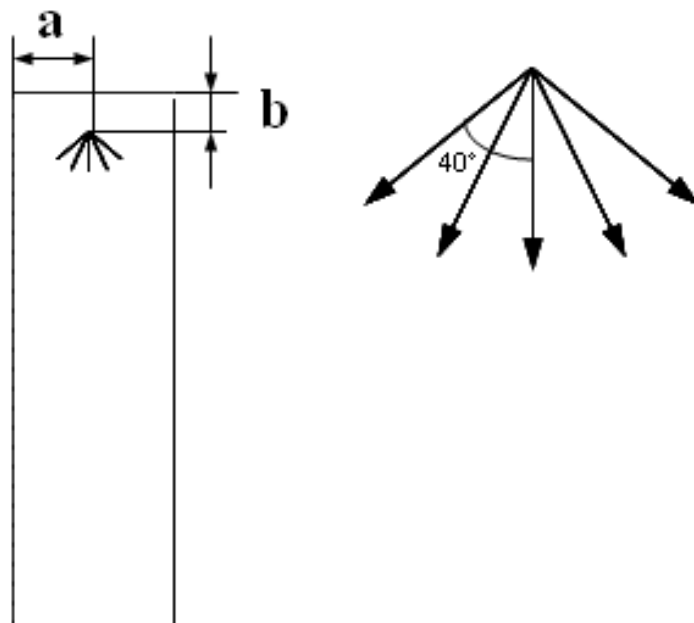


Figura 13. Esquema simplificado de una impulsión de agua.

- Posición (m): Las variables a y b, fijarán la posición del mismo dentro de la torre.
- Ángulo de apertura (°): Fijado a un valor de 40°, establece cuál será el tamaño del spray.
- Número de trayectorias: Se elegirá un valor de cinco, debido a que es un número óptimo, en el que coinciden la mayoría de los autores, para caracterizar en detalle todo el comportamiento del penacho creado
- Velocidad de salida (m/s): Es otro parámetro importante en el inyector como ya se comentó, puesto que marcará el movimiento inicial de la gota, antes de que adopte la velocidad de sedimentación (véase bloque Gota Aislada).
- Diámetro Inicial (micras): Al igual que en gotas aisladas, será el parámetro característico del Spray. Conceptualmente “diámetro de gota” hace referencia al diámetro medio de Sauter, es decir, asemejar las gotas a esferas con un diámetro tal, que se conserve la relación volumen/superficie de las gotas.
- Caudal de agua (L/h): Es primordial en el fin que se busca, simplemente teniendo en cuenta el equilibrio de masa y energía ya comentando, todo el agua que se evapora pasa al aire enfriándolo, cuánta más se inyecte (siempre que el aire no esté saturado, ya que cuando alcance saturación no se evaporará más), mayor poder refrigerante se tiene.
- Temperatura del agua (°C): Se ha visto en el bloque anterior, que es una variable poco significativa, ya que el agua tiende al equilibrio térmico que le establece el aire, es decir, a la temperatura de bulbo húmedo, pero servirá para que el programa calcule las propiedades del agua.

Una vez definido el dispositivo, lo siguiente es modelar el experimento. Para ello haremos una importante distinción entre micronizadores y duchas, diámetros menores de 60 micras serán considerados micronizadores. En este punto, el estudio se divide en dos, con un planteamiento parecido pero diferente en algunos puntos.

3.4. MODELO CFD

3.4.1. DEFINICIÓN

En este punto se exponen toda información necesaria para la correcta comprensión del modelo CFD creado, ya que en capítulos posteriores se usará como una herramienta más.

De un modelo 3D, rápidamente se pasa a un 2D, debido a que la torre es un prima cuadrangular, lo que ocurre en una de las direcciones principales (coloreadas en azul y rojo en la vista en planta de la torre) es crítico y representativo para el resto de direcciones, por lo siguiente:

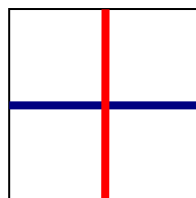


Figura 14. Esquema de coordenadas en la torre.

- En cuanto a la importancia de la trayectoria, básicamente en Water Sprinkler, por el posible choque (no deseable) con la pared, las direcciones principales seguirán siendo las más cercanas a esas paredes.
- La distribución de inyectores será siempre uniforme, es decir, se intentará aprovechar al máximo toda el área transversal de la torre, puesto que si no sería una integración mala que malgastaría espacio. Por lo que, por ejemplo, podríamos tener anillos concéntricos circulares (A) o bien distribuciones cuadrangulares (B).

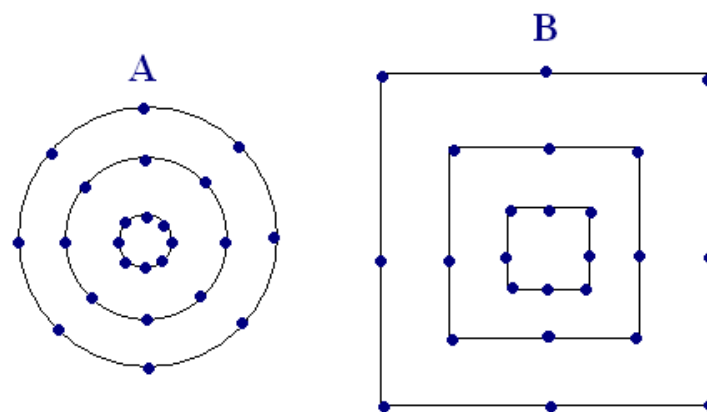


Figura 15. Ejemplos de disposición de inyectores.

En conclusión, el uso de un modelo 2D, define correctamente el problema y nos hace ser capaces de simular un comportamiento real con la máxima calidad, pudiendo optimizar la malla, lo que conducirá a mejores resultados.

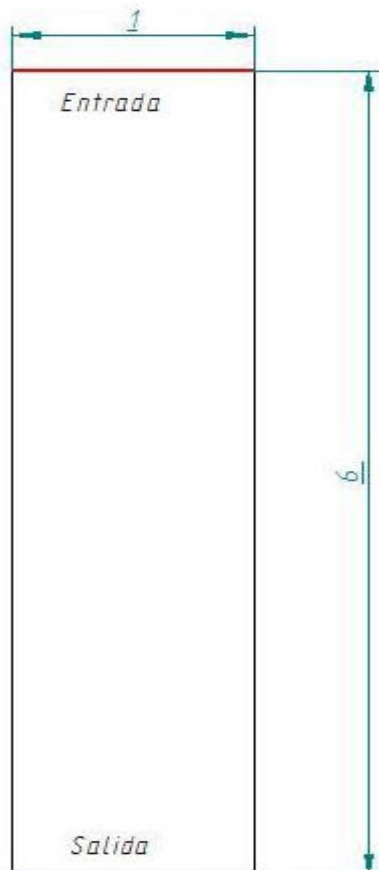
3.4.2. MODELIZACIÓN

Existirán dos zonas singulares en la torre que estarán fuera de este modelo.

Estas zonas serán la región de entrada y las de salida, o impulsión al local. La región de entrada, en el modelo aparecerá como una condición de contorno de flujo impuesto ya que siempre se situarán encima del disparo del agua y que como veremos en el siguiente capítulo, a la contribución mecánica se añade la posibilidad de colocar captadores de viento con un comportamiento totalmente definido.

En cuanto a las salidas, en el propio programa se tendrá en cuenta el tiro que se inducirá en cada planta como consecuencia de la importancia de la altura que exista desde el punto de inyección hasta el de salida del aire húmedo.

Resultando la siguiente geometría:



Se observa la forma cuadrangular de la torre con una altura de seis metros, que son aproximadamente dos plantas, y que para el tamaño de gotas que vamos a tratar en micronización y en las condiciones de ambiente más húmedo, va a ser suficiente para poder caracterizar el problema. En Water Sprinkler, como más adelante se observará este tamaño no será importante puesto que recurriremos a modelos matemáticos para el cálculo de las variables y corregiremos los mismos con los resultados del análisis CFD, por lo que esta altura será suficiente.

Figura 16. Cotas del modelo CFD de torre

Otro punto importante es la discretización de la torre, puesto que un mallado tan refinado como el que se le va a hacer, en una superficie requiere una discretización para poder extraer datos con los que trabajar. Para ello se recurre a una discretización como la que se muestra en la figura 15, en la que se representa medio metro de torre.

z/r	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
0.05						
0.1						
0.15						
0.2						
0.25						
0.3						
0.35						
0.4						
0.45						
0.5						

Figura 17. Discretización del modelo CFD de torre

Esta discretización, permite la definición de volúmenes para cada intervalo de de la coordenada Z (vertical) e X (horizontal). De esta manera se calculará cualquier variable como la integral en cada volumen (superficie en nuestro 2D, volumen si se considera por metro de profundidad). En principio, puede parecer bastante impreciso, pero a la vista de los resultados se podrá apreciar el acierto de esta decisión sobria, sencilla y eficaz, mediante el tratamiento de pequeños volúmenes.

Otro aspecto importante es el mallado, debido a que tanto a su ancho como a su largo la torre va a ser usada al máximo, salvo los metros finales en los que no va a ver evaporación, se va a recurrir por un mallado uniforme de una calidad fina, de alta precisión y aceptable velocidad de cálculo.

3.5. MICRONIZADORES

3.5.1. INTRODUCCIÓN

Este punto surge como un sub.-estudio dentro de los propios sprays. Irá separado dentro de los “Water Sprinkler” debido a que el tratamiento será totalmente diferente. En este caso, se analizarán situaciones ambientales que produzcan una evaporación total del caudal de agua inyectado, comprobándose los resultados depurados para situaciones críticas.

La diferencia con el siguiente caso radica en los resultados a extraer, además de la no influencia de la trayectoria al considerar que por su tamaño este tipo de gotas tendrán la suficiente distancia como para evaporarse por completo. Los resultados a exportar serán:

- Correlación de la altura de evaporación. Como se explicará, tiene una serie de dependencias tanto ambientales como de operación, así como de la tecnología, la cuál quedará reflejada en un factor que podrá ser pedido al usuario a fin de prediseñar el edificio con su propia tecnología.
- Correlación de la densidad media en el volumen de evaporación. Será el principal parámetro del tiro térmico, junto con la altura geométrica presente en la torre.

En todo momento se habla de Torre, pero no necesariamente tiene que tener la geometría de una torre, si no también puede ser una doble fachada, un atrio...

Por tanto, en este apartado se simulará el comportamiento de diferentes inyectores en ambientes muy variados, midiendo todas las variables necesarias para caracterizar completamente el suceso y poder simplificarlo.

3.5.2. ESTUDIO

Tras la evaluación del comportamiento de Gotas Aisladas, quedan definidas las principales variables de las que depende el comportamiento tanto de la gota como del ambiente, por tanto este estudio consistirá en variar esas variables fijando las restantes para poder encontrar una relación entre ellas y los resultados buscados.

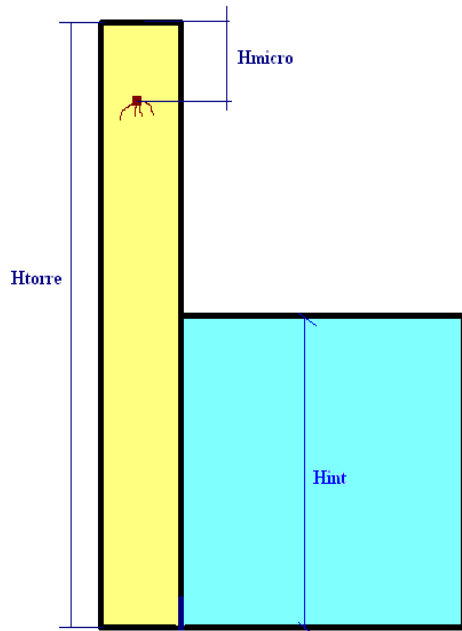
Se busca además, que estas correlaciones resultantes tengan un rango amplio, debido a que el programa de prediseño necesitará poder ofrecer a los usuarios enormes posibilidades.

Lo primero es definir cuáles serán los resultados a buscar y el porqué de los mismos.

- Correlación de la densidad media en el volumen de evaporación

El tiro invertido creado en la torre, obedecerá una ley como la siguiente, fundamentada en un equilibrio de presiones:

$$\Delta P_{g-imp} = (\rho_{ext} h_{micro} + \rho_{imp-m} (h_{torre} - h_{micro}) - \rho_{int} h_{int}) g$$



Siendo:

ρ_{ext} Densidad en condiciones exteriores

ρ_{int} Densidad en condiciones interiores

ρ_{imp-m} Densidad media en la torre

Figura 18. Modelo hipotético de un edificio con una torre de impulsión

En este caso la altura que se toma es la de la torre al completo, debido a que la salida está situada en la base, si estuviera situada más arriba debería considerarse solo esa altura disponible para el tiro.

Tras la resolución de los modelos matemáticos buscando órdenes de magnitud, se observa como las soluciones son de la forma exponencial, lo cuál, tras una cantidad de pruebas experimentales, conduce a una correlación para la densidad media en la zona de evaporación de la siguiente forma:

$$\ln(\rho_{imp-m}) = a + b \cdot \ln(T_{seca}^a - T_{wb}^a) + c \cdot \ln(Q_{aire}) + d \cdot \ln(Q_{agua})$$

- *a* Influencia de la tecnología usada en la micronización y el resto de variables constantes para todo proceso evaporativo.
 - *b* Dependencia de la densidad con el potencial evaporativo en ese ambiente, definido como la diferencia entre su temperatura seca y la húmeda.
 - *c* Refleja la variabilidad de la variable con el caudal de aire fluyente en la torre. Q_{aire} (kg/s)
 - *d* El caudal de agua inyectado Q_{agua} (kg/s) será una de las principales variables
-
- Correlación de la altura de evaporación

La necesidad de correlar esta variable, surge para satisfacer una necesidad de precisión, es decir, si tenemos una entrada de aire al edificio desde la torre en un lugar en el que no se ha evaporado todo el caudal de agua, en el tiro térmico solo se debería considerar esa altura, para ello se debe definir cuál es la altura de evaporación. Como muestra el siguiente esquema:

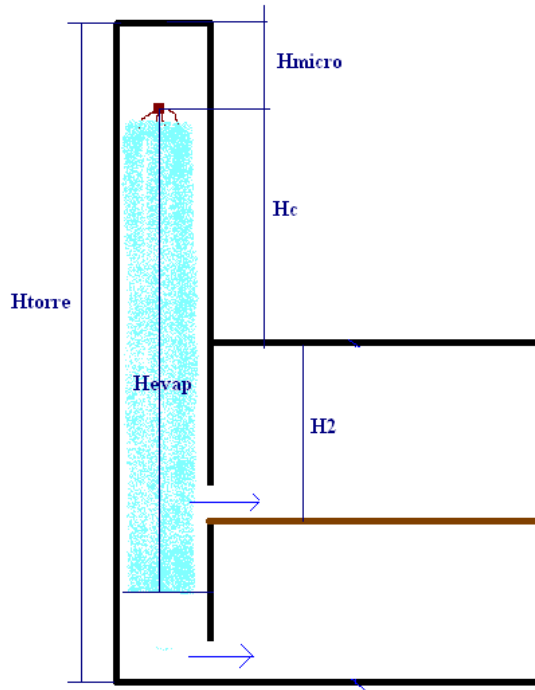


Figura 19. Edificio hipotético de dos plantas con sistema de micronización

En este caso el tiro inducido en la planta superior PS, tendría una forma como la que se muestra en la ecuación inferior:

$$\Delta P_{g-imp_PS} = (\rho_{ext} h_{micro} + \rho_{imp-m} h_c - \rho_{int} h_2) g$$

Por esta razón se debe calcular la altura de evaporación para saber en que condiciones estamos en cada planta y realizar un cálculo preciso del tiro térmico inducido en la misma.

Un razonamiento similar al anterior, conduce a la siguiente correlación:

$$\ln(h) = g + j \cdot \ln(T_{seca}^a - T_{wb}^a) + k \cdot \ln(Q_{aire}) + l \cdot \ln(Q_{agua})$$

Idénticas variables y dependencias que en el caso antes expuesto, pero con diferentes valores.

Esta correlación se calculará para un diámetro de gota de diez micras, creando a posteriori un factor de corrección para la variación de este parámetro. Además se creará otro factor corrector (sustituto del anterior) por si el fabricante en lugar de ofrecer al usuario el tamaño de gota, ofrece un resultado tal como la altura de evaporación del cincuenta por ciento del caudal de agua inyectado.

La correlación de estas dos variables definen totalmente el problema de micronización, por las consideraciones ya enunciadas y permiten la sustitución del mismo por un modelo simplificado, integrable en cualquier herramienta informática, que es el objetivo de este estudio.

El organigrama del estudio aparece detallado el anexo “Casos de Micronización” y cuyo resumen podría ser:

- Micronizador: Se variará el tamaño de las gotas y la disposición.

Tamaño: Variará el diámetro de las gotas, 10, 30 y 60 micras.

Disposición: Número de inyectores en la dirección principal estudiada.

- Clima: Temperatura y Humedad absoluta.

Estando centrado en las condiciones útiles para nuestro sistema de enfriamiento. Temperatura exterior de 30, 35 y 40 °C; y humedades de 8, 10 y 12 g agua / Kg de aire seco.

- Caudal de aire: Desde un valor nominal, variando entre 50%, 150% y 200%.

- Humedad Salida: Este parámetro será el indicador de eficiencia, ya que será la humedad relativa que lleve mi flujo de aire a la salida de la torre. 100, 78 y 60 % de humedad relativa.

Gracias al estudio de gota aislada previo, se sabe que la temperatura del agua, no influirá de manera significativa en el problema, ni su velocidad al salir del micronizador, ya que esto último marcará el origen de su trayectoria, pero será la velocidad de sedimentación la que rápidamente domine su movimiento.

$$V_{sed} = \frac{(\rho_{agua} - \rho_{aire})gD^2}{12\mu} \quad \text{Suponiendo Reynolds bajo, y aproximando } C_D \approx 64/Re$$

La sistemática será, fijar unos valores para todas las variables, salvo para la que se vaya a estudiar. Por ejemplo: para estudiar la influencia del tamaño, se selecciona una disposición de cuatro micronizadores, una temperatura exterior de 35°C, humedad de 10 g. agua/Kg aire seco, un caudal de aire dado, y una humedad relativa de salida de 78 %

(fijar la humedad de salida, es dar el caudal de inyección puesto que todo el agua se evapora al no alcanzarse la saturación); así se harán tres casos, para tamaños de 10 micras, 30 micra y 60 micras.

En el anexo “Resultados de Micronización”, se han presentado las gráficas más relevantes del estudio de sensibilidad, las cuales nos van a servir para tomar las siguientes conclusiones:

- El diámetro de gotas, será el principal factor del micronizador, el cuál será clave para el usuario de los mismos, ya que la disposición será fijada.
- El caudal de aire, será parte integrante de cualquier tipo de correlación, o función de una variable de salida.
- La temperatura y la humedad, estarán relacionadas por medio de la diferencia entre la temperatura seca y la temperatura de bulbo húmedo, para las condiciones de aire antes del evaporativo, y con las de ese mismo aire en condiciones de saturación, y ese será el motor del clima.
- La humedad relativa de salida, será un parámetro iterativo, que por medio de las ecuaciones de balance de masa y energía nos permitirán fijar el caudal de agua a manejar, ya que el enfriamiento se debe a la evocación de agua, y el incremento de humedad que sufra el aire es consecuencia del agua inyectada; por lo que definidas dos variables del aire (presión atmosférica) podemos conocer cualquier otra. El procedimiento sería:

$$M_{agua} \lambda = Q_{aire} C_p (T_{ext} - T_{imp})$$

Donde:

$$\lambda = 2500 \text{ kJ /kg}$$

$$C_p = 1 \text{ kJ /kg}\cdot\text{K}$$

$$Q = \text{caudal de aire en la torre [Kg/s]}$$

$$M_{agua} = \text{caudal de agua introducida [kg/s]}$$

$$\omega_{Humedad_Imp} = \omega_{Humedad_Entrada} + \frac{M_{agua}}{Q}$$

$$HR_{Imp} = f(T_{Imp}, \omega_{Humedad_Imp})$$

3.5.3. REGISTRO DE RESULTADOS

Para comprender los resultados presentes en el anexo “Resultados de Micronización”, se explican y se ponen de manifiesto los obtenidos para el caso referencia:

- Disposición de 4 micronizadores.
- Tamaño de gota de 10 micras,
- Temperatura exterior de 40 °C,
- Humedad de 0.01 kilo de agua por kilo de aire seco.
- Caudal de aire por la torre de 1.1 Kg/s
- Caudal de agua inyectado de 0.007 Kg/s

z/x	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
0.05		0.00083	0.00078	0.00078	0.00081	
0.1		0.00049	0.00044	0.00044	0.00049	
0.15		0.00034	0.00029	0.00029	0.00034	
0.2		0.00007	0.0002	0.0002	0.00009	
0.25			0.00003	0.00003		
0.3						
0.35						

Figura 20. Términos fuente de humedad, como se están evaporando las gotas.

z/x	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
0.05		1818.02	1713.7	1715.28	1767.16	
0.1		1121.67	995.91	995.09	1127.54	
0.15		778.38	667.02	665.72	784.52	
0.2		176.15	456.47	457.91	214.99	
0.25			61.12	62.63		
0.3						

Figura 21. Términos sumidero de energía (G) en cada volumen

z/x	G	Acumulado	%Evaporado
0.05	7014.16	7014.16	45.03
0.1	4240.21	11254.37	72.25
0.15	2895.64	14150.01	90.84
0.175	2106.35	14798.036	95
0.2	1305.52	15455.53	99.22
0.25	123.75	15579.28	100
0.3	0		
Total	15576.88		

Figura 22. Integrales del sumidero de energía según la variable horizontal.

Este mismo esquema se repetirá para cada caso, pudiendo luego analizar los datos y crear las correspondientes correlaciones. Estos datos son importados a Excel, y se presentarán en el anexo “Resultados de Micronización” .

3.5.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Correlación de la densidad media en el volumen de evaporación

Para el calculo de la correlación necesitamos calcular el valor de la densidad media para cada caso estudiado, para ello el propio programa tiene una opción que es medir la densidad de salida de la torre, esa será la densidad que vamos a correlar. Se le añade el término medio, ya que a lo largo de ese volumen de evaporación la densidad va a ir variando desde la que tiene el aire exterior de entrada (baja), hasta un valor superior en el final de la evaporación. En micronización la distancia de micronización será pequeña en comparación con la torre.

