

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Industrial

Auditoría Energética de una Planta de Lixiviados

Autor: Pablo Pastrana Fernández

Tutor: José Manuel Galán Fernández

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

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

Auditoría Energética de una Planta de Lixiviados

Autor:

Pablo Pastrana Fernández

Tutor:

José Manuel Galán Fernández

Profesor titular

Dep. de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Carrera: Auditoría Energética de una Planta de Lixiviados

Autor: Pablo Pastrana Fernández

Tutor: José Manuel Galán Fernández

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

AGRADECIMIENTOS

La consecución de este Proyecto de Fin de Carrera culmina el periodo de mi formación como Ingeniero Industrial. La ayuda y apoyo de mis compañeros y mis profesores en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla ha sido indispensable y sin ella no hubiese alcanzado esta meta. Por ello les doy gracias a todos aquellos con los que he tenido el placer de formarme a lo largo de estos años.

Me gustaría agradecer especialmente a mi tutor en el proyecto, José Manuel Galán Fernández, su ayuda y su trabajo que han sido muy valiosos para poder llevar a cabo este último paso en mi formación. También agradecer a los profesores David Velazquez y Luis Perez-Lombard su ayuda técnica para el proyecto y sus palabras de apoyo y motivación así como el conocimiento que recibí de ellos en sus clases y que he puesto en valor en esta ocasión.

Agradezco a mis padres y a toda mi familia el apoyo constante y la comprensión a lo largo de todo este tiempo que considero la base que me ha permitido llegar conseguir este hito en mi vida. Me gustaría agradecer especialmente a mi tío José María Fernández Domenech su dedicación, orientación y dirección en muchos aspectos de mi trabajo en este Proyecto de Fin de Carrera sin los que no hubiese tenido éxito en la consecución del mismo.

*Pablo Pastrana Fernández
Sevilla, 2017*

RESUMEN

Este Proyecto de Fin de Carrera consiste en la realización de una Auditoría Energética de una Planta de Tratamiento de Lixiviados que se basa en la evaporación atmosférica y que forma parte de un complejo de reciclado y tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos en la provincia de Granada, y con la que se pretende conocer el uso de la energía en dicha planta y conseguir un aumento en su eficiencia y un menor coste de operación.

Gracias a la colaboración de la organización se ha dispuesto de todos los datos necesarios para el estudio y análisis del rendimiento energético y la operación de la planta así como información detallada de su diseño y configuración.

Se ha desarrollado un modelo basado en la psicrometría para el estudio de la evaporación y se ha estudiado la operación de la planta en función de los datos de producción proporcionados y los objetivos de eficiencia y coste de la organización a fin de desarrollar una medida de mejora de la eficiencia satisfactoria. Se ha desarrollado una implementación de dicha medida mediante un equipo de código abierto y bajo coste.

También se ha hecho un breve estudio de la idoneidad del aprovechamiento del calor residual de otros procesos en el complejo para el proceso de evaporación y se ha elaborado un manual de buenas prácticas que puedan solventar algunos de los puntos que afectan negativamente a la operación y eficiencia de la planta.

Se ha conseguido un ahorro energético importante en base a las medidas analizadas así como una potencial mejora en la capacidad de operación de la planta

ABSTRACT

This document pertains the Energy Audit of a forced evaporation leachate treatment plant in the province of Granada in Spain that seeks to enhance its energy efficiency and lower the operation costs.

Thanks to the cooperation of the corporation, all the relevant data for the analysis and study of the energy efficiency and performance of the plant has been available as well as information on its design and configuration.

A physical model for the study of the evaporation has been developed and the operation of the plant has been studied from the available data and according to the goals of the corporation in efficiency and costs. A measure to increase the efficiency through the improvement of the operation of the plant has been developed and implemented with a open source and low cost device and application.

A measure based on using excess heat from other processes in the evaporation has been analysed and a guide of good practices has been included to address the negative aspects of the operation affecting the efficiency.