CASO	Densidad Salida	Densidad Entrada
1B	1.1769	1.1534
3A	1.1665	1.1348
3C	1.1584	1.1199
4A	1.1735	1.1363
4C	1.1600	1.1332
5A	1.1696	1.1352
5C	1.1628	1.1344

Figura 23: Resultados obtenidos para los casos estudiados en el estudio de densidad.

La figura muestra los resultados (Kg/m³) ordenados según la numeración del anexo “Casos de Micronización” (casos numerados en forma de elementos de una matriz). Además se muestra una comparación con la densidad de entrada del aire a la torre, para observar la realidad física del tiro inducido. La información completa de esta tabla y el resto de resultados están presentes en los archivos del CD.

Aplicando la fórmula descrita antes de la correlación, se puede plantear un sistema de ecuaciones sobredeterminado, en el que se podrá estimar el valor de cada una de las constantes con el ajuste más óptimo a partir de la solución de mínimos cuadrados (Método de Gauss de la Pseudoinversa).

Resultado es ($K = \ln a$):

a	0.18382
b	- 0.01051
c	- 0.00687
d	0.00022
K	1.20180

Figura 24: Coeficientes de la correlación obtenidos por ajuste de mínimos cuadrados

Quedando la correlación con la forma siguiente:

$$\rho_{IMP} = 1.20180(T_{SECA} - T_{WB})^{-0,01051} (Q_{AIRE})^{-0.00687} (Q_{AGUA})^{0.00022}$$

Correlación de la altura de evaporación

Un sistema similar al anterior lleva a la siguiente tabla con los valores de altura de evaporación para cada caso:

CASO	ALTURA (m)
1B	0.1
3A	0.18
3C	0.35
4A	0.13
4C	0.35
5A	0.06
5C	0.36

Figura 25: Resultados obtenidos para los casos estudiados en el estudio de altura de evaporación.

Resultando ($M = \ln g$):

g	4.5901
j	1.3093
k	1.4770
l	0.1571
M	0.0102

Figura 26: Coeficientes de la correlación “Altura de Evaporación” obtenidos por ajuste de mínimos cuadrados

$$H_{EVAP.} = 0.0102(T_{SECA} - T_{WB})^{1.3093}(Q_{AIRE})^{1.477}(Q_{AGUA})^{0.1571}$$

Repitiendo lo dicho antes: los resultados han sido calculados para un tamaño de gota de 10 micras, por lo que habrá que crear un factor corrector que multiplicado al resultado anterior proporcione la altura de evaporación para otras condiciones tecnológicas diferentes.

Presentando los resultados para los otros diámetros estudiados, tanto de su altura de evaporación como de la altura a la que se produce el 50 % de la misma (se puede ver la semejanza de pedir al usuario el diámetro o bien la altura de evaporación del 50 % del caudal inyectado):

Diámetro	H (m)	H/(H10micras)	H-50%	H/(H-50)
10	0.1748	1	0.06	2.9136
30	1.0054	5.7512	0.2732	3.6801
60	4.8	27.4570	0.95	5.0526

Figura 27: Valores necesarios para la obtención del factor correcto por diferente tamaño de gota

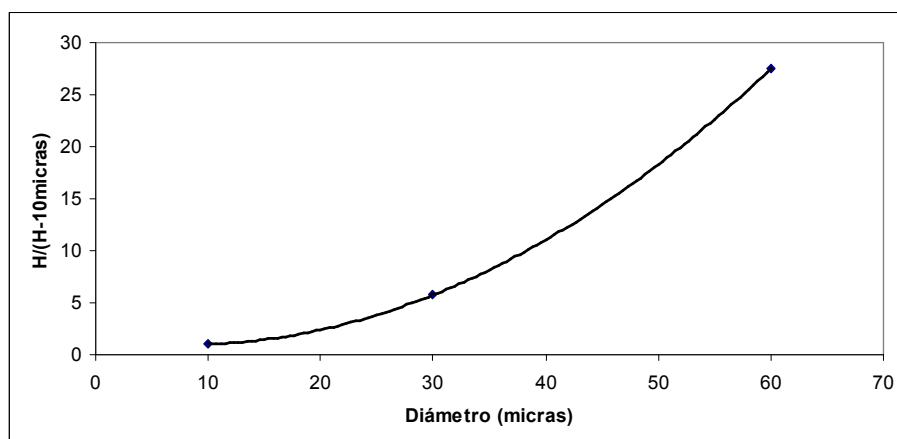


Figura 28. Gráfica del cociente entre la altura de evaporación para diferentes diámetros y la altura de evaporación para el caso de 10 micras

Por tanto el factor corrector para el caso de que el usuario disponga de otro tamaño de gota distinto a 10 micras:

$$Fc_{\text{Diámetro}} = 0.0097D^2 - 0.1512D + 1.5402$$

Repitiendo el ajuste en este caso en lugar de para el diámetro para esa altura de H-50% se tiene:

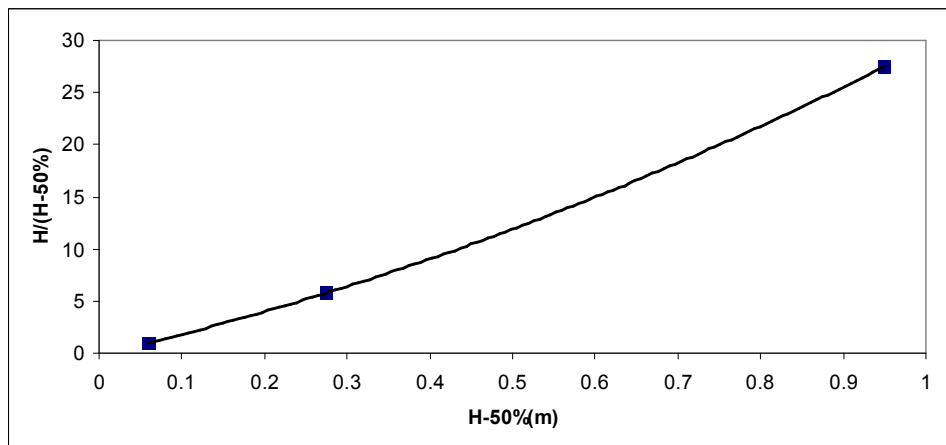


Figura 29. Gráfica del cociente entre la altura de evaporación y la altura de evaporación del 50% del agua inyectada.

$$Fc_{H-50\%} = 10.996 H_{50\%}^2 + 18.621 H_{50\%} - 0.1569$$

3.5.5. CONCLUSIONES

En primer lugar hay que destacar una serie de resultados intermedios que han marcado el desarrollo del estudio:

- Se decide no usar los resultados de los casos 1B y 1C (variación de diámetro) para caracterizar las variables a correlar, debido a que no representan la semejanza de condiciones necesaria para realizar una correlación de calidad. En el caso de la densidad no son influyentes en los resultados, pero en el caso de la altura están intrínsecos en los factores correctores.
- Los casos 2A, 2B, 2C y 2D, no figuran en los usados para crear la correlación, se debe a que los resultados dejan de ser dependientes de la disposición, es decir, para una disposición tal que se cree una micronización del agua uniforme en toda la torre, otra disposición mayor produciría resultados mínimamente mejores, como muestra la figura. Una elección de 4 micronizadores en la dirección principal produce una altura de evaporación (con el resto de variables iguales) similar a la que producen 16 micronizadores repartidos, de ahí que se elija hacer el estudio con este parámetro fijado.

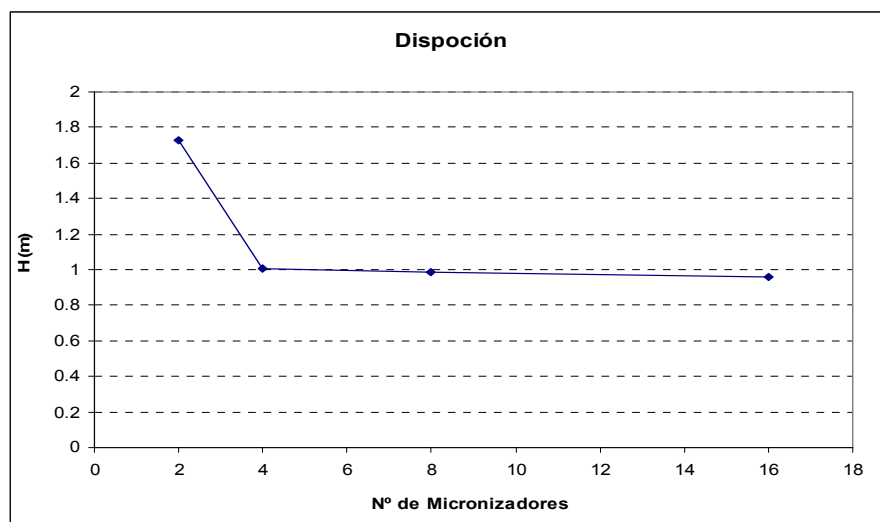


Figura 30. Influencia del N° de Micronizadores en la altura de evaporación

Estas correlaciones han sido validadas para casos extremos, que aunque no aparezcan en la lista de casos, garantizan una buena aproximación al prediseño con sistemas de micronización por dar resultados con orden de magnitud apropiado.

En conclusión, queda definida una torre de entrada con tecnología de micronización de forma simplificada para la exportación a cualquier modelo, como en este caso es PHDC, en el que el usuario podrá elegir las principales variables influyentes del tiro inducido, desde propiedades geométricas de la torre (jugando con la fricción que se produce en la misma y con el tiro evaporativo que se inducirá), hasta condiciones de funcionamiento de los dispositivos (caudal de agua, captadores de viento...).

3.6. WATER SPRINKLER

3.6.1. INTRODUCCIÓN

Este apartado va a estar fundamentado tanto en el anterior como en el capítulo de gotas aisladas, que es lo que motiva la creación de un estudio separado para Water Sprinkler.

Se han tratado gotas de tamaños superiores a cien micras, que en las condiciones más extremas consideradas (ambiente más seco posible) no van a evaporarse por completo, lo que obligará a una recogida de agua en la base de la torre, un tratamiento de la misma y una posible recirculación. Estos puntos referentes al mantenimiento y operación de la torre con Water Sprinkler, no son objeto del documento pero tiene una gran importancia en el correcto funcionamiento e integración de este sistema.

3.6.2. ESTUDIO

El modelo simplificado debe permitir resolver un sistema de ecuaciones mediante balance de presiones, es decir el planteamiento expuesto en el punto anterior sigue siendo válido y necesario. Se requiere el cálculo de una densidad media de impulsión en el volumen de torre que se quiera considerar, pero en este caso hay una enorme variante.

El tamaño de gotas de Water Sprinkler las convierte en más independientes de las condiciones atmosféricas, es decir, si bien es cierto cuánto más seco sea el ambiente mayor será la evaporación y cuánto más húmedo menor (similar comportamiento que gotas pequeñas), pero el tamaño será el factor dominante en esta transferencia (concepto de tensión superficial y equilibrio de presiones en la interfase, unido a la reducción del área de agua en contacto con el aire). Por ejemplo, una gota de un milímetro (las más usuales), en un ambiente seco puede recorrer quinientos metros para evaporarse por completo. Esta independencia con las condiciones ambientales, nos permite aproximar el comportamiento del spray al comportamiento de una gota aislada.

El estudio de Water Sprinkler, se basa por tanto, en la utilización de gotas aisladas para calcular su porcentaje evaporado, y posteriormente crear una corrección usando CFD Fluent de las distancias de evaporación (aquí es donde se tiene en cuenta el comportamiento del spray en su conjunto).

El porcentaje evaporado en una gota aislada está relacionado directamente con la reducción de diámetro de la misma, la cuál es una variable que resuelta en el capítulo de Gota Aislada usando el programa implementado en Matlab.

Concluyendo con una correlación:

$$\%_{evap} = (-b + \sqrt{b^2 - 4at}) / (200a)$$

- Las constantes b y a, representarán la influencia con el diámetro de la gota y las condiciones exteriores.
- El tiempo t.

Los resultados de Matlab son exportados a Excel, allí se ajustarán por mínimos cuadrados cada uno de los casos en forma de polinomio de segundo grado, y a su vez las constantes calculadas en cada caso pasarán a un segundo proceso de ajuste.

Cabe destacar que en Matlab se obtiene la evolución del diámetro de la gota con el tiempo, pero hablar de tiempo es hacerlo de tiempo, ya que el tamaño de las gotas

hace que rápidamente se encuentren en condiciones de caída libre, dominando la velocidad del aire en la torre ese empuje. Por lo que el cálculo de esa velocidad del aire en la torre hace poder relacionar espacio y tiempo en la trayectoria de las gotas. Según lo expuesto:

$$t = h_{imp} / (Q / A_{imp})$$

Siendo h_{imp} la altura de la torre en la que se va a considerar el tiro, y A_{imp} , el área transversal de la torre.

Relacionando con el caso anterior, se va a tener la evolución del porcentaje evaporado con el espacio, es decir, con la coordenada vertical, por lo que en este caso no se necesitará correlar la altura de evaporación para tener en cuenta entradas de aire a las zonas en diferentes lugares que no sean la base de la torre.

Se consigue una correlación del porcentaje evaporado, función del diámetro de la gota y de la distancia, además del caudal de aire por la torre y el área transversal de la misma (cálculo de la velocidad del aire en el interior de la torre). Conociendo el porcentaje evaporado se puede saber cuanta agua es absorbida por el aire, por lo que un balance de masa y energía como en el punto anterior, hace conocer todas las propiedades del aire de impulsión:

$$\varpi_{imp} = \varpi_{ext} + \%_{evap} M_{agua} / (Q \rho_{ext})$$

$$T_{imp} = T_{ext} - M_{agua} \%_{evap} \lambda / (Q \rho_{ext})$$

Se tiene que obtener la densidad húmeda relacionada con ese porcentaje evaporado, y se exportará de un diagrama psicrométrico, ya que se tienen todas las variables que definen el mismo. Puede ser que el diagrama no proporcione la densidad

húmeda por lo que mediante la densidad seca y la humedad se puede calcular la densidad húmeda con un simple balance de masa, del que resulta:

$$\rho_{Húmeda_imp} = \rho_{Seca_imp} (1 + \varpi_{imp})$$

El estudio obedecerá un organigrama según muestra el anexo Casos Pulverización, a sabiendas de que cada caso (elemento de la matriz) tiene dos modelos, uno matemático en Matlab, en el que se tratan las mismas condiciones que el caso a estudiar pero para una gota aislada y otro en Fluent con el modelo de Spray asociado para poder corregir. Solo los casos 1A, 1B, 1C y 1D, son tratados matemáticamente en Matlab, el resto de los casos se resuelven en Fluent, ya que el modelo matemático es muy invariante de las condiciones ambientales al trabajar a partir de números adimensionales cuyo cambio es mínimo entre condiciones, unido a que en el caso de Water Sprinkler, como ya se ha dicho, es el tamaño el factor dominante. Pero buscando la precisión de la correlación, en Fluent si se tienen en cuenta tanto las condiciones ambientales como otras condiciones de operación en la torre, para que el factor de corrección del paso de Gota Aislada a Spray sea el mejor posible.

3.6.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para comprender los resultados presentes en el Anexo: Resultados Pulverización, se explican y se ponen de manifiesto los obtenidos para un caso cualquiera:

- Disposición de 4 micronizadores.
- Tamaño de gota de 1000 micras,
- Temperatura exterior de 40 °C,
- Humedad de 0.01 kilos de agua por kilo de aire seco.
- Caudal de aire por la torre de 1.1 Kg/s
- Caudal de agua inyectado de 0.007 Kg/s

De Matlab se obtienen resultados del tipo

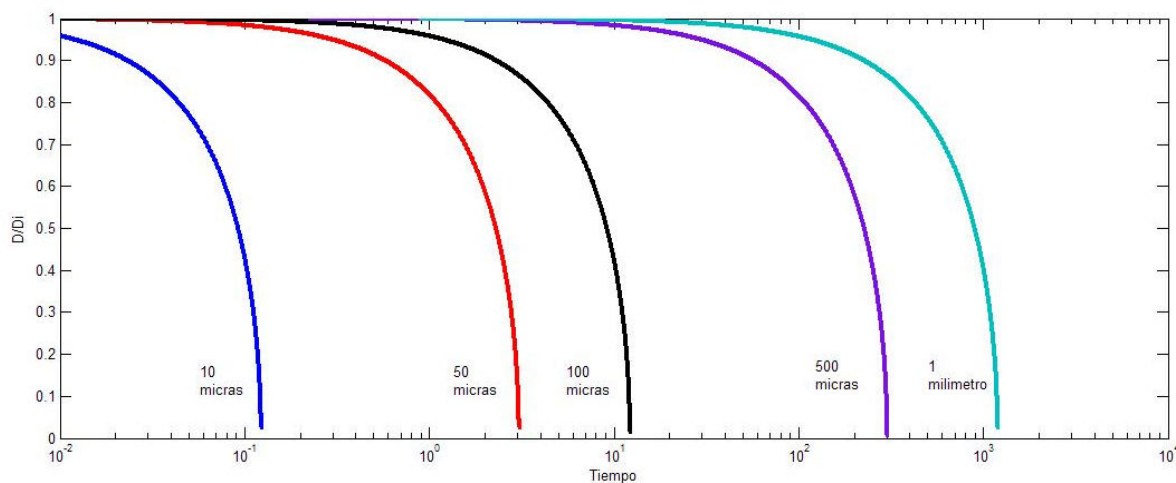


Figura 31: Evolución del diámetro normalizado de la gota en el ambiente mencionado.

El diámetro tiene un comportamiento idéntico al del porcentaje evaporado, por lo que la relación es directa y la exportación de los valores a Excel nos permite obtener un ajuste de los mismos, como muestra la gráfica:

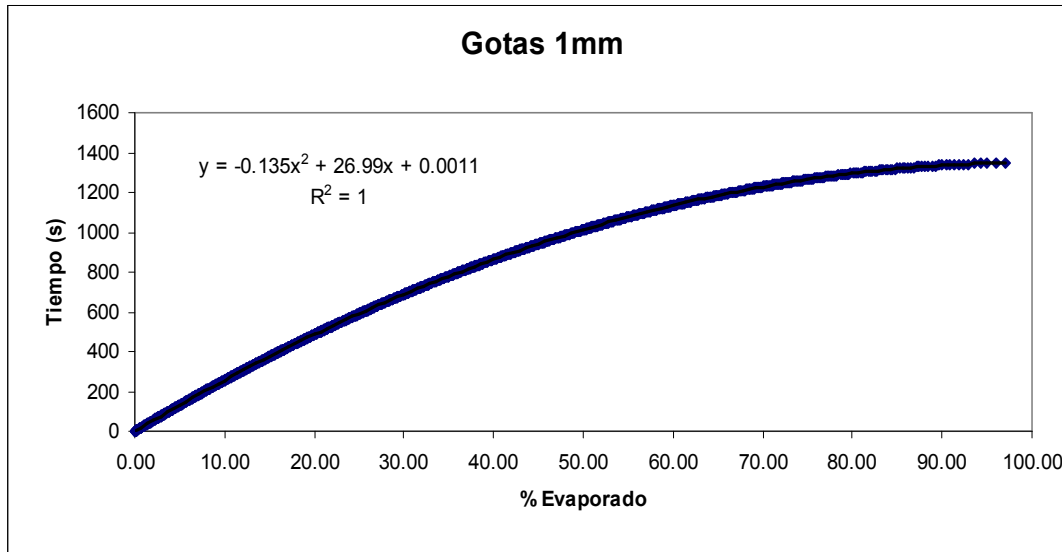


Figura 30: Tiempo de evaporación frente al porcentaje evaporado de la gota.

Destaca el hecho de que el tiempo aparece en el eje de ordenadas, se debe a que es la variable independiente en todos los casos a estudiar, y la que servirá para comparar cada caso, y correlar cada uno de los coeficientes (A, B y C) que componen el polinomio de segundo grado en función, principalmente, del diámetro, ya que el resto de variables aparecerán como una constante.

$$t = a\%^2_{Evap} + b\%_{Evap} + c$$

En forma de tabla los resultados del análisis con los otros diámetros:

Diámetro (micras)	a	b
1000	0.135	26.99
750	0.0762	15.24
500	-0.034	6.8039
100	0.0014	0.2752

Figura 32: Resultados del ajuste del tiempo de evaporación frente al porcentaje evaporado para otros diámetros

Además $C=0$, es un resultado que se puede apreciar en el ajuste con Excel.

Lo siguiente es ajustar los dos coeficientes como funciones del diámetro, para posteriormente establecer la correlación del porcentaje evaporado con el espacio y el diámetro.

Este ajuste da como resultados:

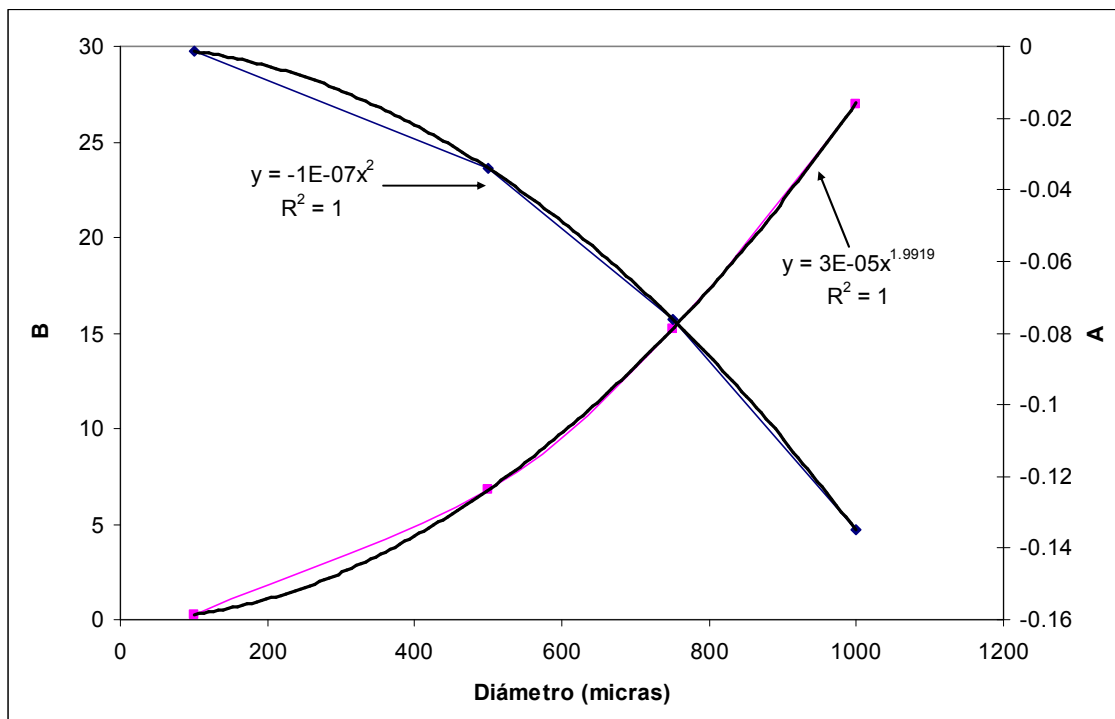


Figura 33: Ajuste de los coeficientes a y b en función del tamaño de la gota.

$$a' = 0.00000001D^2$$

$$b' = 0.00003D^2$$

Estos dos coeficientes se han considerado prima, porque es ahora cuando a través de los modelos Fluent se pueden corregir por lo ya expuesto. De esta manera se valida para cada tamaño de gota, la variación experimentada en el diámetro al final de la torre en condiciones ambientales diferentes y en modelos de spray. Quedando definitivamente los coeficientes y la correlación:

$$\begin{aligned} a &= 0.0000000135D^2 \\ b &= 0.00003D^2 \end{aligned}$$

$$\%_{Evap} = \frac{-0.00003D^2 + \sqrt{(0.00003D^2)^2 - 4 \cdot 0.000000135D^2 \frac{H_{lmp}}{Q_{lmp} / A_{Torre}}}}{200 \cdot 0.000000135D^2}$$

3.6.4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de este estudio nos permiten reducir un sistema complejo como es Water Sprinkler, a un sistema simplificado, fácil de computar y operar en cualquier sistema matemático.