Satisfactory energy savings have been realized from the measures developed and the goals of the corporation have been met.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	9
RESUMEN	11
ABSTRACT	13
ÍNDICE	14
ÍNDICE DE TABLAS	16
ÍNDICE DE FIGURAS	17
1. INTRODUCCIÓN	19
1.1. OBJETO DEL PROYECTO	19
1.2. NORMATIVA RELATIVA A LAS AUDITORÍAS ENERGÉTICAS	19
1.3. PROBLEMÁTICA DE LOS LIXIVIADOS	21
1.3.1. ORIGEN Y COMPOSICIÓN DEL LIXIVIADO	21
1.3.2. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS	23
2. ANTECEDENTES	25
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL COMPLEJO MEDIOAMBIENTAL LOMA DE MANZANARES.	25
2.2. PLANTA DE TRATAMIENTO MECÁNICO-BIOLÓGICO	26
2.2.1. PROCESO DE TRATAMIENTO MECÁNICO-BIOLÓGICO	27
2.3. VERTEDEROS DE RECHAZOS	28
2.4. PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS	29
3. AUDITORÍA ENERGÉTICA	30
3.1. CONTACTO PRELIMINAR	30
3.1.1. OBJETIVOS Y EXPECTATIVAS	30
3.1.2. ALCANCE Y LÍMITES	31
3.1.3. OTRAS CONSIDERACIONES ACORDADAS CON LA ORGANIZACIÓN	31
3.1.3.1. Plazos y dedicación	31
3.1.3.2. Criterios para la evaluación de las medidas de mejora de la eficiencia energética	31
3.1.3.3. Recogida de datos previa al inicio de la auditoría energética	32
3.1.3.4. Mediciones e inspecciones previsibles que se realizarán	32
3.2. RECOPIACIÓN DE DATOS	32
3.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA Y EL PROCESO	32

3.2.1.1.	Descripción general de la instalación	32
3.2.1.2.	Descripción del funcionamiento y control del proceso	35
3.2.1.3.	Procesos de Transferencia de Masa – Bases Teóricas	41
3.2.1.4.	El sistema aire-agua. Transformaciones de humidificación del aire con agua.	48
3.2.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA	56
3.2.3.	CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS CONSUMIDORES DE ENERGÍA	58
3.2.4.	UNIFILAR DE LA INSTALACIÓN	60
3.2.4.1.	Datos del sistema SCADA y las comunicaciones	60
3.2.5.	CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS RECOPIRADOS	60
3.2.5.1.	Consumo energético	61
3.2.5.2.	Factores de ajuste	62
3.2.5.3.	Verificación y precisión de los equipos de medida	62
3.2.6.	TARIFAS ACTUALES Y PROYECTADAS	62
3.2.7.	DATOS METEOROLÓGICOS	64
3.2.8.	OTROS DATOS ECONÓMICOS	66
3.2.9.	ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS DATOS	66
3.2.10.	TRABAJO DE CAMPO	67
3.2.10.1.	Visitas	67
3.2.10.2.	Medidas adicionales	67
3.3.	ANÁLISIS	67
3.3.1.	INDICADOR DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO	68
3.3.1.1.	Análisis en base al indicador energético considerado	69
3.3.1.2.	Efecto de las consignas de operación de la planta	77
3.3.1.3.	Efecto de la pérdida de carga en los ventiladores	79
3.3.1.4.	Incidencia de los periodos tarifarios	82
4.	MEDIDAS DE MEJORA EFICIENCIA ENERGÉTICA	84
4.1.	MEDIDAS DE MEJORA DE EFICIENCIA EN LA OPERACIÓN DE LA PLANTA DE LIXIVIADOS	84
4.1.1.	DEFICIENCIAS DETECTADAS EN LA OPERACIÓN Y RAZÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA	84
4.1.2.	DESCRIPCIÓN DE LAS OPORTUNIDADES DE MEJORA DE EFICIENCIA PROPUESTAS	84
4.1.3.	BENEFICIOS RELATIVOS A LA EFICIENCIA NO ENERGÉTICA	85
4.2.	MEDIDA DE MEJORA DE EFICIENCIA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE CALOR RESIDUAL	85
4.3.	IMPLEMENTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	88
4.3.1.	INTRODUCCIÓN	88
4.3.2.	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	89
4.3.3.	DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN	90
4.3.4.	LECTURA DE DATOS	90
4.3.4.1.	Lectura de la estación meteorológica	90
4.3.4.2.	Lectura PLC Planta de lixiviados	91
4.3.5.	VISUALIZACIÓN DE DATOS	93
5.	MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS	94
5.1.	FILTROS ATRAPA SÓLIDOS EN LAS CONDUCCIONES DE LIXIVIADO	94
5.2.	ENSUCIAMIENTO DEL RELLENO DE LAS CELDAS DE EVAPORACIÓN	94
6.	CONCLUSIONES	95
7.	BIBLIOGRAFÍA	96
8.	ANEXOS	97
8.1.	ESQUEMA DE CONTROL P&ID DE LA PLANTA DE LIXIVIADOS	97
8.2.	DIAGRAMA UNIFILAR DEL COMPLEJO ECOCENTRAL GRANADA	99
8.3.	DIAGRAMA DE FLUJO DE MATERIALES EN EL COMPLEJO ECOCENTRAL GRANADA	101
8.4.	CÓDIGO VISUAL BASIC IMPLEMENTADO EN HOJAS DE CALCULO	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Composición típica de los lixiviados de vertedero y su evolución en el tiempo.....	23
Tabla 3-1: Eficiencias típicas en humidificadores	52
Tabla 3-2: Listado de equipos de medida utilizados en la Auditoría Energética.....	56
Tabla 3-3: Listado de principales equipos consumidores de energía	59
Tabla 3-4: Consumo energético según grupos de evaporación en marcha.....	59
Tabla 3-5: Ejemplo de datos de evaporación recogidos en una semana	61
Tabla 3-6: Ejemplo de datos de consumo energético medio-horarios de la planta de lixiviados en 2016	62
Tabla 3-7: Calendario de periodos tarifarios en 2014 según OMIE	63
Tabla 3-8: Precios mensuales de la energía en Ecocentral Granada en 2016.....	64
Tabla 3-9: Ejemplo de datos meteorológicos recogidos	65
Tabla 3-10: Valores del coeficiente K_i según periodo tarifario.....	66
Tabla 3-11: Valores promedio mensuales del indicador energético en 2016	68
Tabla 3-12: Temperaturas mensuales estimadas del lixiviado de la balsa	70
Tabla 3-13: Análisis de la eficiencia obtenida en los ciclos de evaporación	71
Tabla 3-14: Datos de evaporación recopilados y estimados en 2016.....	73
Tabla 3-15: Resultados del ajuste de la operación de la planta en base a los datos de 2016 ...	76
Tabla 3-16: Comparación de caudales de aire de los ventiladores.....	82
Tabla 4-1: Mejora de la evaporación al calentar 1°C el lixiviado	86
Tabla 4-2: Análisis de resultados de combinar el límite de operación de la planta y calentamiento de lixiviado en 1°C	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Vista aérea general del Complejo Medioambiental Loma de Manzanares [8]	25
Figura 2-2: Diagrama de flujo de materiales	26
Figura 2-3: Vaso vacío de vertedero con recubrimiento [8]	28
Figura 2-4: Vista aérea del vertedero de rechazos de la Ecocentral Granada. Fuente: Ecocentral Granada	29
Figura 2-5: Vista aérea de la planta de eliminación de lixiviados y balsas asociadas. Fuente: Ecocentral Granada	29
Figura 3-1: Detalle de la planta de eliminación de lixiviados. Fuente: Ecocentral Granada ...	33
Figura 3-2: Alzado de una celda de evaporación. Fuente: INCRO.....	34
Figura 3-3: Esquema de la instalación con un módulo de evaporación	35
Figura 3-4: Cronograma de las secuencias del proceso de evaporación de lixiviados.....	35
Figura 3-5: Pantalla del SCADA del sistema de control de la planta de lixiviados.....	36
Figura 3-6: Esquema de columna para la medida de densidad y temperatura del lixiviado...38	
Figura 3-7: Curvas de caudal del ventilador para distintos caudales y ángulo de las palas. Fuente: Howden.....	40
Figura 3-8: Curva de presión de vapor en función temperatura del agua [11].....	42
Figura 3-9: Entalpía relativa de una sustancia [11].....	43
Figura 3-10: Torre empacada con flujo contracorriente gas-líquido [11].....	45
Figura 3-11: Sección transversal de la interfase gas-líquido [11].....	45
Figura 3-12: Entalpía de una mezcla gas-líquido en función de la temperatura del líquido [11] 47	
Figura 3-13: Curva del proceso de humidificación de un gas [11].....	47
Figura 3-14: Representación ideal del paso de aire a través del lixiviado aspersado sobre los paneles en una celda de evaporación	49
Figura 3-15: Circulación del aire en contacto con el líquido de proceso en una celda de evaporación y magnitudes relevantes	49
Figura 3-16: Posibles procesos psicrométricos cuando existe agua en contacto con aire	50
Figura 3-17: Analizador de red en los cuadros eléctricos de los transformadores.....	57
Figura 3-18: Analizador de red en el cuadro eléctrico de la planta de lixiviados.....	57
Figura 3-19: Detalle de la estación meteorológica data logger de Ecocentral Granada	58
Figura 3-20: Arquitectura de adquisición de datos de Ecocentral Granada y la planta de lixiviados. 60	
Figura 3-21: Detalle del panel de control de datos meteorológicos en línea implementado en Ecocentral Granada en 2017.	65
Figura 3-22: Gráficas del SCADA con variables de la planta de lixiviados	71