Los resultados obtenido en este caso han tenido más dificultad que los anteriores, puesto que se el estudio anterior ha sido repetido para estos tamaños, pero los resultados extraídos de Fluent, sobre seis metros de Torre, eran escasos como para crear una correlación. Entonces se recurre a retomar los modelos matemáticos de Gota Aislada, integrados y depurados en Matlab, obteniendo unos resultados de enorme calidad.

3.7. CONCLUSIONES

Tras finalizar el estudio de Spray, la conclusión es clara, quedan modelados los sistemas de enfriamiento evaporativo habituales, salvo los sistemas porosos cuya información es aportada por el fabricante.

Así, el propio estudio de Spray, distingue entre el uso de Micronizadores y Water Sprinkler de una manera rotunda, por lo que el usuario debe tomar la decisión (ambos proporcionarán resultados diferentes, al perseguir objetivos distantes).

En este momento quedan definidos los modelos simplificados de sistemas de enfriamiento evaporativo basados en sprays de agua. La finalidad será la creación de una región de entrada al edificio, en la que se pueda acondicionar el aire usando estos dispositivos. Ahora bien, estos modelos son integrables en un sistema de ecuaciones del movimiento del aire, que se planteará y resolver

4. CAPTADORES DE VIENTO – WINDCATCHER-

4.1. DESCRIPCIÓN

Los Windcatcher son sistemas de captura e impulsión de aire y son utilizados mejora como de los sistemas de ventilación con la intención de reducir o eliminar la necesidad de un ventilador mecánico, con el consiguiente aumento de potencial de ahorro de energía y la ampliación de las posibilidades de flujo de aire en general, dado que la velocidad del aire exterior no es constante a lo largo de las horas de operación.

Una configuración óptima consistiría en aprovechar la presión del viento positiva cuando esté disponible y reducir al mínimo la resistencia del flujo de aire en el ventilador de la torre. Por ello los Windcatcher están equipados con un sistema de capturas de aire que básicamente consiste en un mecanismo que permite diferentes configuraciones de las aberturas y de los deflectores. Así el flujo de aire en la torre, es decir, el que sale del Windcatcher hacia la torre depende de la velocidad del viento exterior y del ángulo de ataque en la entrada. La captura del viento se define con una eficiencia ε calculada como el cociente entre la velocidad del flujo de aire que es expulsado del Windcatcher hacia la torre $v_{\perp}$ y la velocidad de flujo del viento exterior v_{ref} suponiendo que incide con una componente normal a la apertura de entrada del Windcatcher.

En la siguiente figura se puede observar la eficiencia definida y la velocidad del flujo de aire impulsado en función de los diferentes tipos de Windcatcher.

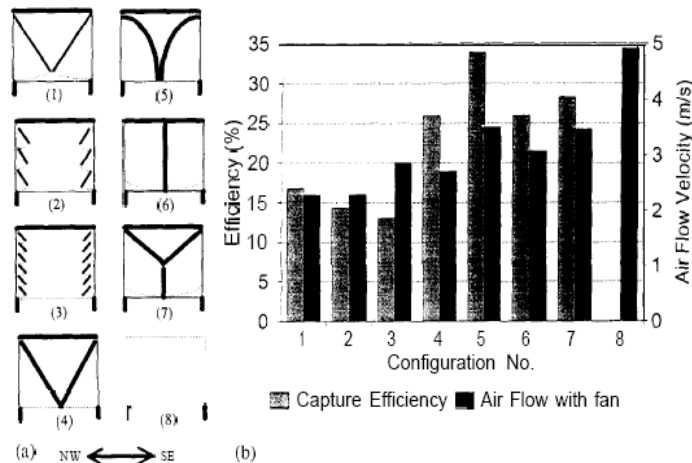


Figura 34: Eficiencia del Windcatcher en función de la velocidad del flujo de aire y de la configuración.

Todas presentan una estructura simétrica ya que esto aumenta la eficiencia de captación si las aberturas están orientadas según las direcciones en la cuales suele soplar más el viento en los meses de verano e invierno. Los tres primeros diseños emplean unos balanceadores móviles de captura (“swinging lowers”) de diferentes tamaños instalados en cada una de las aberturas. Las configuraciones 4 y 5 emplean deflectores fijos (“fixed deflectors”) que cambian la dirección del viento hacia la torre. Los modelos 6 y 7 cuentan con un panel central adicional en combinación con los deflectores fijos en la unidad de captura de aire. Los Windcatcher de más usuales son los modelos 4 y 5.

Los sistemas de chimeneas están disponibles comercialmente en el Reino Unido desde hace más de un siglo (Axley, 2001), aunque estos sistemas, hasta hace poco, estaban diseñados para habitaciones individuales en lugar de edificios en su conjunto. Los sistemas de ventilación natural Windcatcher distribuidos por Monodraught Limited en el Reino Unido ofrecen tasas de renovación de aire altas como, por ejemplo, 5 renovaciones de aire por hora bajo las condiciones de velocidad del viento relativamente baja (3 m / s) medido 10 m por encima del edificio (Monodraught, 1997, 2002). Estos sistemas también pueden emplear para impulsar aires otros elementos de ventilación como son los co-axial fans (Ventiladores de apoyo) que son capaces de proporcionar asistencia mecánica durante condiciones climáticas extremas. En condiciones de frío, es posible lograr la ventilación de aire y la recuperación del calor con un esquema “topdown” mediante el uso de un co-axial fans para la impulsión.

4.2. ESTUDIO

4.2.1. DEFINICIÓN

El estudio se ha basado en la modelización de estos sistemas de captación de viento, para ver su efecto sobre la cubierta del edificio, es decir, describir su coeficiente de presiones, con el siguiente plan de trabajo:

- 1) Recopilación de información
- 2) Análisis de geometrías convencionales
- 3) Estudio y simulación de modelos convencionales
- 4) Resultados y conclusiones

4.2.2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La recopilación de la información nos proporciona todas las características de los modelos convencionales y la forma de tratamiento (en la tabla la numeración está relacionada con la imagen antes presentada). Cada modelo será definido por su coeficiente de presiones y por su eficiencia. La eficiencia se define como un cociente entre la velocidad del viento y la que en dirección vertical adquiere al pasar el captador y una vez que se ha uniformizado, es una relación entre el caudal máximo a introducir y el que pasa.

4.2.3. ANÁLISIS DE GEOMETRÍAS CONVENCIONALES

Es a partir de este artículo donde se pueden evaluar las geometrías de captadores más habituales. Serán algunas de estas geometrías las que se desarrollarán con amplio detalle.

En primer lugar, la realización de planos de estas geometrías. En el artículo no se desvela esa información pero se cuenta con las relaciones de aspecto de los modelos incorporados en la EXPO'92, los cuáles son fruto del trabajo del Departamento de Energética, por lo que se dispone de toda la información pertinente. Tras esta caracterización se realizan modelos en ANSYS, que de forma esquemática se presentan en la figura (extraída del programa PHDC):

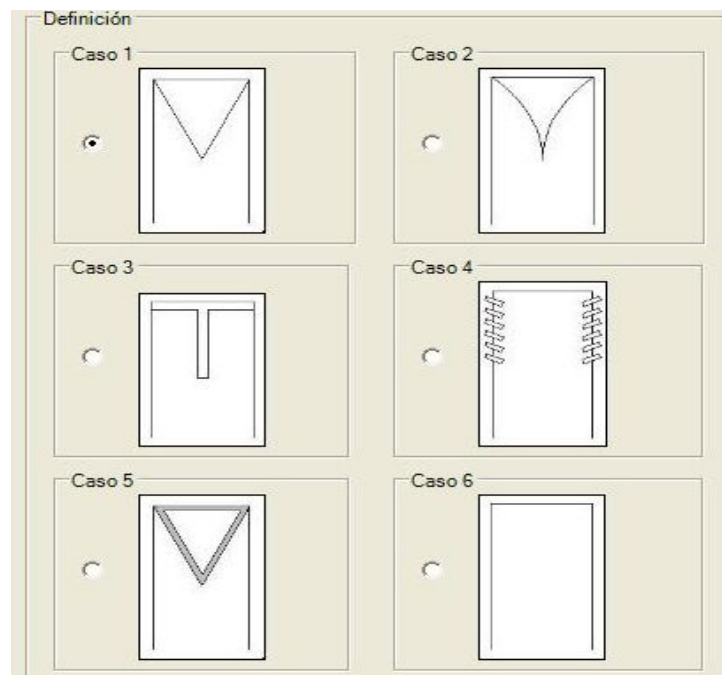


Figura 35: Esquema de los captadores estudiados (extraída de AirFlow)

Hay que destacar que son cinco los modelos que vamos a analizar, elegidos por abarcar las principales geometrías y configuraciones, pudiendo de esta manera caracterizar con rigor el problema y acotar la eficiencia de otra geometría. Además el programa nos permite una sexta opción para introducir uno que el usuario tenga caracterizado.

4.2.4. SIMULACIÓN DE MODELOS CONVENCIONALES

Tras el análisis del problema aislado, se necesita incorporar los captadores a un edificio y este introducirlo en un ambiente, simulando un edificio en un túnel de viento.

Para esta labor se usará el CFD FLUENT gracias a los modelos creados con ANSYS, cuyas principales características son:

- El edificio será representado como un prisma rectangular, de una altura de diez metros, semejante a un edificio de dos plantas, además en planta tendremos unas dimensiones de 6x10 m.
- El ambiente (túnel de viento) será representado como un gran módulo cúbico de cien metros de dimensión para garantizar su no influencia en los resultados.

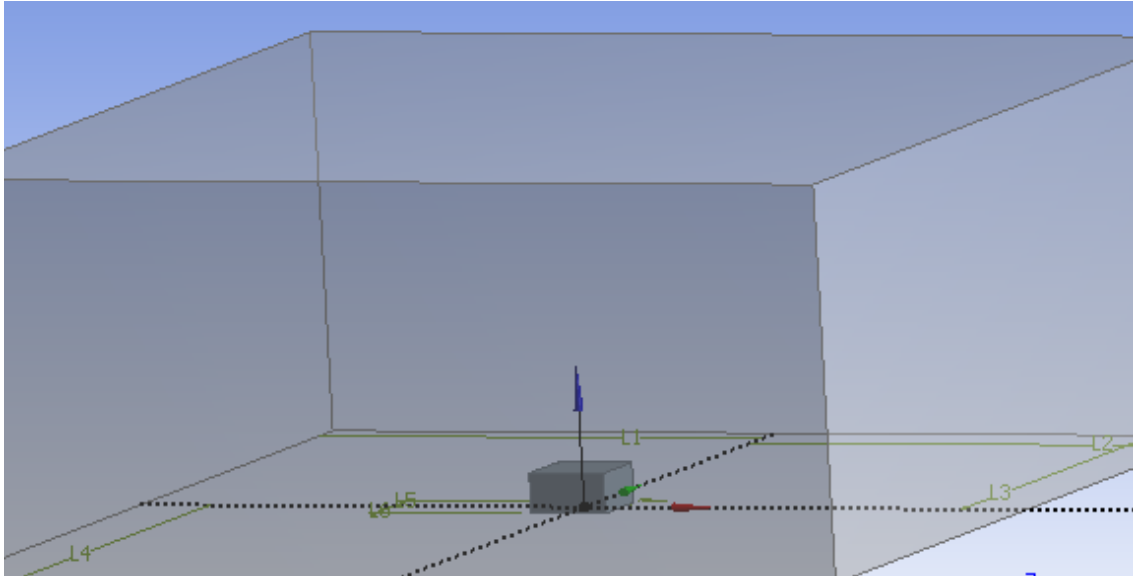


Figura 36: Esquema del “Túnel de viento modelado”

- Los captadores se colocarán en el eje mayor del edificio.
- El estudio 3D quedará simplificado a un análisis bidimensional por la simetría tanto del problema como de los captadores como ya se ha comentado, lo cuál simplificará el problema y permitirá un estudio más a fondo de los captadores, que como se ha dicho se evaluará además la posición de este captador en la zona central de la cubierta y en el lateral opuesto al frontal de incidencia del viento. Resultando el siguiente modelo (en verde entradas de aire posibles, en rojo la superficie a estudiar):

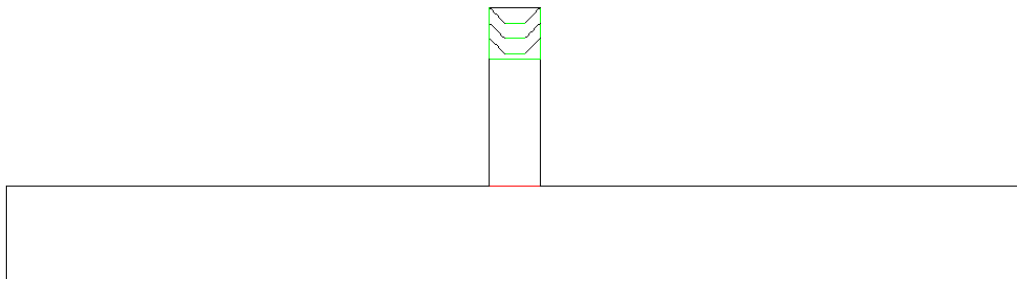


Figura 37: Modelo 4. Posición en central de la cubierta



Figura 38: Modelo 1. Posición en lateral no frontal al viento de la cubierta.

4.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez caracterizado el problema, ya se puede evaluar los captadores en las dos posiciones de la cubierta. Para ello se estudiarán dos parámetros:

- Coeficiente de presiones, como parámetro del comportamiento del captador frente al viento, que será un indicativo de la aerodinámica del mismo y además de su influencia en la cubierta del edificio.
- Eficiencia del captador, como el cociente entre la velocidad en la entrada de aire al edificio (antes coloreada de rojo) y la velocidad del viento, una relación entre el máximo caudal que podría entrar y el que entra a través de las velocidades.

	Cp	Eficiencia Captador
Modelo 1 Central	0.99	0.26
Modelo 1 Lateral	1.00	
Modelo 2 Central	0.86	0.17
Modelo 2 Lateral	0.52	
Modelo 3 Central	0.95	0.26
Modelo 3 Lateral	0.63	
Modelo 4 Central	0.78	0.145
Modelo 4 Lateral	0.57	
Modelo 5 Central	0.89	0.28
Modelo 5 Lateral	0.74	

Figura 39: Resultados del estudio de captadores de viento

A la vista de los resultados, se pueden las dos posiciones en cubierta diferentes de los captadores, en la zona central de la cubierta, y otro en la parte de la cubierta contraria a la de ataque del viento. Como sistema, un modulo rectángulo (tratamiento 2D), en el cuál un viento incidente en el lateral izquierdo a una cierta velocidad, dará lugar a un comportamiento de los captadores situados en un lugar u otro. Cada caso se ha estudiado por separado, ya que la colocación de un captador crea una modificación del flujo. Se puede ver como en todos los casos es más efectivo colocarlo en la zona central, y es claramente porque en el lateral derecho, aparecen vórtices de corriente debido a la zona de depresión que se forma, lo cuál condiciona el comportamiento del mismo, mientras que en la zona central, el flujo que ha sido perturbado por el choque con la pared izquierda, ya prácticamente está uniformizado y tratamos con una corriente sin perturbar, a la velocidad del viento misma.

En cuanto a innovación, es una tarea bastante complicada que se haya en fase de diseño, puesto que el comportamiento de los modelos convencionales es muy bueno, pero es trivial a simple vista, que el viento no tiene siempre la misma dirección, magnitud etc... por lo que en los nuevos modelos se ha buscado cambiar las propiedades de los captadores, posición, tamaño de aperturas... de acuerdo a la variabilidad del viento, colocando unos detectores sobre el mismo.

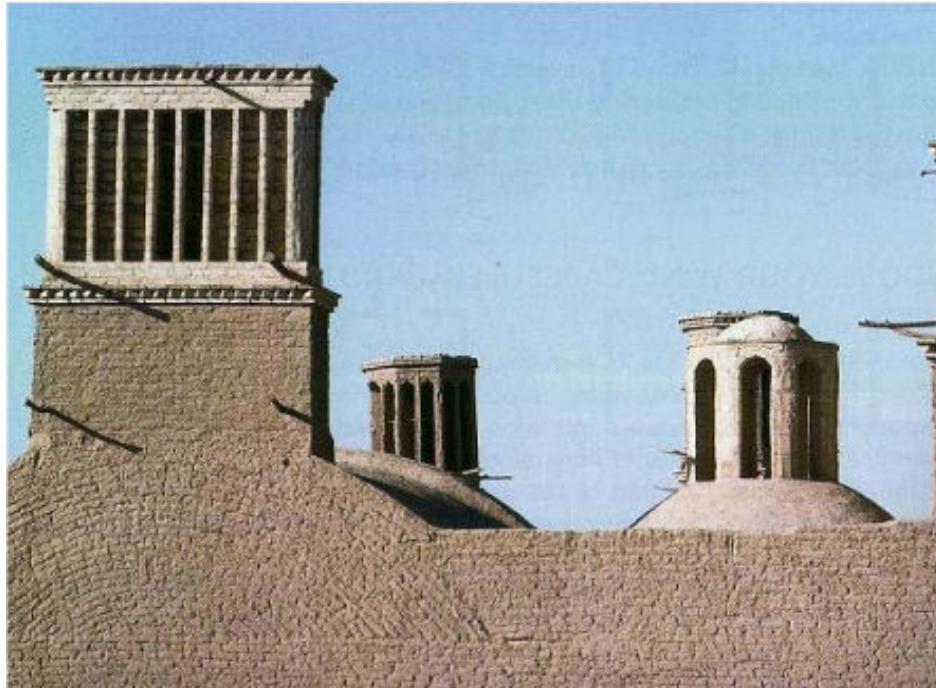


Figura 40: Captadores de viento en el desierto central de Irán (Yazd)



Figura 41: A la izquierda captador árabe y a la derecha nuevas tecnologías de captación

5. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PHDC

5.1. PRESENTACIÓN

Este bloque es el objetivo de todo el proyecto, la creación de una herramienta informática que permita el prediseño de edificios en los que se integren sistemas pasivos de refrigeración y se combinen de forma eficiente con los sistemas mecánicos. Para ello PHDC, dentro del marco del proyecto europeo que lleva su nombre, crea dos herramientas diferentes: “AirFlow”, para el análisis del movimiento de aire; y “Energy & Confort”, en el que se evalúa el comportamiento del edificio al incorporar los sistemas pasivos. Ambos programas quedan vinculados, y serán comentados en este punto.

La creación del Software ha sido llevada a cabo por el personal informático del Grupo de Termotecnia. No obstante es elemento de este proyecto, porque bajo la dirección del Grupo de Termotecnia, se colabora en las siguientes tareas dentro de la herramienta AirFlow:

- Creación de modelos simplificados
- Modelización del sistema global.
- Validación completa del programa.
- Representación gráfica del mismo, y grado de interacción del usuario.
- Elaboración de Handbook.

Es por este motivo, por lo que PHDC da nombre al proyecto, al ser el objetivo de estos dos años de colaboración.

5.2. INTRODUCCIÓN

La refrigeración pasiva y el diseño eficiente reducen considerablemente la dependencia de la climatización de edificios de los combustibles fósiles. La Refrigeración pasiva e Híbrida, en todas sus formas, es ahora técnicamente viable en muchas partes del mundo. Esta afirmación es, en buena manera, gracias a la combinación de proyectos de investigación apoyados por la Comisión Europea y ejemplos construidos en el mundo entero sobre estas técnicas.

Aún así queda un camino difícil para conseguir que de unos cuantos edificios que incorporen estas técnicas se llegue a miles de los mismos. Por ello surge PHDC, teniendo como objetivo:

Promover el uso de Sistemas de refrigeración Pasivos e Híbridos (PHDC) en los edificios entre profesionales de diseño, constructores, propietarios y usuarios.

5.3. FUNDAMENTOS DE LA HERRAMIENTA AIRFLOW

5.3.1. Método del bucle de presiones multizona.

El programa PHDC Air Flow utiliza el método conocido como “método del bucle de presiones”. Este método ha sido usado extensamente en análisis de flujo en conductos y proporciona una solución analítica útil para dimensionar los componentes y sistemas de ventilación natural e híbrida [1].

Las capacidades del programa PHDC Air Flow en este sentido son las siguientes:

- Generar la ecuación de balance en cada bucle existente en un edificio tipo.
- Generar el conjunto de ecuaciones de balance para el edificio completo a partir de las anteriores.
- Resolver el sistema de ecuaciones para el edificio completo, obteniéndose así el caudal de aire en cada planta.
- Generar una correlación que proporciona el caudal de aire en cada planta en función de las temperaturas, las humedades relativas y la velocidad del viento.

Para ilustrar el proceso anterior vamos a considerar el edificio representado en la siguiente gráfica. En ella podemos observar los bucles correspondientes a cada planta. Cada bucle representa el movimiento del aire desde la entrada hasta la salida del edificio, este movimiento parte de nodos exteriores y vuelve al exterior pasando por las zonas interiores del edificio.

Por ejemplo, el bucle 1 comprende desde el nodo a al nodo s. En dicho bucle se encuentran cinco tramos diferenciados:

- Tramos de entrada: “a-b” y “c-d”
- Tramos de salida: “i-j” y “s-t”
- Tramo de chimenea de entrada: “b-c”
- Tramo de chimenea de salida: “j-s”
- Tramos de paso a través de puertas: “e-f” y “g-h”

Las presiones de los nodos se identifican secuencialmente como $p_a, p_b, p_c, p_d, \dots, p_t$, y de nuevo p_a . Con esta notación la ecuación fundamental del bucle de presiones es:

$$\sum_{loopl} (p_x - p_y) = 0$$

Donde los índices x e y se permutan secuencialmente en cada uno de los nodos conforme se avanza en el bucle definido previamente.

La ecuación anterior se puede escribir también de la siguiente forma:

$$\Delta p_{lloss} = \Delta p_{lwind} + \Delta p_{lstack} + \Delta p_{lPHD}$$

Donde:

Δp_{lloss} son las pérdidas de presión en el bucle “l” debidas a la fricción en la entrada, la salida y al movimiento del aire en el interior del edificio.

Δp_{lwind} es el incremento de presión producido por el viento en el bucle “l”.

Δp_{lstack} es el incremento de presiones debida a la torre de salida – tiro térmico y/o mecánico- en el bucle “l”.

Δp_{wind} es el incremento de presiones en la torre de entrada –enfriamiento evaporativo- en el bucle “I”.

Para un bucle dado, el término de la izquierda de la ecuación anterior está formado por las presiones que se oponen al movimiento y en el término de la derecha están las presiones que fomentan el movimiento del aire.

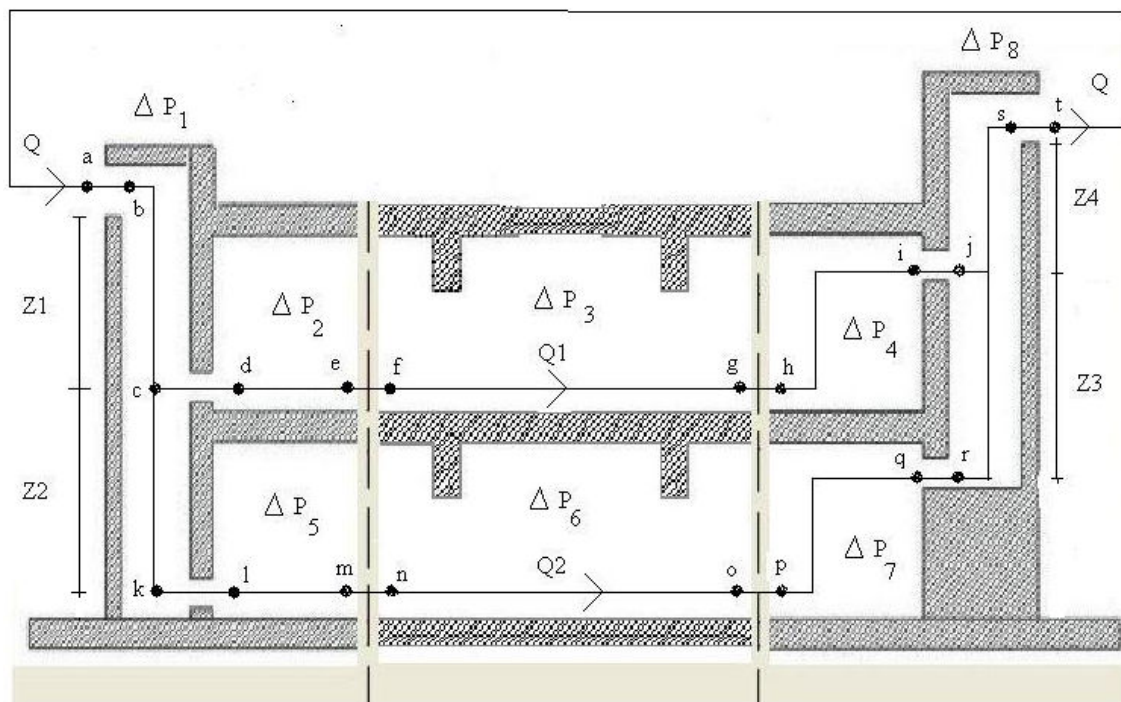


Figura 42: Sección vertical del edificio.

En el ejemplo anterior se han identificado dos bucles así que el sistema de ecuaciones que habrá que resolver será un sistema de dos ecuaciones no lineales acopladas entre sí.

Las dos incógnitas en dichas ecuaciones serán los caudales de aire que circulan en cada planta. El acoplamiento se debe a que el flujo de aire en las torres es, en el tramo superior, la suma de los caudales por cada planta.

El método de resolución utilizado es el método de Newton-Raphson modificado para obtener convergencia cuadrática. Este método se denomina “método de Ralston-Rabinowitz” usando una función auxiliar.

El programa PHDC Air Flow puede usarse para obtener dos tipos de soluciones:

- Caso 1: Solución de un escenario concreto dado por el usuario. Es necesario dar la temperatura y la humedad relativa exterior, así como la configuración del edificio y del sistema PHDC.

- Caso 2: Obtención de una correlación que permite exportar los resultados del programa al PHDC Energy & Comfort. Para asegurar la validez de la correlación, ésta se genera para un rango amplio y representativo de las condiciones ambientales

5.4. HIPÓTESIS, FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y CARACTERIZACIÓN

5.4.1. Propiedades

5.4.1.1. Datos climáticos

Se pedirán tanto condiciones exteriores de temperatura y humedad relativa, como interiores. Servirán para evaluar las necesidades y propiedades de los diferentes caudales. Además se usarán en la correlación posteriormente.

5.4.1.2. Altura sobre el nivel del mar

Con la altura, las condiciones de presión temperatura y densidad van variando. A medida que se asciende la presión atmosférica va disminuyendo, lo que afecta directamente a la densidad del aire, variando esta en forma proporcional.

A esto se le contrapone la temperatura, la que al disminuir con la altura debería volver al aire más denso, aunque en realidad no alcanza a compensar el efecto de la presión, que es mas marcado.

En concreto, el resultado es que la densidad disminuye con la altura.

Podemos obtenerla a partir de la relación con la ecuación de los gases perfectos:

$$P = P_{\text{nivel-mar}} e^{\frac{mgh}{RT}}$$

Con $P_{\text{nivel-mar}}$ como la presión en el nivel del mar,

$$R = 8.314 \cdot 10^3 \text{ (N m) / (Kmol K)}$$

$$g = 9.8 \text{ m /seg}^2$$

m = masa molar del aire atmosférico = 28.96 Kg / Kmol

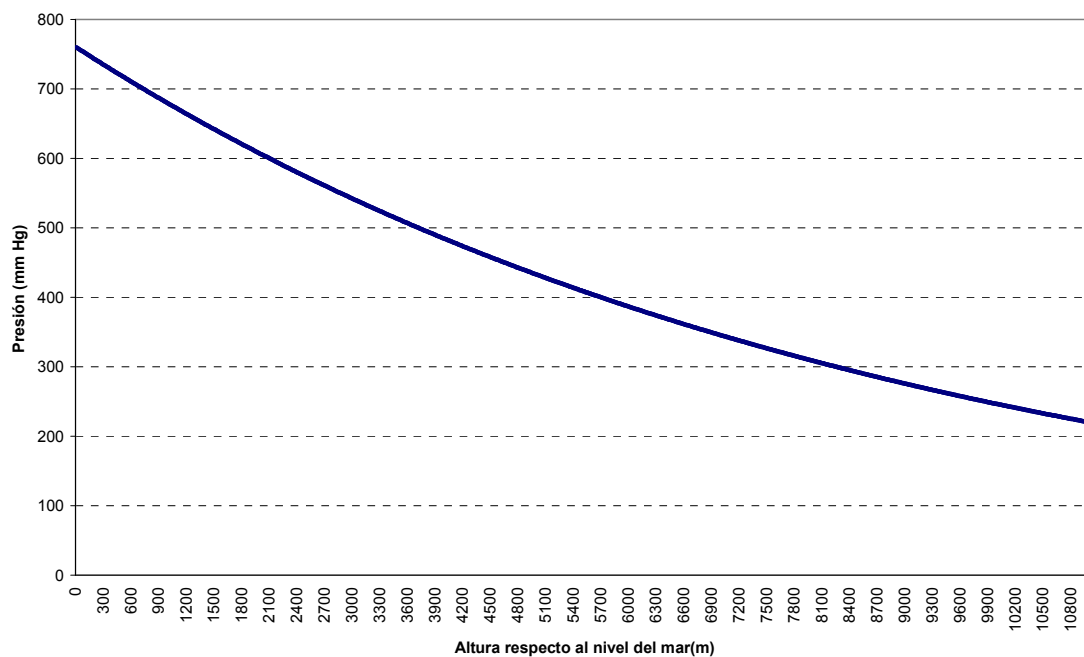


Figura 43: Variación de la presión con la altura sobre el nivel del mar

5.4.1.3. Efecto del viento

$\Delta P_{wind} = 0.5(Cp_e - Cp_s)\rho_{ext}v^2$ $Cp_e = 0.3$ $Cp_s = -0.2$ (Valores defecto)

$$\Delta P_{windcatcher} = 0.5Cp_w\rho_{ext}v^2$$

ρ_{ext} Densidad del aire exterior (todas las densidades se obtienen de la lectura del psicrométrico)

v Velocidad del viento (velocidad aire)

Existen dos usos de la potencia del viento: uno debido a la diferencia de coeficientes de presión entre la cara expuesta al viento (nuestra zona de entrada de aire) y la zona de extracción; el segundo se debe a la incorporación del captador de aire (Windcatcher) en la parte superior de la torre de impulsión.

La definición del captador está basada en su coeficiente de presiones, fruto de su comportamiento aerodinámico, en el programa se ofrece una amplia gama de modelos caracterizados a partir de los experimentos documentados en el artículo [3]:

La caracterización de los captadores se ha realizado calculando en el programa CFD FLuent© el coeficiente de presiones haciendo uso de su definición funcional:

$$Cp = \frac{\Delta P_{estática}}{0.5\rho v^2} \quad \Delta P_{estática} = P_a - P$$

Siendo P la presión sobre la superficie de entrada del captador en la cubierta, una vez que el perfil de flujo se ha uniformizado.

El denominador de la ecuación anterior es la energía cinética disponible en el viento antes de su llegada al captador.

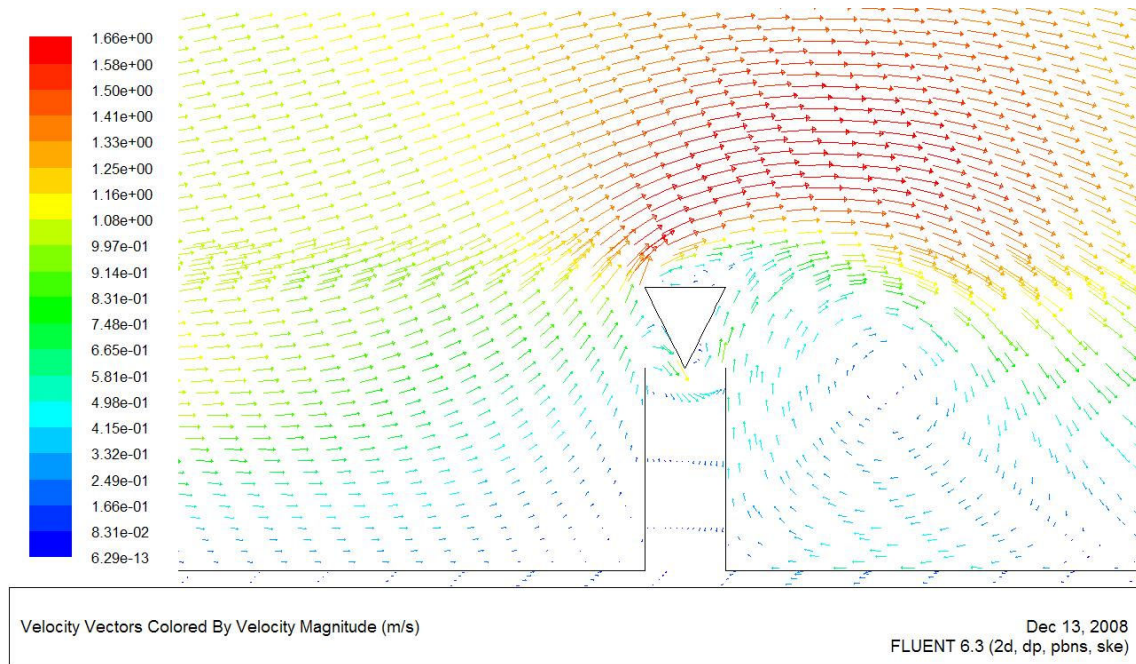


Figura 44: Imagen extraída de Fluent del estudio de WindCatcher

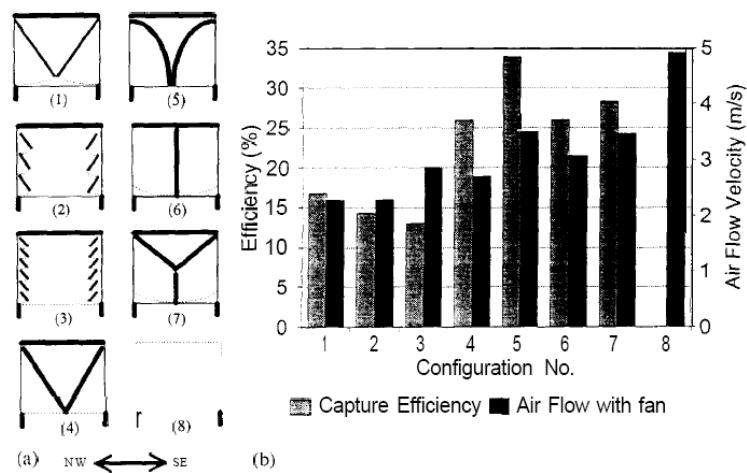


Fig. 6. (a) Cross-sectional configurations of experimental wind catchers. (b) Performance comparison: wind-capture efficiency without mechanical assistance, and airflow velocity with forced draft

Figura 45: Eficiencia del Windcatcher en función de la velocidad del flujo de aire y de la configuración.

La siguiente tabla recoge los valores que caracterizan a cada una de las tipologías de captadores anteriores:

Captador	Cp
1	0.86
2	0.78
3	0.78
4	0.99
5	1.00
6	0.95
7	0.89

Figura 46: Resumen del estudio de Windcatcher

El programa admite la posibilidad de integración, por parte del usuario, de nuevos modelos, simplemente caracterizando su coeficiente de presiones e introduciendo este dato eligiendo el captador genérico en el menú de windcatchers.

El captador estudiado por MCA en el proyecto PDEC, EU DGXII JOR3CT950078, queda caracterizado asignándole un valor del Cp de 1.00.

5.4.2. Torre de salida

Cuantificaremos las pérdidas debidas a la descarga a través de la torre:

$$\Delta P_{descarga} = \rho_{ext} Q^2 / (2 C_d^2 A_{Extracción-libre}^2)$$

Donde Q es el caudal de aire; C_d es el coeficiente de descarga con valor por defecto 3.459, la corrección por una salida no ideal que dependerá de la geometría y del número de Reynolds; y $A_{extracción-libre}$ es el área transversal de la extracción libre, que el usuario presenta como dato, y será el factor principal para cuantificar esas pérdidas de carga.

Las pérdidas por fricción:

$$\Delta P_{fricción-extrac} = f Q^2 \rho_{extrac-m} h_{extrac} / (2 A_{extracción}^2 b_{extrac})$$

Siendo f el coeficiente de fricción, con valor por defecto 0.02, h_{extr} es la altura de extracción denominada como Z en el programa y b_{extrac} es el ancho de la torre dado por el usuario.

En esta formula usamos una densidad de extracción media $\rho_{extrac-m}$ a fin de caracterizar el volumen de aire que se mueve en la torre, a partir de la siguiente fórmula:

$$\rho_{extrac-m} = (\rho_{extr} + \rho_{int}) 0.5$$

Siendo T_{int} la temperatura interior y ρ_{int} la densidad interior, con los respectivos valores de la extracción implementamos un programa del psicrométrico, del cuál leemos propiedades.

La temperatura de extracción T_{extrac} , que se ha correlado de la siguiente manera, sabiendo que hemos tenido en cuenta una chimenea solar, en la que la radiación crea un calentamiento del aire que pasa por él, induciendo el tiro térmico:

$$T_{extrac} = (T_{ext} (1.32Q / (b_{extrac} h_{extrac}) + 6) + 32) / (1.32Q / (b_{extrac} h_{extrac}) + 6)$$

El tiro térmico lo definimos simplemente por la diferencia de densidades:

$$\Delta P_{g-extracción} = 9.8(\rho_{int} - \rho_{extrac-m})h_{extrac}$$

5.4.2.1. Contribución mecánica a la extracción

$$\Delta P_{fan-exhaust}$$

El programa permite añadir dos tipos de contribuciones mecánicas, un extractor o un windturbine, el usuario proporcionará la capacidad de los mismos en Pascales (Pa).

5.4.2.2. Wind-Turbine

En el caso de windturbine, el usuario deberá modelarlo a partir de las dos constantes que le proporcionará el fabricante, de la siguiente manera:

$$\Delta P_{windturbine} = a + bv_{viento}$$

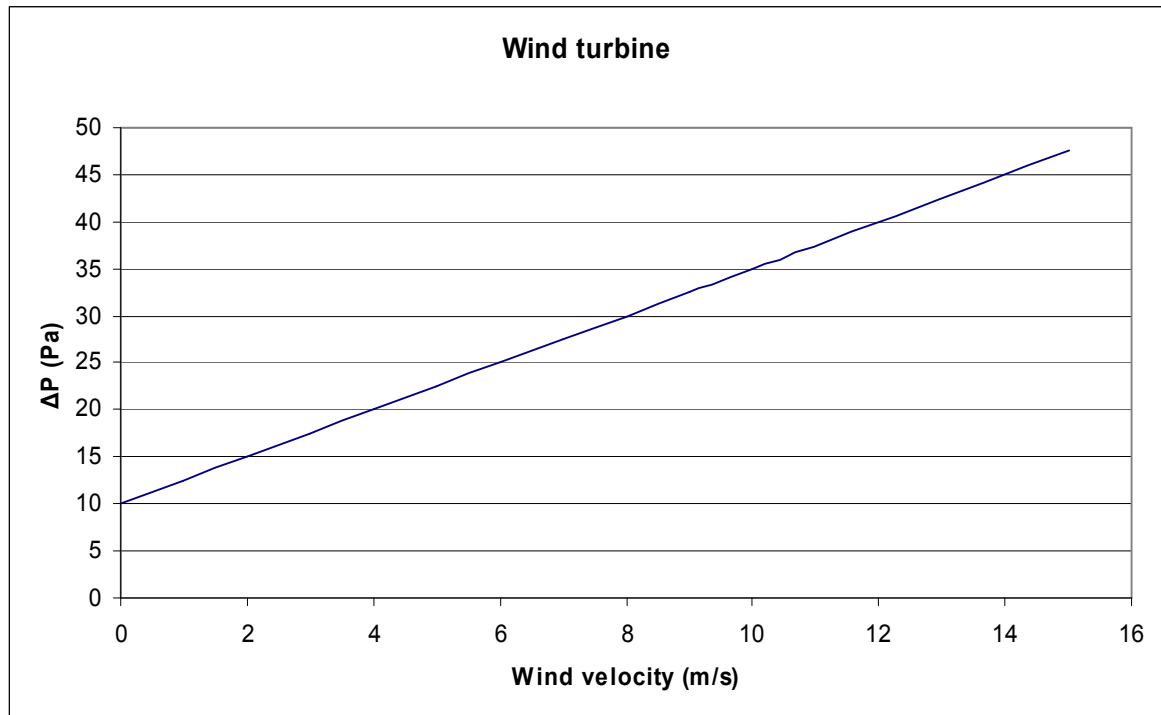


Figura 47: Capacidad de extracción de la turbina en función de la velocidad de viento

Esta gráfica muestra un ejemplo de un fabricante de lo que sería una curva de funcionamiento para la integración del mismo al programa.



5.4.3. Torre de entrada

Similar a lo anterior, los cambios aparecerán a la hora de cuantificar el tiro invertido:

$$\Delta P_{\text{fricción-imp}} = fQ^2 \rho_{\text{imp-m}} h_{\text{imp}} / (2A_{\text{imp}}^2 b_{\text{imp}})$$

Tenemos unas condiciones geométricas similares a las de la extracción, que también serán proporcionadas por el usuario.

Para evaluar el tiro invertido se utilizará la siguiente expresión:

$$\Delta P_{g-\text{imp}} = (\rho_{\text{ext}} h_{\text{micronizador}} + \rho_{\text{imp-m}} (h_{\text{imp}} - h_{\text{micronizador}}) - \rho_{\text{int}} h_{\text{imp}}) 9.8$$

Esta ecuación se usa para cualquier sistema empleado, con la salvedad de que en el caso de wetpad, la altura del micronizador se hace nula, y la fórmula sigue siendo válida.

En ambas expresiones es necesario conocer la densidad de impulsión media, que será función del tipo de sistema de enfriamiento que elijamos, de la siguiente manera:

5.4.3.1. Micronizadores

$$\rho_{imp-m} = 1.2018(T_{ext} - T_{ext,bh})^{-0.01051} (Q\rho_{ext})^{0.0069} (m)^{0.0002159}$$

$T_{ext,bh}$ es la temperatura exterior de bulbo húmedo, según las condiciones dadas y m es el caudal de agua inyectado.

Esta correlación ha sido caracterizada mediante la implementación del sistema en un programa de CFD Fluent. Se ha visto que para el tamaño de gotas que vamos a manejar, evaporaremos por completo el caudal de agua. Hemos establecido en gotas del tipo “micronización” las inferiores a 30 micras, pero todo depende de las condiciones de uso, para ello se recomienda abarcar el problema de la siguiente manera:

Resolver el problema sin añadir torre de impulsión, evaluar los caudales de aire que vamos a mover por la torre. Con este valor hacer un cálculo de la cantidad de agua necesaria, conocida la temperatura exterior del aire, su calor específico y el calor latente del agua, podemos hacer el siguiente balance:

$$M_{agua} \lambda = Q_{aire} C_p (T_{ext} - T_{imp})$$

Donde:

$$\lambda = 2500 \text{ kJ /kg}$$

$$C_p = 1 \text{ kJ /kg}\cdot\text{K}$$

$$Q = \text{caudal de aire en la torre [Kg/s]}$$

$$M_{agua} = \text{caudal de agua introducida [kg/s]}$$

Una vez obtenida esa estimación de la cantidad de agua, activaremos la torre de impulsión con ese caudal de agua. Además en la hoja de resultados se verá la temperatura de impulsión y la humedad relativa de salida de la torre, así se puede variar la cantidad de agua buscando un objetivo, siempre teniendo el orden de magnitud posible de las variaciones a hacer.