Figura 3-23:	Distribución de los indicadores energéticos observados en los ciclos completos analizados	72
Figura 3-24:	Diagrama psicrométrico con valores de consigna de parada de la planta sombreados en rojo	78
Figura 3-25:	Deshumidificación del aire en la planta de lixiviados a lo largo de 2016	79
Figura 3-26:	Curva de ajuste cuadrático del caudal del ventilador en función de la pérdida de carga	80
Figura 3-27:	Pérdida de carga registrada durante el día 21/05/2017	81
Figura 3-28:	Pérdida de carga registrada durante el día 16/06/2017	81
Figura 3-29:	Lixiviado evaporado por la planta en cada mes del período de operación	83
Figura 3-30:	Capacidad de evaporación media por horas para los meses del periodo de evaporación	83
Figura 4-1:	Aumento de la evaporación debido al aumento de 1°C de la temperatura del lixiviado	86
Figura 4-2:	Esquema de conexiones del sistema de monitorización de la planta implementado	88
Figura 4-3:	Micro ordenador de código abierto Raspberry Pi [15]	89
Figura 4-4:	Programa de lectura de datos de la estación de meteorología	90
Figura 4-5:	Programa de lectura de datos del PLC de la planta de lixiviados	91
Figura 4-6:	Menú de selección de pantallas del programa de monitorización en Node-Red	93
Figura 4-7:	Pantalla de datos meteorológicos de la aplicación de monitorización en Node-Red	93
Figura 4-8:	Pantalla del cuadro de mando de lixiviados de la aplicación en Node-Red	94

1. Introducción

1.1. Objeto del proyecto

El Proyecto de Fin de Carrera realizado desarrolla una Auditoría energética de una instalación productiva real de eliminación de lixiviados provenientes de un vertedero de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en la provincia de Granada. Se hará uso de datos reales proporcionados por la organización y de un análisis propio, de consumo energético y facturación y de los procesos físicos y la operación de la planta, a fin de obtener una imagen en detalle y completa de la situación energética de la instalación.

Las auditorías energéticas son herramientas esenciales para identificar los lugares de consumo energético en las instalaciones de las empresas así como los factores que influyen en el mismo sacando así a la luz las oportunidades de mejora con mayor potencial de ahorro energético previo al análisis de la viabilidad técnica y económica de la implantación de las mismas en las organizaciones.

El Real Decreto 56-2016 y la Norma UNE 16247-1 y 16247-3 dan el marco para el desarrollo de una auditoría energética en la industria y se han adaptado en este proyecto a fin de que se ajuste a lo requerido en dicha normativa siguiendo las directrices que proporcionan.

Se desarrollarán medidas de mejora de la eficiencia energética basada en el diagnóstico energético llevado a cabo que maximicen el potencial de ahorro energético y económico. Se hará referencia a cuestiones sobre ahorro económico de estas medidas y su potencial de mejora en aspectos no energéticos de la operación.

En la auditoría se describirá la instalación objeto de la misma, su ubicación y equipos consumidores de la misma así como el proceso desde un punto de vista operativo y desde un punto de vista físico, especificando la importancia de cada punto en la eficiencia energética y las posibles medidas de mejora de eficiencia energética presentadas.

1.2. Normativa relativa a las auditorías energéticas

El Real Decreto 56/2016 transpone parcialmente la directiva europea 2012/27/UE del Consejo Europeo relativa a eficiencia energética en lo referente a las auditorías energéticas, principalmente en lo relativo a auditorías energéticas, sistemas de acreditación de auditores energéticos y proveedores de servicios energéticos y la promoción de la eficiencia en los procesos de producción.

La Unión Europea ha fijado como objetivo aumentar un 20 por ciento la eficiencia energética para el año 2020, algo que por el momento no está en camino de cumplirse. Para ello se busca actualizar el marco legislativo europeo en materia energética para trabajar en pos de dicho objetivo.