Se recomienda que cuando se trabaje con una planta, el diámetro de las gotas sea menor de 20 micras, en adelante el uso de hasta 30 micras es posible y aceptable, para una evaporación total.

Se debe tener en cuenta por parte del usuario que introducir una cierta cantidad de agua mediante micronización no garantiza la evaporación de la misma si se hace mediante un número de micronizadores inferior al necesario.

Para estimar el número de micronizadores necesarios para una micronización adecuada se remite a los datos siguientes donde se indica la cantidad de caudal de agua máxima por tipo de micronizador para conseguir gotas de un tamaño máximo de 30 micras, estos datos han sido suministrados por Ingeniatrics.



NEBULIZADOR STANDARD (Orificio 0,6 mm)

Resumen de condiciones de funcionamiento para un tamaño de gota máximo de 30 micras

Agua	Aire		Análisis en volumen			Análisis en número de gotas		
	P (bar)	Q (l/min)	Dv50	Dv90	Dv99	Dn50	Dn90	Dn99
0,3 l/h	1,5 bar	3 l/min	10	18	28	1,6	5	11
0,5 l/h	2 bar	3,7 l/min	10	20	30	1,6	5	11
1 l/h	3,2 bar	5,2 l/min	8,5	19	30	1,1	3,3	8,2

Con los datos anteriores podemos concluir que una torre con caudal de agua nominal de 0.005kg/s, se necesitarían 18 micronizadores con un gasto de 1l/h funcionando con una presión de aire de 3.2 bar. En estas condiciones se garantiza que el 99% de las gotas producidas será inferior a 30 micras.

5.4.3.2. Water sprinkler

Para el calculo de la densidad media de impulsión en este caso, se calculará la temperatura de impulsión y la humedad de salida, para posteriormente mediante un diagrama psicrométrico, calcular el valor de densidad correspondiente. Para ello en estos tamaños de gotas será necesario caracterizar el porcentaje evaporado, de la siguiente manera:

$$a = -1.35(10^{-7})(D^2) \quad b = 3(10^{-5})(D^2) \quad t = h_{imp} / (Q / A_{imp})$$

$$\%_{evap} = (-b + \sqrt{b^2 - 4at}) / (200a)$$

$$\varpi_{imp} = \varpi_{ext} + \%_{evap} M_{agua} / (Q \rho_{ext})$$

$$T_{imp} = T_{ext} - M_{agua} \%_{evap} \lambda / (Q \rho_{ext})$$

5.4.3.3. Wetpad

Teniendo una pérdida de carga por fricción con una fórmula similar a las expuestas anteriormente, salvo los cambios geométricos que el usuario introduzca en la torre. Donde además aparece una pérdida adicional debido a la adición de los wetpads en la entrada de aire, que definiremos en la página siguiente.

$$\Delta P_{w-p} = K v^2$$

Donde v es la velocidad del aire, que se definirá como el cociente entre el caudal del aire y la sección de paso de la torre de impulsión.

$$K = 80 b_{w-p}$$

Donde:

b_{w-p} es la profundidad del wetpad, dada por el usuario.

El enfriamiento será definido a partir de una eficiencia.

$$\varepsilon = 1 - e^{-a v^{-0.2}}$$

$$a = 13.5 b_{w-p}$$

Y esta eficiencia nos permite calcular la temperatura de impulsión.

$$T_{imp} = T_{ext} - \varepsilon (T_{ext} - T_{ext-bh})$$

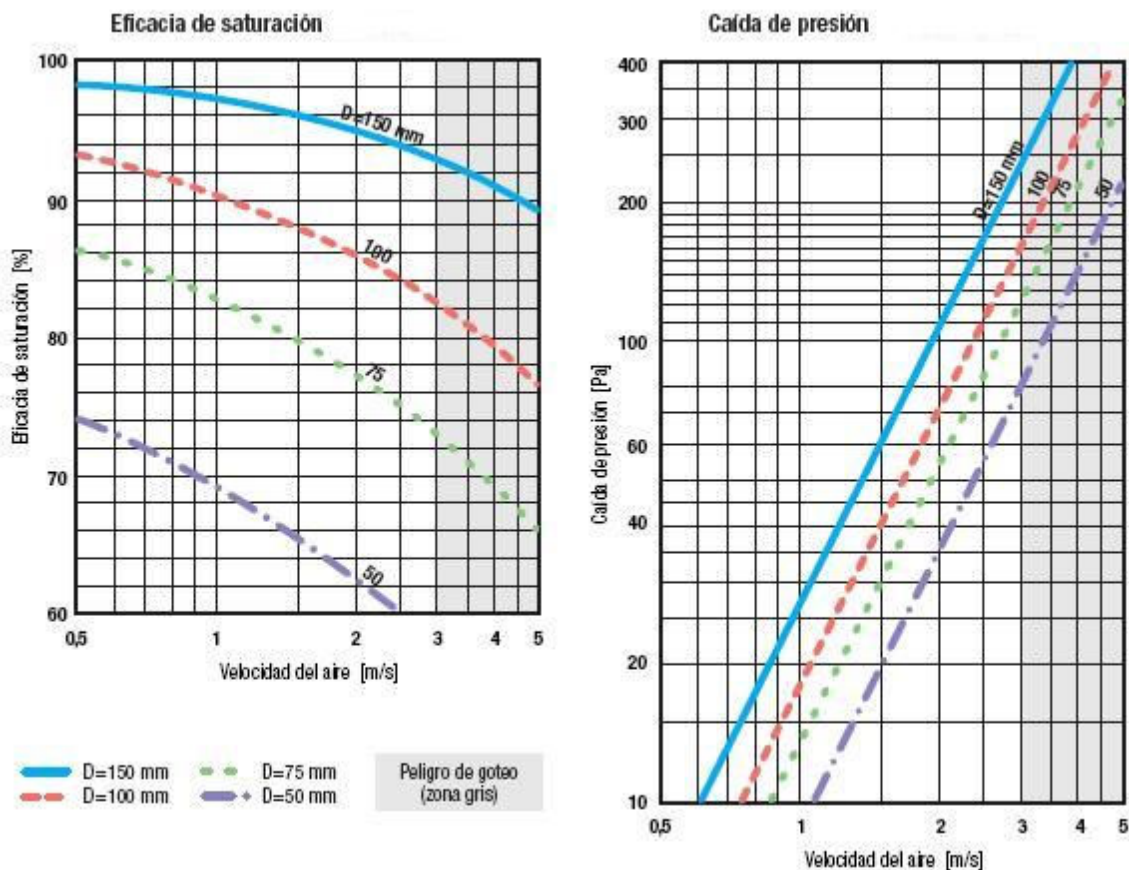
El programa permítela usuario definir las propiedades avanzadas de los wet pads que serían:

- n , usado como exponente en la ecuación de la eficiencia.
- k , usado en la ecuación de pérdidas de carga $K = k \cdot b_{w-p}$
- a , usado en $\alpha = a \cdot b_{w-p}$

Para obtener la densidad media de impulsión, se aproxima el movimiento en el diagrama psicrométrico como uno a entalpía constante, de esta manera se obtiene la densidad de impulsión media.

El caudal de agua deber ser conocido por el usuario ya que este determinará completamente las curvas de eficiencia que sirven para caracterizar el wet pad.

Básicamente se encuentran dos tipos de wet pads, el CELdek y el GLASdek. Ambos se diferencias en el material con el que se fabrica la matriz y por tanto en las pérdidas de carga asociadas.



Donde el coeficiente de flujo $c[m^3/(sPa^n)]$ y el exponente adimensional del flujo n se determina experimentalmente. Para flujo laminar, $n=1$, para flujo turbulento $n=0.5$; por lo que para flujos de transición n estará entre 0.6 y 0.7.

El usuario definirá el valor de las constantes según las características de paso.

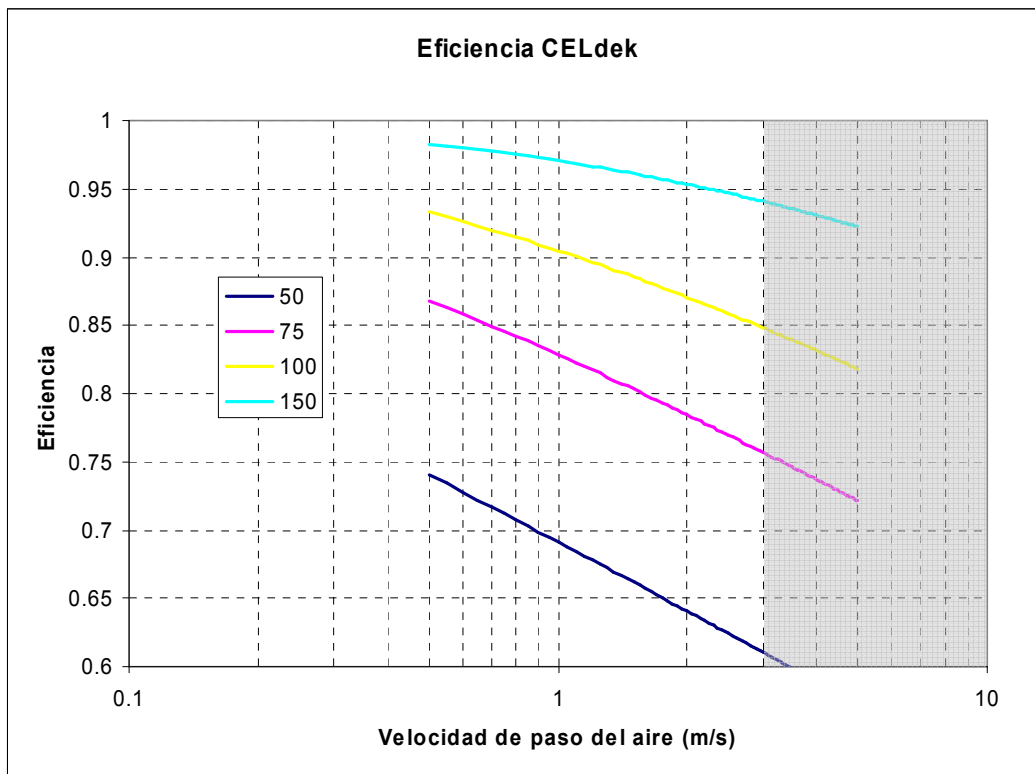
En el programa se ofrecerá la posibilidad de definir la entrada de aire en la planta, desde la zona de impulsión; la salida del aire hacia extracción; y el paso del aire en la misma planta, con o sin puertas, y estas, a su vez, con o sin rejillas.

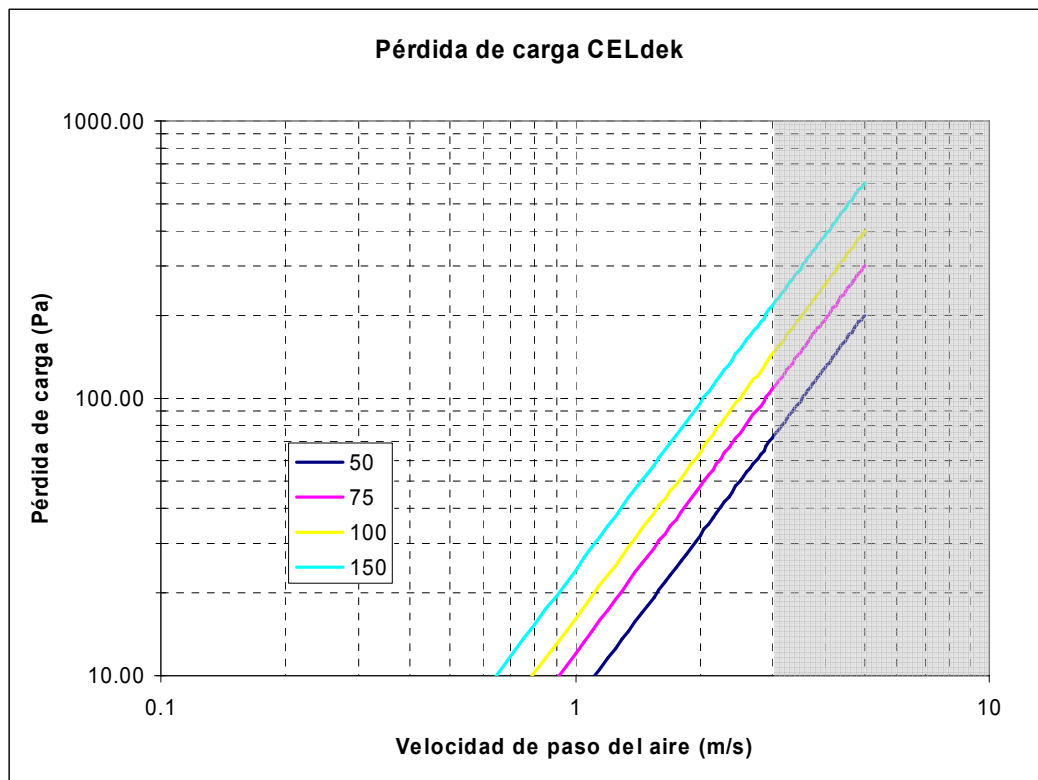
El coeficiente de flujo es una función de la geometría del orificio.

Para caracterizar este componente se ha buscado el valor de los parámetros k , α y n que mejor ajustan las curvas anteriores. En este caso:

$$k=160, \alpha=23.5, n=0.2$$

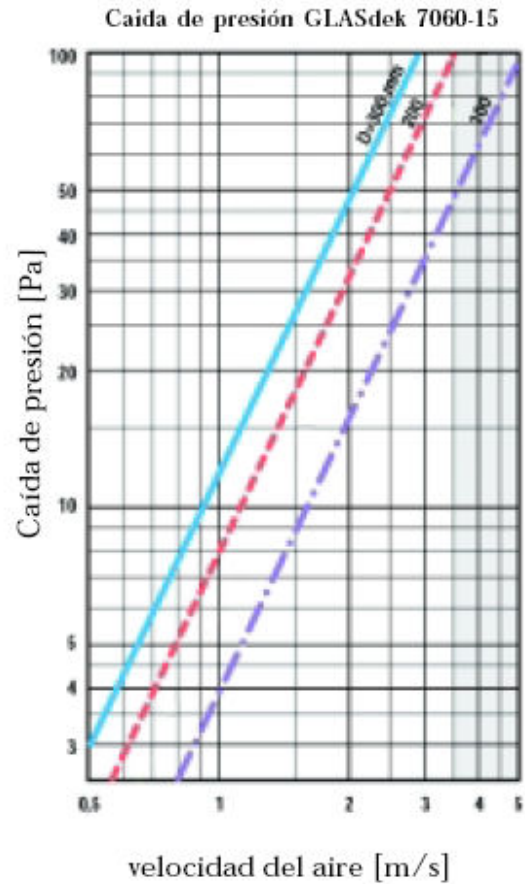
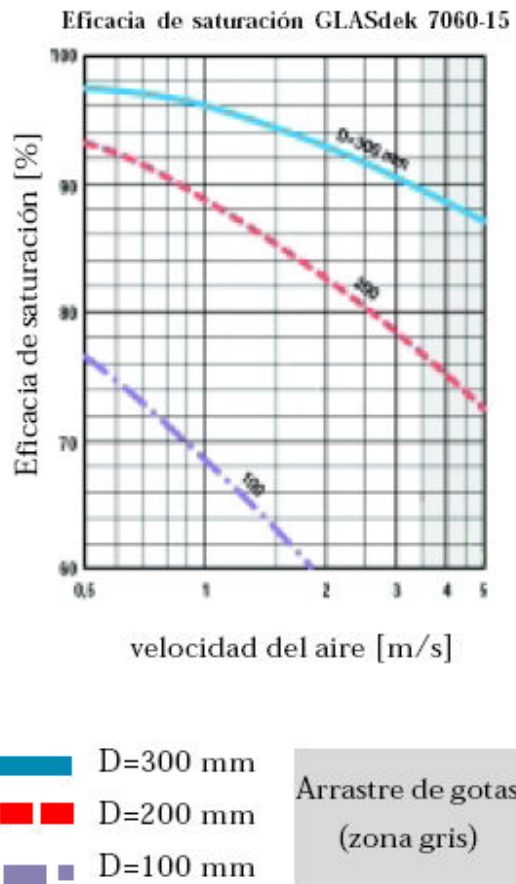
Y las curvas resultantes del modelo:





Como puede verse estas curvas aproximan fielmente a las dadas por el fabricante.

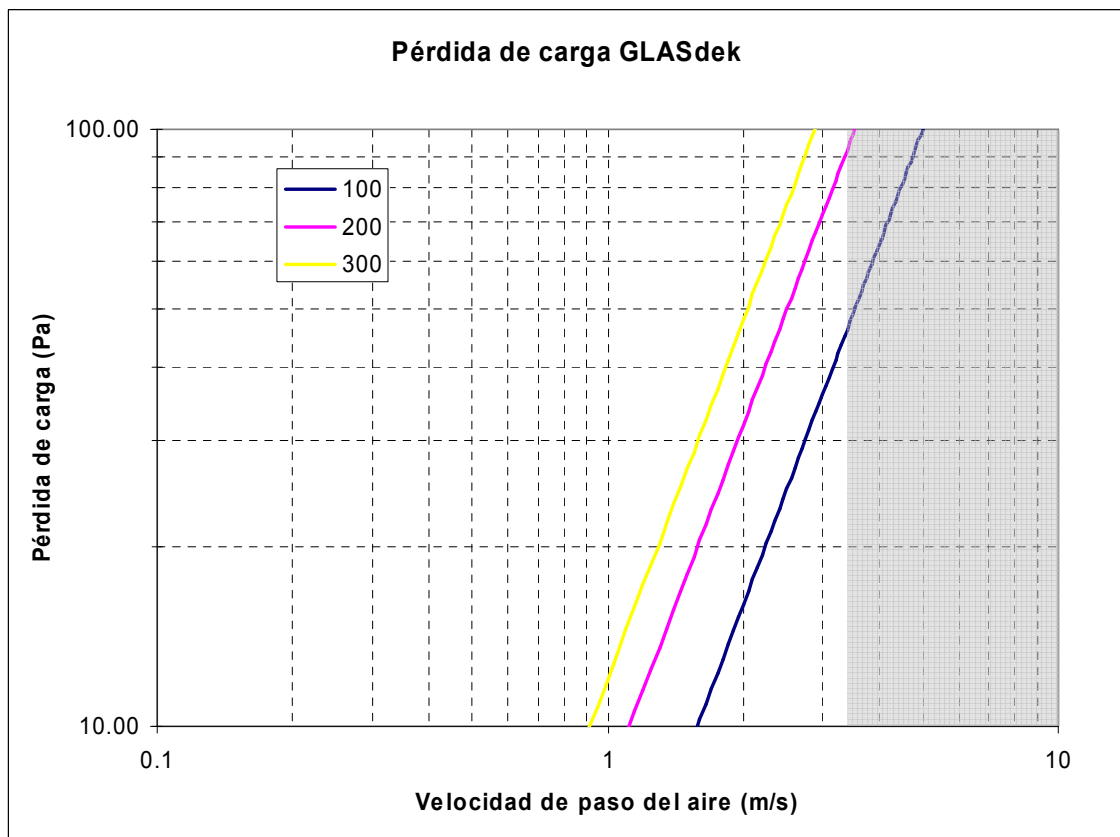
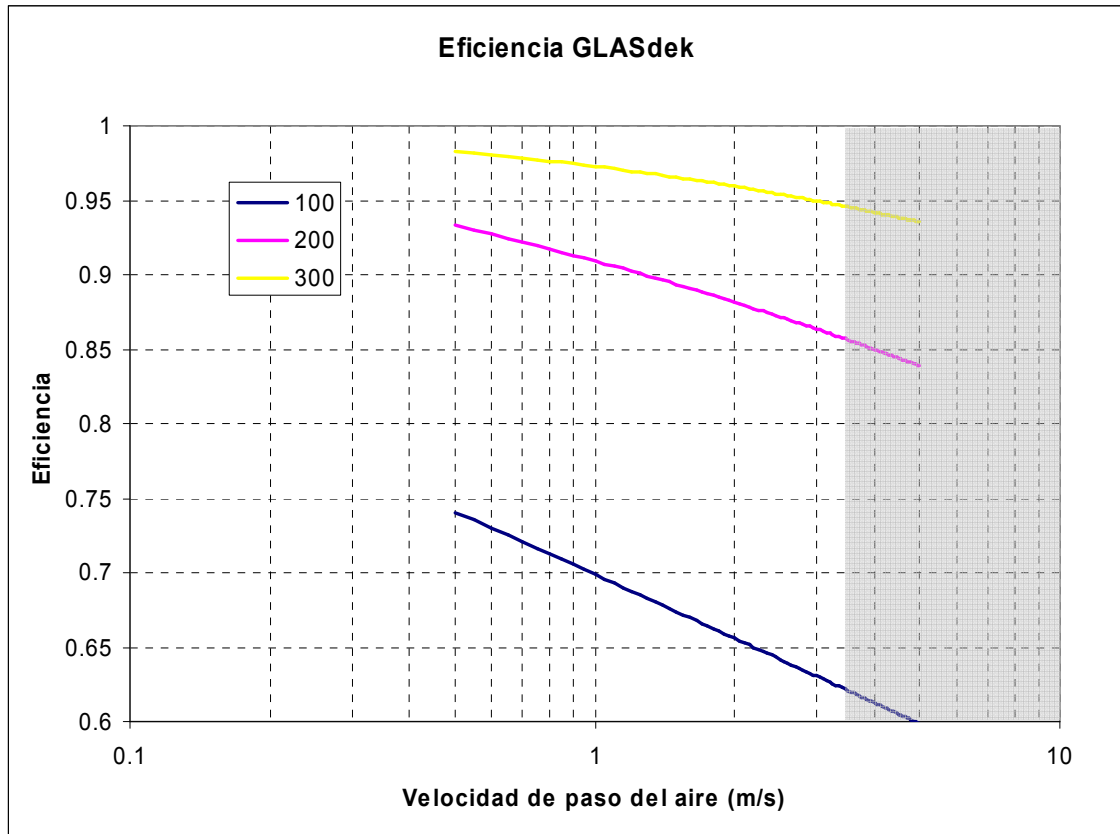
Para el sistema GLASdek las curvas características son las siguientes:



Para caracterizar este componente se ha buscado el valor de los parámetros k , α y n que mejor ajustan las curvas anteriores. En este caso:

$$k=40, \alpha=12, n=0.17$$

Y las curvas resultantes del modelo:



5.4.4. Rejillas

El flujo de aire por el interior de rejillas se ha caracterizado mediante la expresión:

$$\Delta p = (Q/c)^{1/n}$$

Donde el coeficiente c [$\text{m}^3/(\text{s Pa}^n)$] y el exponente n [adimensional] se obtienen mediante experimentos y no tienen significado físico. El usuario los podrá obtener mediante la consulta a catálogos de fabricantes. Para flujo laminar $n=1$, y para turbulento $n=0.5$. Las rejillas autorregulables son rejillas controladas por la presión y suministran un flujo de aire constante a partir de un incremento de presiones dado. Esta baja dependencia con la presión se traduce en un valor de n cercano a 0.1.

Para más detalles se recomienda la referencia [9].

5.5. MANUAL DEL USUARIO

La imagen sirve de esquema simplificado de nuestro sistema. Hay tres partes, la zona de impulsión (izquierda), la zona central y la extracción (derecha). Incluso, permitirá al hacer clic sobre la zona interesada, una vez activada, cambiar las propiedades de manera fácil y rápida.

Propiedades: En esta pestaña se fijarán las condiciones interiores / exteriores existentes (Temperatura, Humedad relativa), se debe introducir además los datos de velocidad del viento, la altura del lugar con respecto al nivel del mar (para poder tenerlo en cuenta en las propiedades del aire), y la altura de cada planta.

En este cuadro se activarán la torre de extracción y de impulsión, una vez que se haga aparecerá un cuadro que más adelante explicaremos.

The screenshot shows the PHDC software interface. On the left, there is a schematic diagram of a building system with three main zones: a central zone and two side zones (impulsión and extracción). Below the diagram, there are input fields for 'Longitud del recorrido (m)' and 'Cambios de dirección (codos)' for two plants. At the bottom, there are buttons for 'Correlación', 'Calcular', and 'Resultados'. On the right, there is a 'Propiedades' panel with sections for 'Esquema del sistema', 'Entrada de aire', 'Salida de aire', 'Paso del aire por puertas', and 'Infiltraciones'. Each section contains radio buttons or checkboxes to select different options.

Se pueden elegir desde una a cuatro plantas para el cálculo.

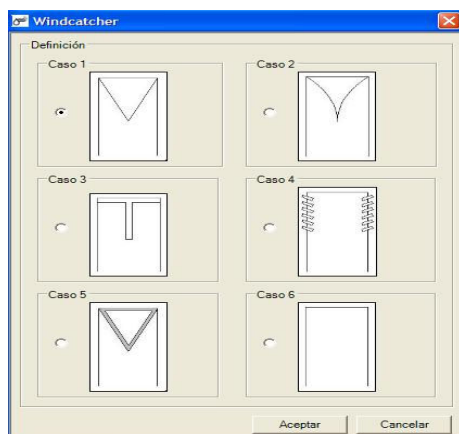
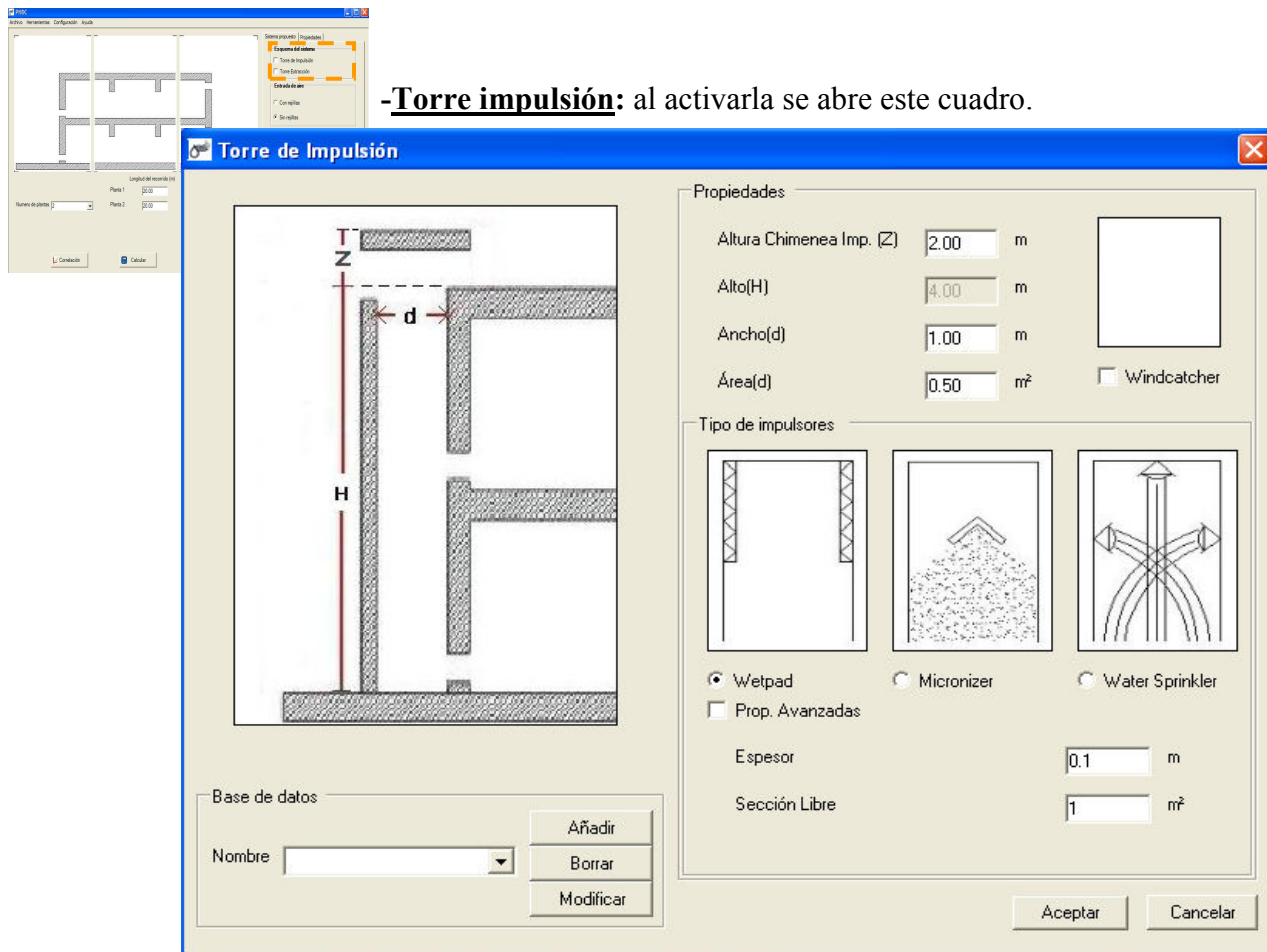
Se puede definir con este botón si se conocen las características de las infiltraciones existentes.

Estos botones nos permitirán obtener los resultados: **“calcular”** resolverá el problema mostrando los resultados en una nueva pantalla, esta se puede volver a ver con el botón **“resultados”**, mientras que el botón **“correlación”** dará el caudal de cada planta en función de las variables elegidas por el usuario en la pestaña propiedades.

Fijaremos en cada planta la longitud total a recorrer por el aire desde la entrada hasta la salida, definiendo los cambios de dirección (codos) por su longitud equivalente.

Estos tres cuadros nos permitirán fijar las características del paso de aire entre zonas, bien con puertas o sin ellas, con o sin rejillas, así como en la entrada desde la zona de impulsión y en la salida hacia la extracción.

-Torre impulsión: al activarla se abre este cuadro.



coeficiente de presiones sobre la cubierta.

Windcatcher: En la parte superior derecha, encontramos las propiedades geométricas de la torre habiendo fijado la altura (H) por el número de plantas y altura de las mismas, se debe definir también la altura que sobresale la chimenea del edificio (Z), ancho de la torre (d), y área de la torre (d). Además permite añadir y definir si posee un captador de aire en la torre haciendo clic sobre el botón de *Windcatcher*. Se ofrecen aquí cinco tipos de captadores, dando una sexta posibilidad de definir un nuevo captador al usuario. La característica para definir un Windcatcher es su

Tipo de Impulsores

Se selecciona el tipo de impulsor:

micronizer, water sprinkler o wetpad

☐ Wetpad	☒ Micronizer	☐ Water Sprinkler
Altura Micron.(p)	0.5	m
☐ Diámetro de Gota	30	Micro m.
Caudal de Agua	0.0001	kg/s

Aparece una pantalla asociada a cada una de ellas en la que se definirán como en este ejemplo, para **micronizer** se debe marcar: la altura a la que se encuentra el micronizador (p), el diámetro de gota que genera (en Micro metros), y el caudal de agua que impulsa (en Kg/seg).

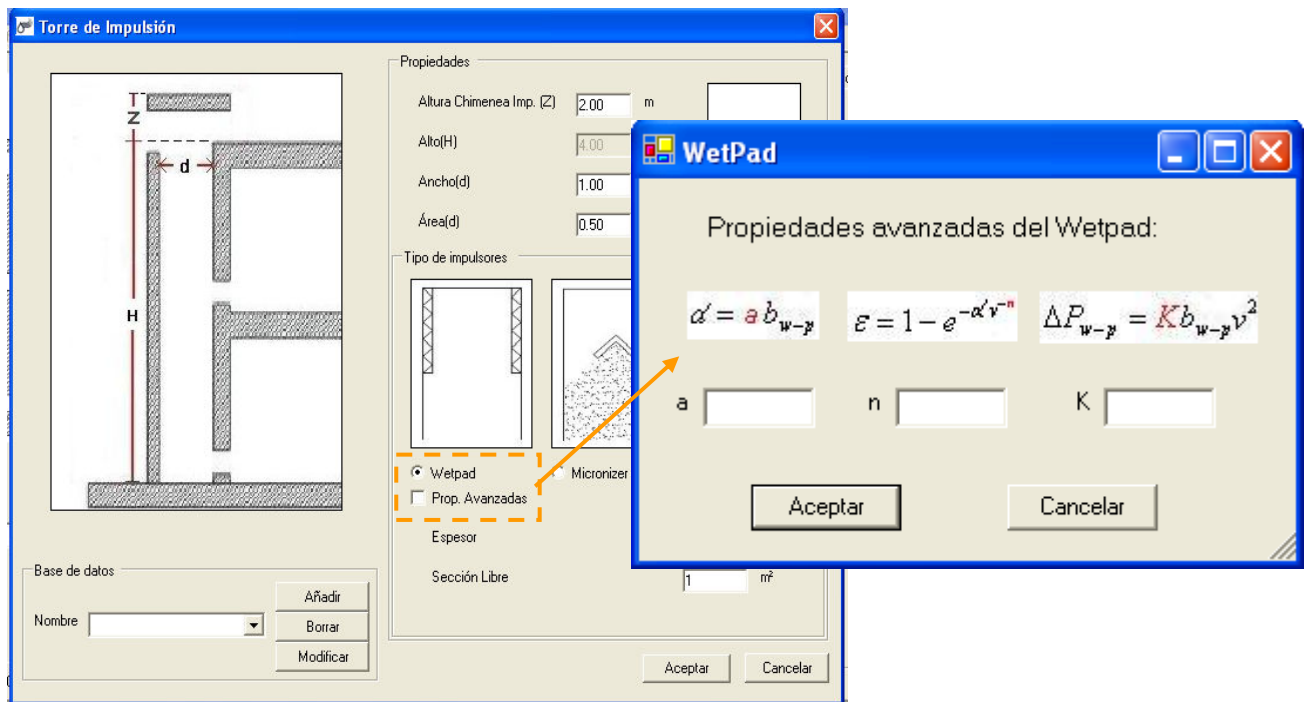
Conceptualmente “diámetro de gota” hace referencia al diámetro medio de Sauter, es decir, asemejar las gotas a esferas con un diámetro tal, que se conserve la relación volumen/superficie de las gotas.

Si se marca la casilla junto a Diámetro de Gota, cambia en la pantalla de definición el diámetro de Gota por el de la Distancia a la que el caudal impulsado se encuentra evaporado al cincuenta por ciento (50%). Este parámetro “Distancia” junto con el “diámetro de gota” antes comentado, definen la dependencia de la tecnología usada en el proceso de micronización. En definitiva, “Distancia de evaporación del cincuenta por ciento del caudal impulsado” es una medida de la efectividad de ese dispositivo, donde intrínsecamente se están considerando el resto de parámetros del mismo.

Se recomienda consultar los fundamentos técnicos del programa para un correcto funcionamiento y distinción entre ambos casos.

☐ Wetpad	☒ Micronizer	☐ Water Sprinkler
Altura Micron.(p)	0.5	m
☒ Distancia del 50 % de evaporación	30	m
Caudal de Agua	0.0001	kg/s

En el caso de seleccionar **wetpad**, se definirán como características básicas el espesor del mismo y la sección libre de paso. También es posible marcar con el botón inferior remarcado en la figura las Propiedades Avanzadas donde se debe cumplimentar la siguiente pantalla.



En el caso de seleccionar **water Sprinkler**, se definirán como características básicas la altura a la que se encuentra el micronizador (p), el diámetro de gota que genera (en Micro metros), y el caudal de agua que impulsa (en Kg/seg) como vemos en la siguiente imagen de la pantalla.

☐ Wetpad	☐ Micronizer	☒ Water Sprinkler
Altura Micron.(p)	0.5	m
Diámetro de Gota	400	Micro m.
Caudal de Agua	0.1	kg/s

Se puede ver como aparecen ilustraciones con los esquemas simplificados de cada opción y de cómo queda definida finalmente la torre de impulsión para cada tipología seleccionada. En la parte inferior se tiene la posibilidad de cargar una tipología guardada previamente, genera una nueva, seleccionar una de una base de datos propia y/o modificar la que interese al usuario.

-Torre extracción: al activarla se abre este cuadro.

Similar al caso anterior de Torre de Impulsión, salvo que ahora se definirá el tipo de Extracción. En la parte superior derecha, encontramos las propiedades geométricas de la torre habiéndose fijado la altura (H) por el número de plantas y altura de las mismas, se debe definir también la altura que sobresale la chimenea del edificio (Z), ancho de la torre (d), y una variable nueva, la sección libre, para poder caracterizar la pérdida por la descarga no ideal. Se debe definir que tipo de salida de aire posee la torre, ver el siguiente punto.

Tipos de Extractores: Se ofrecen tres posibilidades: *Ventilador*, *Windturbine* o *Ninguno*, las dos primeras son caracterizadas por la Capacidad de extracción de las mismas (en Pascales).

Entrada de aire, salida de aire, puertas e infiltraciones:

Como se puede observar, se marcará las características de paso del aire a la entrada, a la salida, y entre los locales interiores a través de puertas. Por defecto aparecen los pasos sin rejillas y sin puertas. Las rejillas para cada opción estarán determinadas por sus características respectivas del Coeficiente de flujo (c [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}^n$]) y el Exponente adimensional del flujo (n), para más información consultar el documento de fundamentos técnicos.

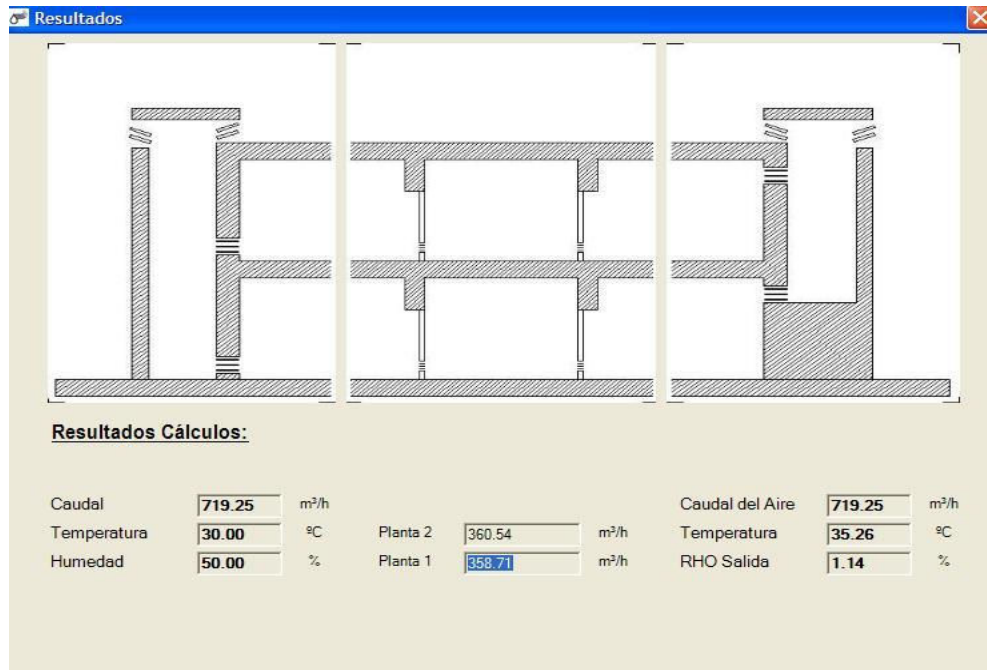
The image shows a software interface with two main sections: 'Entrada de aire' and 'Salida de aire'. Each section has two radio buttons: 'Con rejillas' (selected in both) and 'Sin rejillas'. To the right of each radio button are two input fields labeled 'c' and 'n'. In the 'Entrada de aire' section, the 'Con rejillas' option is highlighted with a dashed orange box, and a dropdown menu is open showing three options: '1ª: 0.03', '2ª: 0.03', and '3ª: 0.03'. The 'Salida de aire' section is similar but currently shows 'Sin rejillas' selected.

El programa permite cambiar los parámetros de las rejillas de entrada y salida del aire en cada planta, al activar la existencia de rejillas, el programa presentará una apariencia como la mostrada.

En la misma se puede observar un menú desplegable en el que se elegirá la planta, una vez elegida, en el cuadro superior daremos un valor y certificaremos pulsando sobre el icono con el símbolo del parámetro

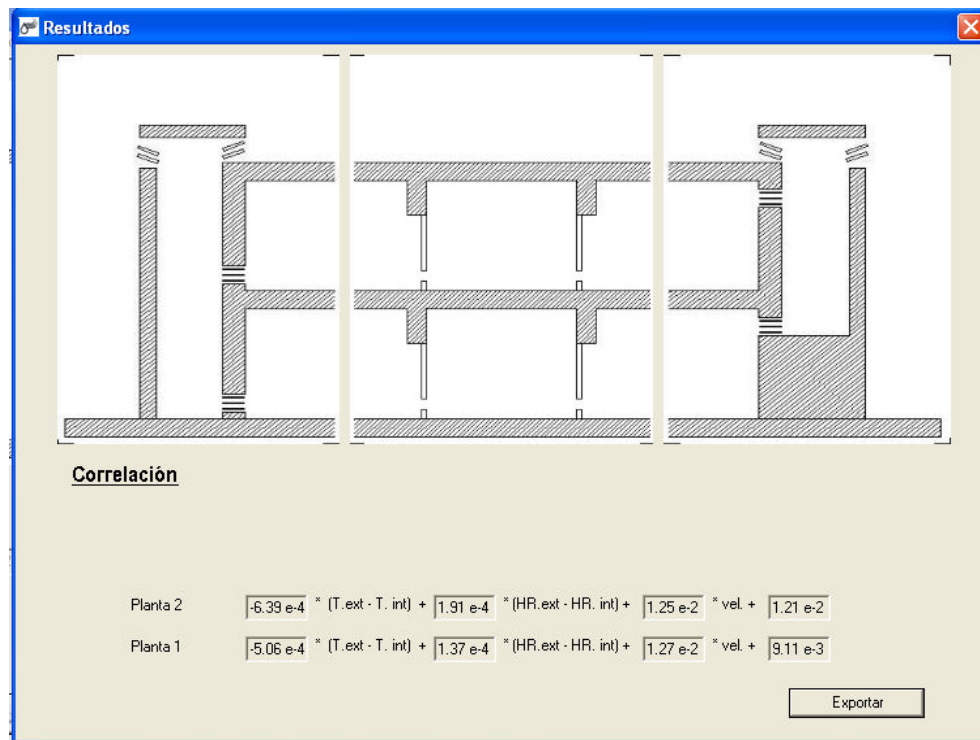
definido. Se deberá repetir la secuencia para cada planta y parámetro, si no se asignarán valores por defecto.

-Cálculos y resultados: Al ejecutar “calcular” aparecerá una ventana como la siguiente:



Se puede observar de izquierda a derecha los resultados correspondientes a cada zona de la ilustración, mostrando los caudales que pasan por cada planta. Bajo la zona de impulsión aparecen el caudal total que entra a través de la chimenea, y los datos de temperatura y humedad relativa del caudal impulsado. En la parte central se muestran los caudales en cada planta.

-Correlación: Cuando se pulsa el botón “Correlación”, aparece una ventana como la mostrada en el caso ejemplo. Se obtiene una correlación del caudal que circula en cada planta en función de las variables que aparecen mostradas. Se permite exportar esta correlación para su posterior uso mediante el botón **Exportar**.

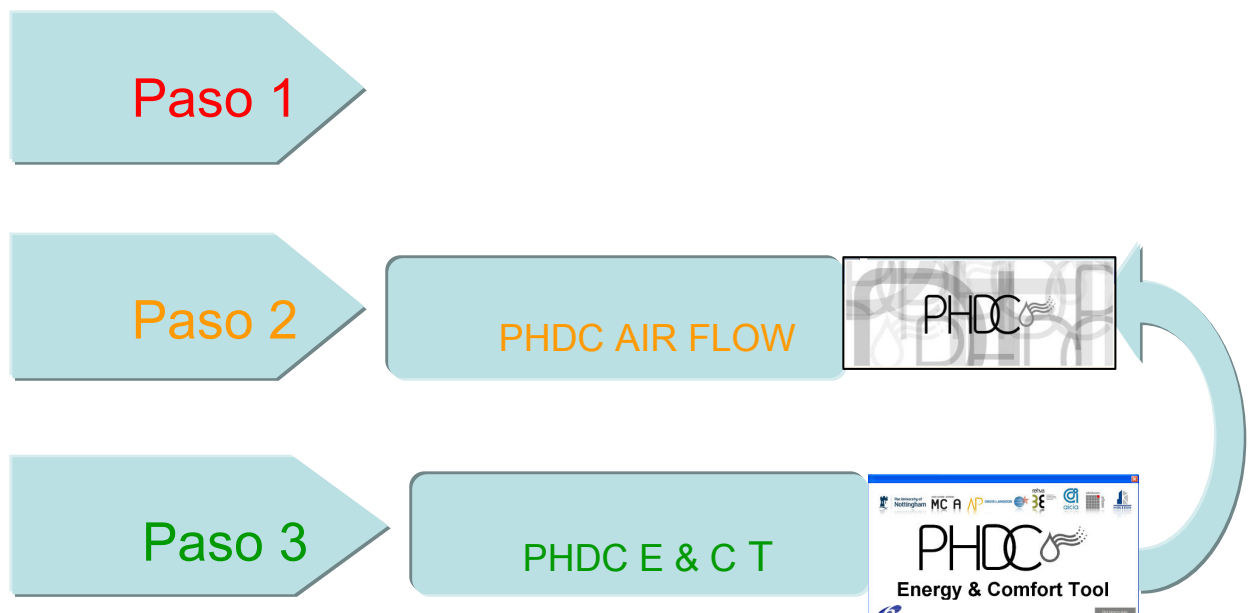


5.6. EJEMPLO: PREDISEÑO USANDO PHDC

En este punto se va a realizar el prediseño de un edificio usando la herramienta AirFlow, con el fin de demostrar la utilidad del programa y las amplias posibilidades que ofrece.