Por lo tanto, la finalidad de este Real Decreto es impulsar y promover una serie de medidas y

actuaciones en los procesos de consumo energético que puedan contribuir al ahorro y eficiencia en la energía primaria consumida así como optimizar la demanda energética de la instalación, equipos y sistemas consumidores de energía y que se pueda contar con un número adecuado de profesionales dedicados a asegurar la aplicación efectiva de la directiva mencionada anteriormente.

El RD 56/2016 en su capítulo II, *Auditorías energéticas*, contiene el ámbito de aplicación y la regulación de las mismas, su alcance y criterios mínimos que deben cumplir, así como los requisitos que deben cumplir los cualificados como auditores energéticos. También se recoge la creación de un registro administrativo de auditorías energéticas y el procedimiento de inspección de su realización.

El Real Decreto establece la obligación de llevar a cabo una auditoría energética sobre las actividades gestionadas por las empresas para aquellas empresas que no sean PYMES, es decir con más de 250 trabajadores o que tengan una facturación anual superior a los 50 millones de euros. Dichas auditorías se realizarán cada cuatro años desde la fecha de la anterior auditoría y deberán cubrir el 85 por ciento del consumo energético total de la empresa.

Hay dos métodos mediante los cuales el RD 56/2016 busca fomentar la eficiencia y el ahorro económico. Uno es con las mencionadas auditorías energéticas y el otro es con la implantación en las empresas de Sistemas de Gestión de la Energía (SGE). Los Sistemas de Gestión de la Energía estarían fuera del alcance de este Proyecto de Fin de Carrera por lo cual no se va a elaborar sobre ellos.

Auditorías energéticas: Según el Real Decreto 56/2016.

- Deberán basarse en datos operativos actualizados, medidos y verificables, de consumo de energía y, en el caso de la electricidad, de perfiles de carga siempre que se disponga de ellos.
- Abarcarán un examen pormenorizado del perfil de consumo de energía de los edificios o grupos de edificios, de una instalación u operación industrial o comercial, o de un servicio privado o público, con inclusión del transporte dentro de las instalaciones o, en su caso, flotas de vehículos.
- Se fundamentarán, siempre que sea posible en criterios de rentabilidad en el análisis del coste del ciclo de vida, antes que en periodos simples de amortización, a fin de tener en cuenta el ahorro a largo plazo, los valores residuales de las inversiones a largo plazo y las tasas de descuento.
- Deberán ser proporcionadas y suficientemente representativas para que se pueda trazar una imagen fiable del rendimiento energético global, y se puedan determinar de manera fiable las oportunidades de mejora más significativa.

En las auditorías energéticas se reflejarán los cálculos detallados y validados para las medidas propuestas, facilitando así una información clara sobre el potencial de ahorro.

El Real Decreto 56/2016 cita la norma UNE 16247 como método y procedimiento para la realización de auditorías energéticas. La norma UNE 16247 es en realidad un grupo de 5 normas. La norma 16247-1 trata aspectos generales de las auditorías energéticas, la 16247-2 trata aspectos específicos de auditorías energéticas en edificios, la 16247-3 en procesos, la 16247-4 en el transporte y por último la 16247-5 hace referencia a las competencias de los auditores energéticos.

El ámbito de aplicación de esta norma es todo tipo de instalaciones y organizaciones, en todos los tipos y usos de la energía excluyendo a las viviendas residenciales particulares.

La norma UNE 16247-1 presenta una introducción a la metodología que se complementa con aspectos más específicos en el resto de las partes, pero sin entrar en los aspectos técnicos y termodinámicos del consumo y la eficiencia energética.

En nuestra instalación, por tratarse de un proceso industrial, la norma UNE 16247-3 es la que nos ha proporcionado los aspectos específicos para desarrollar la metodología a seguir en la realización del Proyecto de Fin de Carrera de una auditoría energética.

1.3. Problemática de los lixiviados

En el contexto de una planta de tratamiento y vertedero de Residuos Sólidos Urbanos, los lixiviados se definen como “el líquido que se produce como resultado de la degradación de los residuos urbanos y de la infiltración de agua de distinta procedencia en el vertedero, que al exceder su capacidad de campo pasa a través de los residuos, extrayendo sustancias disueltas y en suspensión y aumentando su concentración en contaminantes hasta convertirse en una amenaza para el suelo y las aguas superficiales y subterráneas” [1].