La realización del ejemplo se divide en tres pasos, los dos últimos son iterativos y se realizan con las dos herramientas de PHDC, como muestra la figura inferior:

1. Análisis de datos de partida (Características del edificio, localización y necesidades de refrigeración/ventilación)
2. Diseño de un sistema PHDC para este edificio. AirFlow
3. Evaluación de la bondad del sistema elegido, y su modificación si es necesario para satisfacer las necesidades prescritas. Energy & Confort.



■ Datos de Partida

1. Características del edificio

Los datos necesarios son los siguientes:

- Bloque de pisos
- 3 Plantas
- Altura de planta = 3 m
- Área de cada planta = 75 m² (13.4 m x 5.6 m)
- Temperatura seca interior fijada = 25 °C
- Humedad relativa interior fijada = 50%

2. Localización

Los datos necesarios son los siguientes:

- Madrid
- 589 m de altura sobre el nivel del mar
- 2 m/s velocidad de viento
- Temperatura seca exterior promedio verano = 35 °C
- Humedad relativa exterior promedio verano = 20%

3. Estimación de las necesidades de refrigeración

- Ganancias Internas

- Personas :	4 x 80W	= 320W
- Iluminación:	3W/m ²	= 225W
- Equipos:	3W/m ²	= 250W
- Total de ganancias internas		= 795W

- Ganancias Externas

- Ganancias a través de cubierta	= 475W
- Muros y huecos	= 780W
- Total	= 1255W

Total de ganancias internas y externas por apartamento 2050W

4. Cálculo de caudales de ventilación

- Consideraciones:

- Temperatura de salida de la torre de impulsión 24°C
- PHDC cubrirá un tercio de las necesidades de refrigeración Q/3
- Volumen de cada apartamento = 3*75=225 m³

$$V \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{Q_{cooling \text{ needs}} [W]}{1200 \left[\frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C} \right] \cdot (T_{indoor} - T_{tower \text{ outlet}}) [^\circ C]}$$

$$V \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{\frac{1}{3} \cdot 2050 [W]}{1200 \left[\frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C} \right] \cdot (25 - 24) [^\circ C]} = 0.569 \left[\frac{m^3}{s} \right] = 2050 \left[\frac{m^3}{h} \right] = 9.1 [ACH]$$

Se necesitan 9.1 renovaciones hora de cada planta a satisfacer por PHDC. Esta es una decisión importante: la evaluación del porcentaje de demanda de climatización a cubrir por el sistema.

■ PHDC – AirFlow

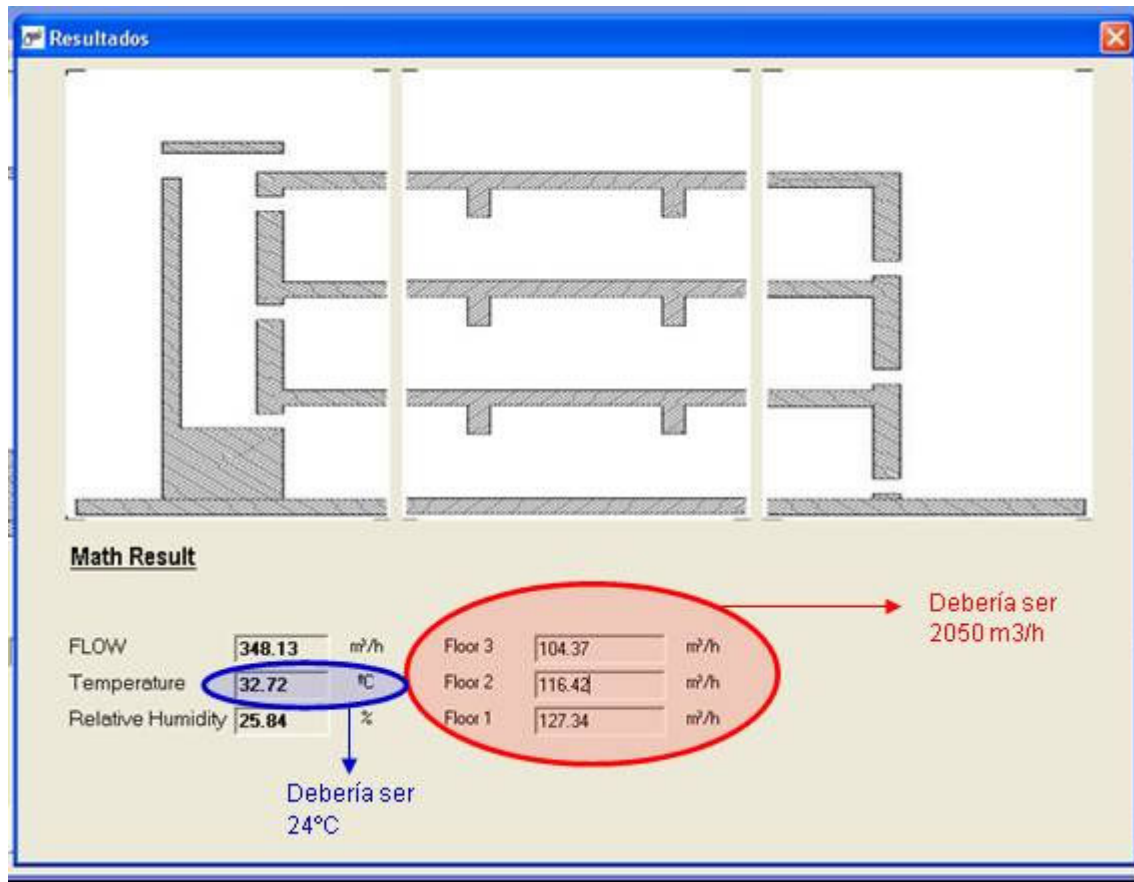
1. Datos generales – Propiedades (Aire exterior/interior, Localización y edificio)

The screenshot shows the main interface of the PHDC Air Flow software. On the left, there is a diagram of a building floor plan with three rooms. Below the diagram, there is a 'Floors' dropdown menu set to '3'. To the right of the diagram, there are input fields for 'Length of the Flow Path (m)' and 'Changes of Direction (no.)' for each of the three floors. The values are: Floor 1 (9, 1), Floor 2 (9, 1), and Floor 3 (9, 1). At the bottom, there are three buttons: 'Correlation', 'Calculate', and 'Results'. On the right side, there is a 'Properties' panel with the following inputs: Outdoor Temperature (35 °C), Indoor Temperature (25 °C), Outdoor Relative Humidity (20 %), Indoor Relative Humidity (50 %), Wind Speed (2 m/s), Height Respect to Sea Level (589 m), and Floor Height (2.5 m).

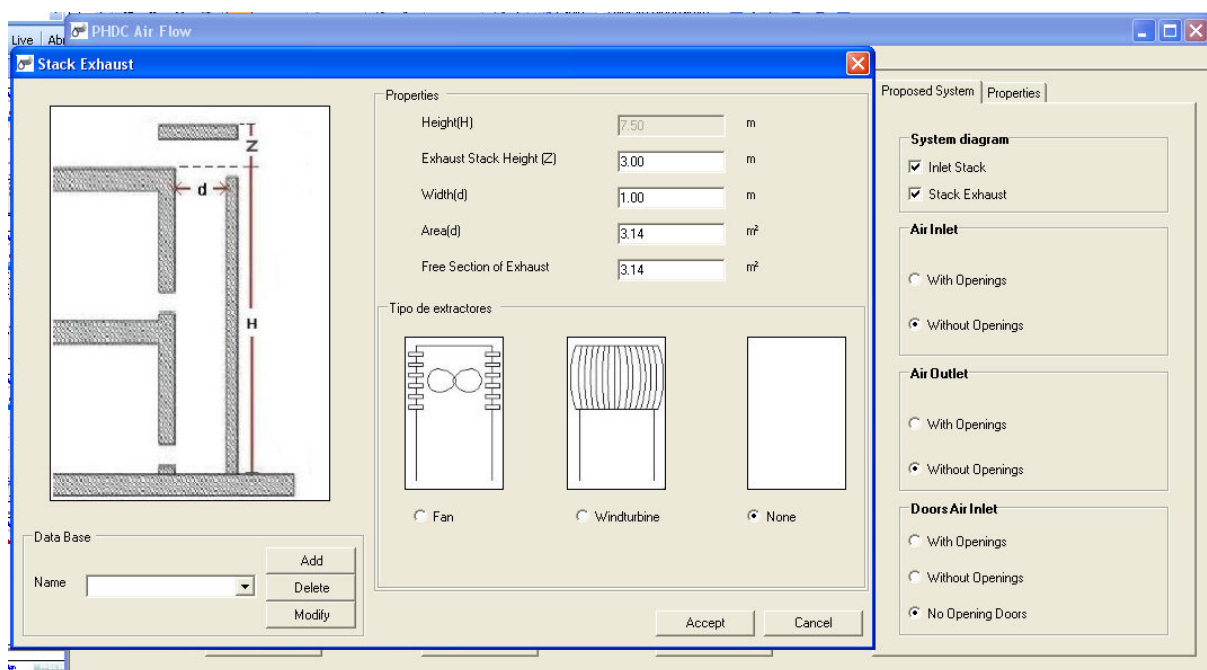
2. Datos generales – Sistema de impulsión propuesto (Sistema de Refrigeración)

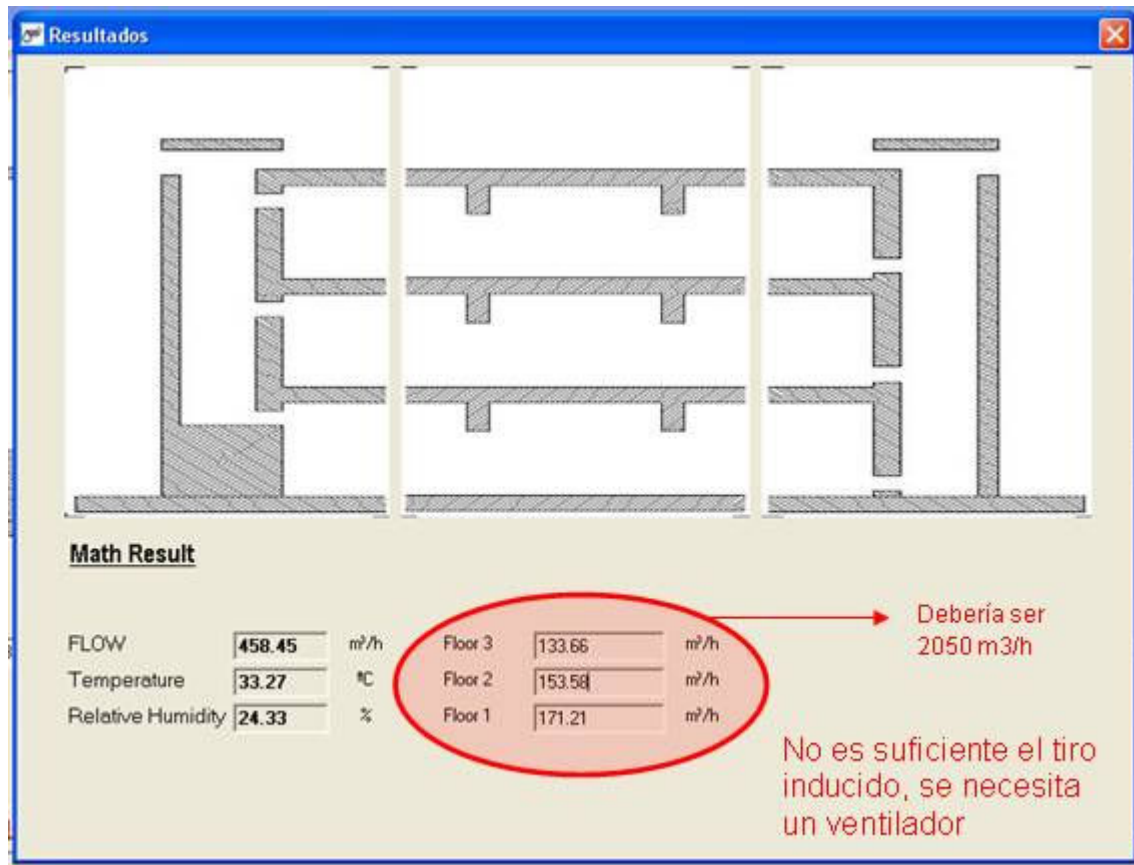
The screenshot shows the 'Inlet Stack' dialog box in the PHDC Air Flow software. It contains a diagram of an inlet stack with labels for height (Z), height (H), width (d), and area (d). The 'Properties' section includes: Inlet Stack Height (Z) (2.00 m), Height (H) (7.50 m), Width (d) (1.00 m), and Area (d) (3.14 m²). There is a 'Windcatcher' checkbox. The 'Evaporative System' section has three options: 'Wetpad', 'Micronizer' (selected), and 'Water Sprinkler'. Below these are inputs for 'Micronizer Height (p)' (0.5 m), 'Diameter of Water Droplets' (30 Micro m), and 'Water Flow' (0.0001 kg/s). At the bottom are 'Accept' and 'Cancel' buttons. On the right, there is a 'Proposed System' panel with a 'System diagram' section containing 'Inlet Stack' (checked) and 'Stack Exhaust' (unchecked). Below are sections for 'Air Inlet' (radio buttons for 'With Openings' and 'Without Openings'), 'Air Outlet' (radio buttons for 'With Openings' and 'Without Openings'), and 'Doors Air Inlet' (radio buttons for 'With Openings', 'Without Openings', and 'No Opening Doors').

3. Resultados Preliminares (Sistema Pasivo)



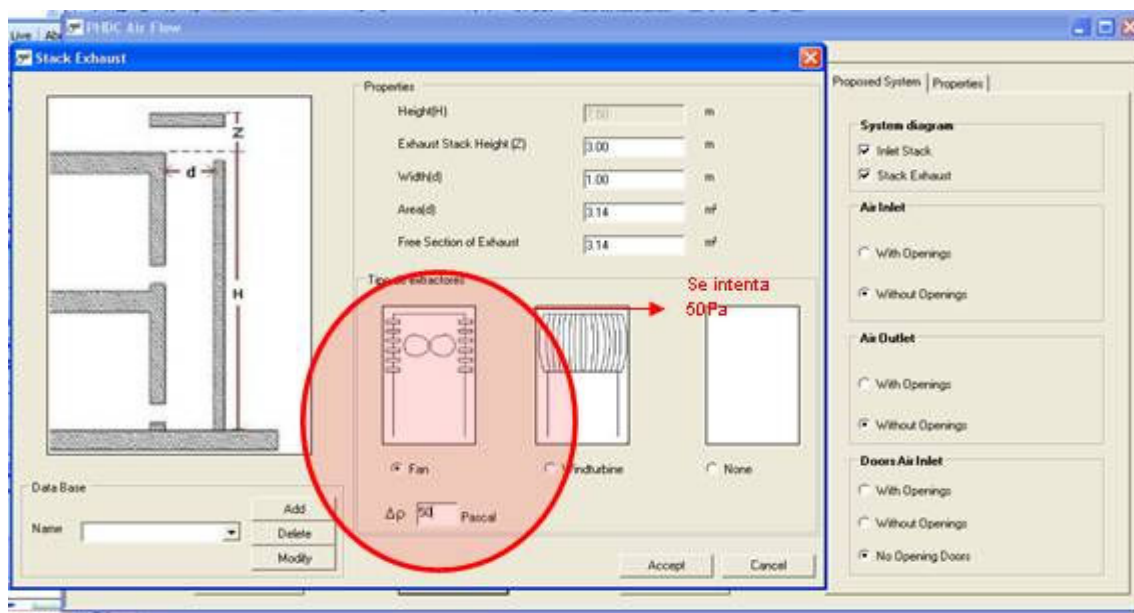
4. Objetivo: Obtener el caudal de ventilación. Incorporación de torre de extracción

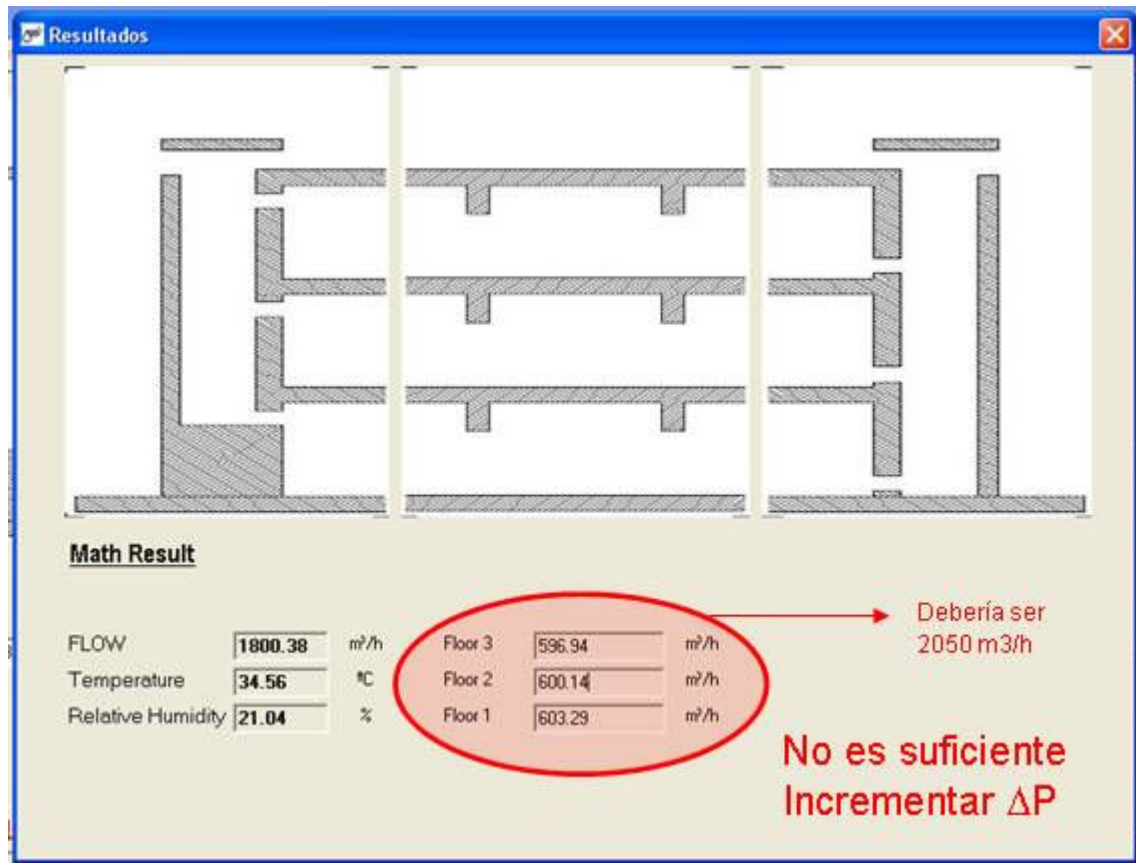




Esta torre de extracción se comporta como una chimenea solar, aumenta el caudal de aire circulante, manteniendo la pasividad del sistema.

5. Extracción mecánica en torre de salida (Híbrido)



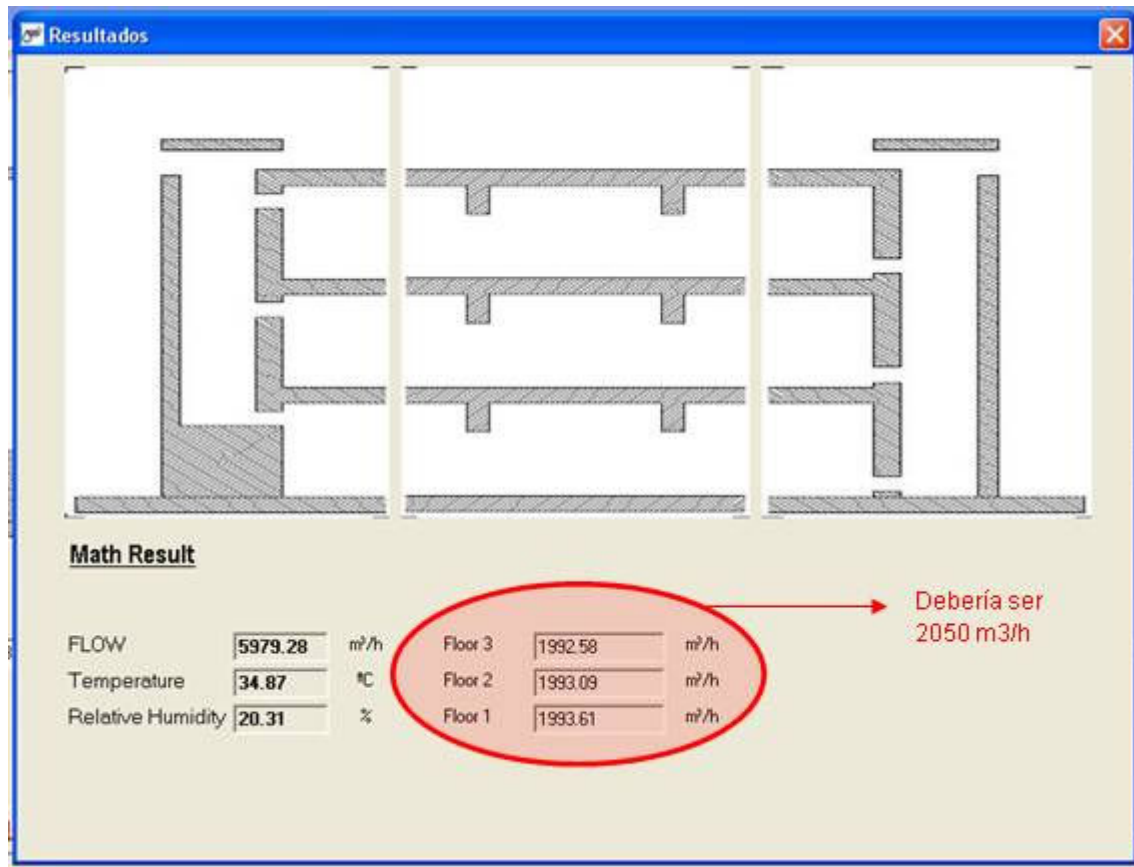


- Estimación del $\Delta P_{Extracción}$ del ventilador.

Empleando homología entre las curvas características de dos ventiladores, se puede estimar el punto de funcionamiento de otro ventilador de mayor potencia, que extraiga el caudal requerido con un mismo rendimiento.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_1 = k \cdot V_1 \\ \Delta P_2 = k \cdot V_2 \end{array} \right\} \rightarrow \Delta P_2 = \Delta P_1 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 = 50 \cdot \left(\frac{2050}{600} \right)^2 = 580 Pa$$

Se puede dar por aceptable este caudal por cada planta, para conseguir totalmente el deseado habría que aumentar un poco más la fuerza mecánica de extracción.

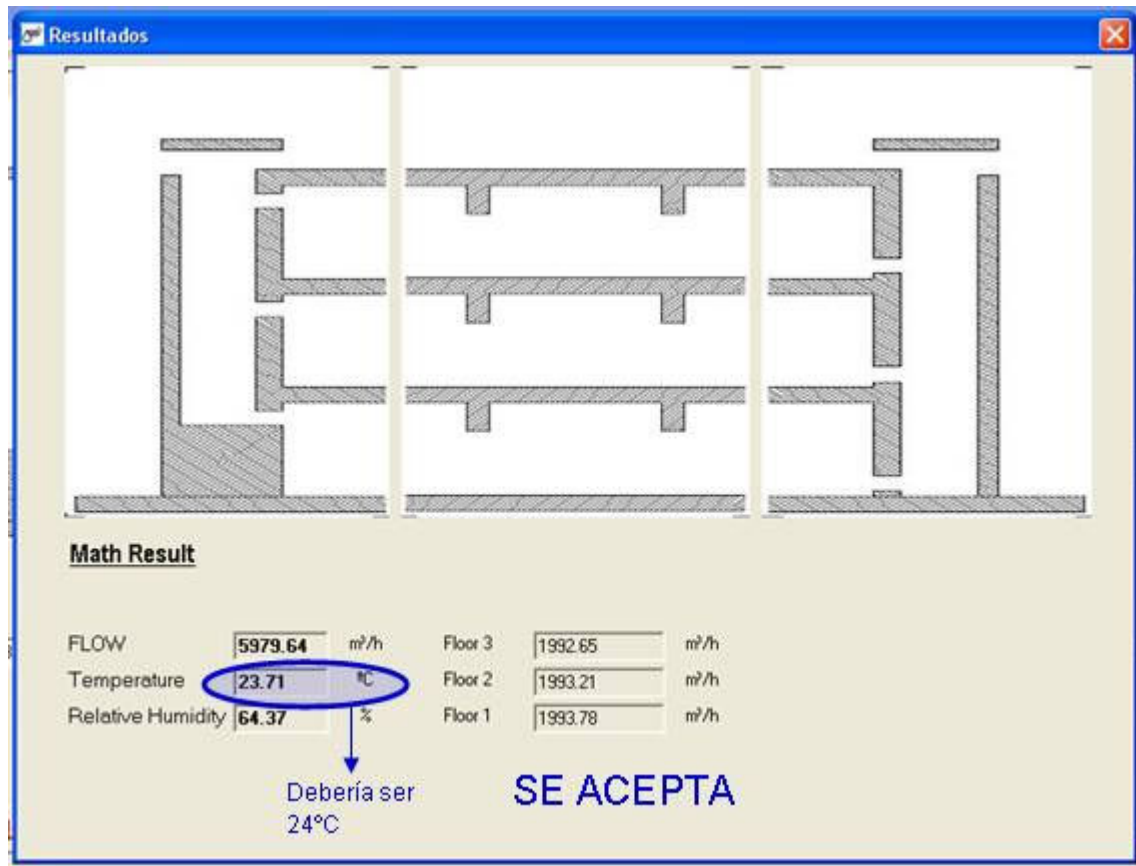


6. Objetivo: Temperatura de salida de la torre de impulsión

A partir de los fundamentos de la herramienta ya comentados, se puede obtener el caudal de agua aproximado que se debe inyectar para conseguir el enfriamiento deseado. T_{Out} es la temperatura de salida de la torre.

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \dot{m}_{agua} \cdot \lambda \cdot \varepsilon \\ Q = \rho \cdot C_p \cdot V_{aire} \cdot (T_{Int} - T_{Out}) \end{array} \right\} \rightarrow \dot{m}_{agua} = K \cdot (T_{Int} - T_{Out})$$

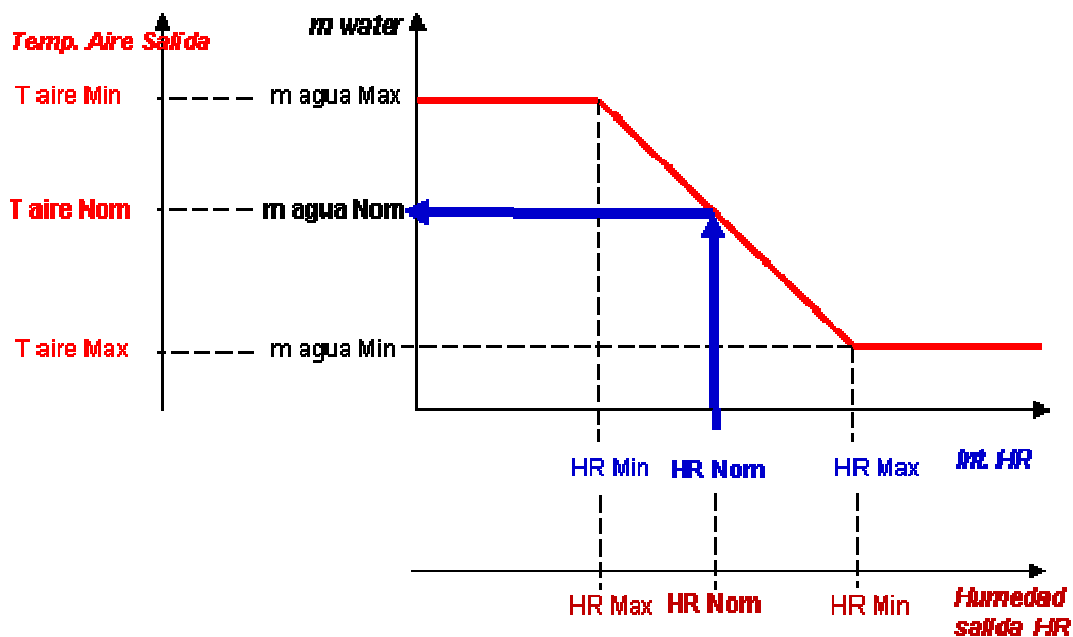
$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{agua_1} = K \cdot (T_{Int} - T_{Out1}) \\ \dot{m}_{agua_2} = K \cdot (T_{Int} - T_{Out2}) \end{array} \right\} \rightarrow \dot{m}_{agua_2} = \dot{m}_{agua_1} \cdot \frac{(T_{Int} - T_{Out2})}{(T_{Int} - T_{Out1})} = 0.001 \cdot \frac{(35 - 24)}{(35 - 34.87)} = 0.0085 \left[\frac{Kg}{s} \right]$$



El aumento del caudal de agua micronizado, consigue reducir la temperatura de impulsión, hasta un valor aproximado al deseado.

7. Correlación

La correlación es el elemento de conexión con cualquier otro programa, en este caso con “Energy & Comfort”. Para ello se establece el caudal de agua máximo y mínimo, alrededor del nominal con los que trabajará nuestro sistema de impulsión. De esta manera se consigue un control tipo rampa (lineal) del sistema de refrigeración, para poder evaluarlo en el comportamiento térmico del edificio.



Esta figura muestra el esquema de funcionamiento del sistema de impulsión, que tiene los siguientes valores:

Valores de temperatura conseguidos a la salida de la torre:

T aire Mín. = 20.8 °C T aire Nom = 23.7 °C T aire Máx = 26.4 °C

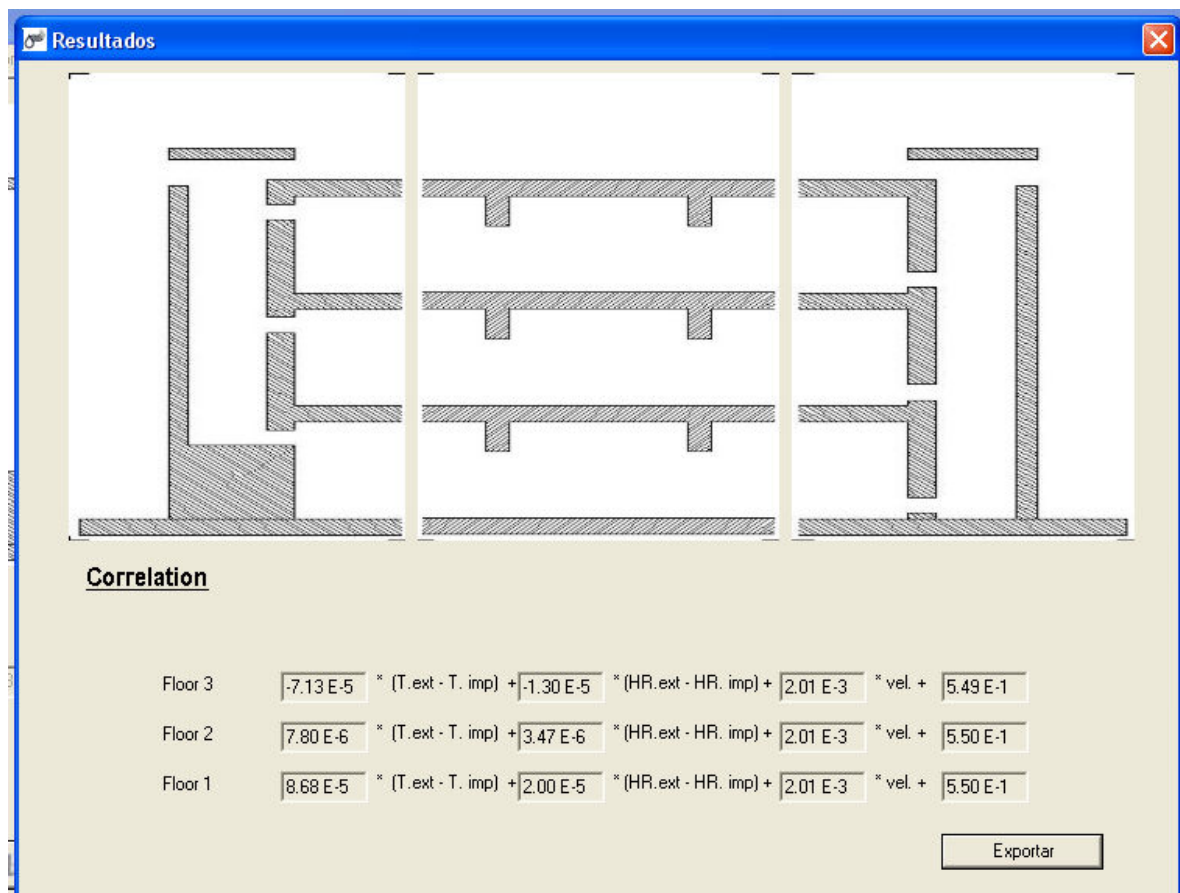
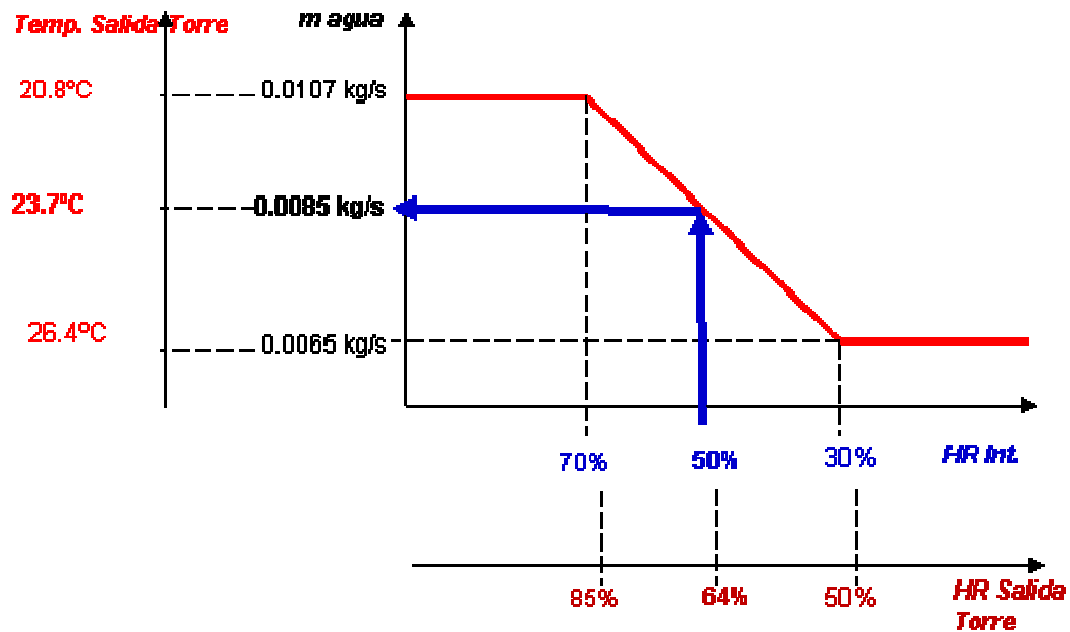
Valores de humedad relativa en el interior del edificio tras impulsión:

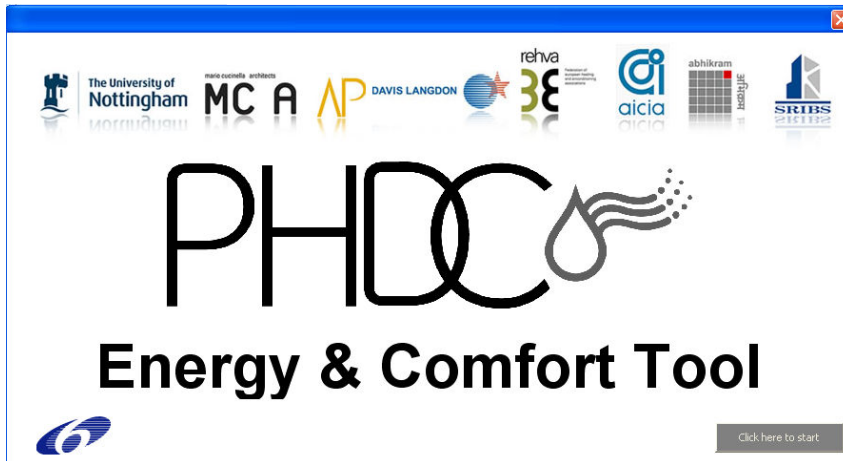
HR Mín. = 70% HR Nom = 50% HR Máx. = 30%

Valores de humedad relativa a la salida de la torre:

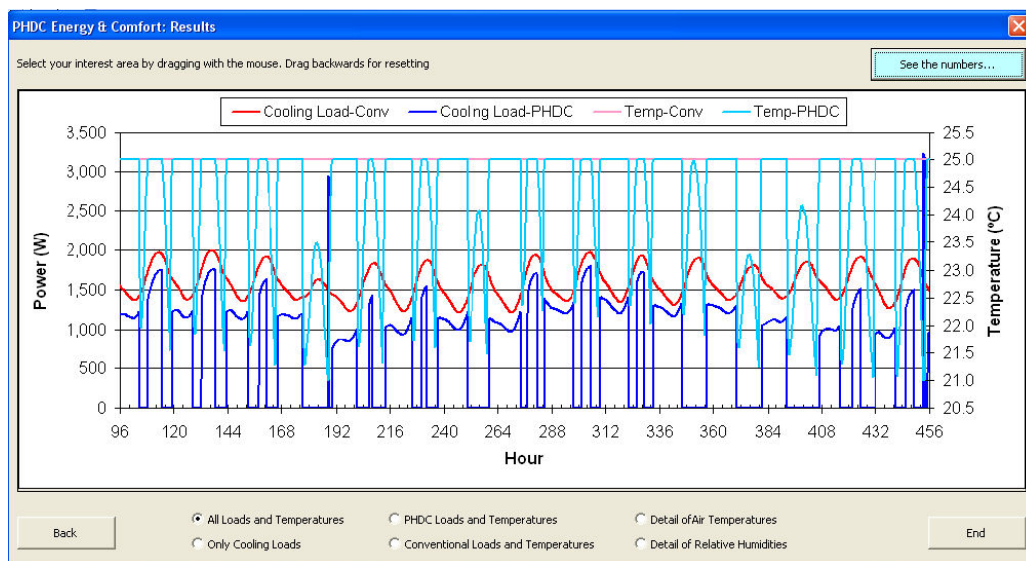
HR Mín. = 85% HR Nom = 64% HR Máx. = 50%

Resultando un esquema y una correlación de la siguiente manera:





El siguiente paso es importar esa correlación en el programa “Energy & Comfort”. Este programa queda fuera del alcance de este proyecto. Su principal objetivo es la evaluación del comportamiento térmico del edificio junto con la potencia consumida por los sistemas PHDC.



8. Conclusiones

El planteamiento seguido en la elaboración de este ejemplo es el que se debe seguir para el prediseño de un sistema de refrigeración basado en sistemas de enfriamiento evaporativo, de un modo fácil y rápido.

6. BIBLIOGRAFIA

1. “Passive Cooling with Natural Draft Cooling Towers in Combination with Solar Chimneys”. Cunningham, W.A. y Thompson, T.L.: (1986). In Passive and Low Energy Housing, Pecs, Hungría. PLEA conference. The Hurgarian Society of Sciences.
2. “Acondicionamiento climático de los espacios abierto en Expo’92-Gotas”. Departamento de ingeniería energética y fluido-mecánica. Cátedra de Termotecnia. Escuela Técnica superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Sevilla. Avenida los descubrimientos S/N. Sevilla (España)
3. “Passive Downdraught Evaporative Cooling Applied on Existing Fabric: Using Traditional Chimney as Case Study in Portugal”. Ana Cláudia Martins de Melo and Manuel Correia Guedes. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal
4. “Pulverización y Micronización en Enfriamiento Evaporativo”. Rafael Martín Salinas. Proyecto Final de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros Sevilla.
5. “Modelización numérica de penachos de atomizadores para aplicación al enfriamiento evaporativo de tiro invertido en edificios no residenciales”. Proyecto Final de Carrera de Ramón González Tévar.
6. “Design Guidelines for Energy Efficient Buildings”. Architect Jiten Prajapati. Mumbai
7. “Diseño Climático de Espacios Abiertos”. Instituto Andaluz de Energías Renovables. José Guerra Macho (Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla) y José Manuel Cejudo López (Escuela Técnica Superior de ingenieros Industriales. Universidad de Málaga)

8. “Refining the use of evaporation in an experimental down-draft cool tower”. D. Pearlmutter, E. Erell y Etzion, I. A. Meir, H. Di. The Desert Architecture Unit. The J. Blaustein Institute for Desert Research. Ben-Gurion University of the Negev. Sede-Boker Campus. 84990 Israel.
9. Building Ventilation, the state of the art, Santamouris M., Wouters P., Earthscan, London, Sterling, VA, 2006. Chapter 2 by Axley J.
10. Natural Ventilation in Buildings, a design handbook, Allard F., Santamouris M., London, James & James, 1998. Chapter 2 by Allard F. and Álvarez S.
11. Refining the use of evaporation in an experimental down-draft cool tower, Pearlmutter D., Erell E., Etzion Y., Meir I.A. and Di H., Energy and Buildings, 1996, 23(3):191-197
12. Alvarez, S., Maestre I.R., Velázquez R. (1997) “Design methodology and cooling potential of environmental heat sinks”. Int. J. of Solar Energy, Vol 19, pp. 179-197.
13. Bahadori M.N. (1978), “Passive cooling in Iranian architecture”. Scientific American. p.238.
14. Bowman, N., et al, (2001). “Passive Downdraught Evaporative Cooling” 1. Concept and Precedents. Indoor + Built Environment. Karger AG, Basel.
15. Salmeron JM, Fernandez JA, Sánchez de la Flor FJ, Domínguez S, Ruiz A (2007). “Flow Pattern Effects on Night Cooling Ventilation”, The international Journal of Ventilation, Vol 6 No. 1.

7. ANEXOS

7.1. CASOS DE MICRONIZACIÓN

7.2. CASOS DE PULVERIZACIÓN

7.3. RESUMEN DE RESULTADOS DE MICRONIZACIÓN

7.4. RESUMEN DE RESULTADOS DE PULVERIZACIÓN

8. AGRADECIMIENTOS

Mucho más que agradecer es lo que debo a mis padres, por ese motivo, este proyecto, esta carrera y esta vida, es y será siempre para y de ellos.

A mi familia, siempre apoyándome, animándome, corrigiéndome, fortaleciéndome, y más en este último periodo tan complicado, desde aquí mi más sincera gratitud.

A Soraya, porque es el día a día lo que construye una vida, las veinticuatro horas de cada uno de los días que has estado a mi lado durante todo este camino, más cerca de mí que nadie. Gracias.

A Servando Álvarez y José Manuel Salmerón, de jefes a amigos. Su apoyo y cariño ha sido fundamental. Gracias a ellos y al resto del Grupo de Termotecnia, un orgullo poder formar parte del mismo.

A todos mis amigos y compañeros, en especial: Héctor, siempre presente; José Luis, mi gran compañero de viaje; José F., cuánta ayuda de tu parte; Elena y Adoración, un agradecimiento es poco para vosotras; Antonio S., el más cercano y con la mayor afinidad. Al resto de mis compañeros de carrera, mi admiración; junto al Colegio Mayor Guadaira y a todos los amigos que de él obtuve, nunca serán olvidados.

Gracias a todos.