Los componentes orgánicos e inorgánicos que componen los lixiviados pueden constituir un importante riesgo potencial para las poblaciones humanas y los ecosistemas circundantes.

En España muchos vertederos son mixtos, contienen residuos urbanos, rurales, comerciales e industriales. Un estudio en el que se tomaron muestras de lixiviados en vertederos de RSU de la Comunidad de Madrid, evidenció las altas concentraciones en sales, sobre todo cloruros y sulfatos, y que los niveles elevados de estos aniones deben ser un factor negativo para el crecimiento y desarrollo de la vegetación [2].

El pH de los lixiviados es cercano a la neutralidad lo cual permite el crecimiento bacteriano en las zonas contaminadas.

Diversos estudios con ratas de laboratorio evidenciaron que la exposición a los lixiviados manifestó en los animales perturbaciones hepáticas y renales además de una fuerte alteración metabólica e inhibición del peso y el crecimiento, poniendo en evidencia la toxicidad de los lixiviados [3].

Los vertederos localizados cerca de los cursos de agua tienen una mayor probabilidad de liberar sus contaminantes en ellas y por lo tanto de influenciar la vida acuática. Los contaminantes transportados por el agua se dispersan por los arroyos, pero también pueden depositarse en los sedimentos y constituyen un riesgo potencial a largo plazo.

Del mismo modo, los efectos de la contaminación del agua subterránea y la bioacumulación en los seres vivos demuestran las consecuencias de los lixiviados tanto para el ambiente como para las poblaciones humanas [2, 3].

1.3.1. Origen y composición del lixiviado

El origen de los lixiviados en un vertedero de RSU es múltiple, incluyendo además de la filtración de agua el líquido exudado en la descomposición de los residuos orgánicos y el extraído por los efectos de presión de los residuos almacenados. Sin embargo, son dichas filtraciones de agua en el espacio de vertido, tanto subterráneas como por precipitaciones en la superficie, escorrentías y los posibles vertidos líquidos y fangosos que se produzcan, las principales contribuciones.

En el balance hídrico de un vertedero pueden identificarse una serie de entradas y salidas de agua [1, 4]:

Entradas de agua:

- Precipitación (P): Las precipitaciones sobre la superficie del vertedero son la principal fuente de producción de lixiviados que dependerá de la cantidad, la intensidad, la frecuencia y la duración de las mismas.
- Agua Superficial (AS): El agua que circula sobre la superficie del vertedero que proviene de cauces o escorrentías en las zonas adyacentes al mismo. Su importancia

está determinada por las características de la topografía, las características del suelo, el material de cubrición y la vegetación.

- Penetración de agua subterránea (PA): Puede producirse una entrada de caudales de agua subterránea en el vaso del vertedero cuando este se encuentre por debajo del nivel freático del terreno circundante.
- Irrigación (Ir): Se puede producir cuando en la operación de la planta se extienden aguas o fangos sobre la superficie de vertido, generalmente lixiviados para fomentar su evaporación y reducir su volumen.
- Descomposición del residuo (D): Los RSU depositados en el vertedero contienen una fracción de materia orgánica que se degrada y exuda lixiviados. La caracterización de los lixiviados está muy determinada por los residuos presentes.
- Agua aportada por el material de cubrición: El propio material de cubrición contiene una porción de agua que se aporta al balance hídrico y depende del tipo de material y su humedad.

Salidas de agua:

- Evaporación y transpiración: Se libera agua a la atmósfera en un proceso de evapotranspiración que depende de las condiciones atmosféricas y de factores fisiológicos como la vegetación o el cubrimiento.
- Escorrentías superficiales: Parte del agua de las precipitaciones sobre el vertedero fluye fuera del mismo sin que llegue a infiltrarse en él.
- Agua consumida en la formación del gas del vertedero: Los organismos presentes en la descomposición anaerobia de los residuos consumen una cierta cantidad de agua.

Cuando los aportes de humedad y agua exceden a las pérdidas a través del material de cubrición e impermeabilización y se acumula humedad, se puede alcanzar el punto en el que se produce la percolación por gravedad de la humedad en el campo de residuos [5].

La producción de lixiviados en un vertedero varía con la antigüedad de los vertidos, al igual que su composición y toxicidad, que tiende a disminuir con el tiempo como se muestra en la Tabla 1-1. [1]

Tabla 1-1: Composición típica de los lixiviados de vertedero y su evolución en el tiempo

Parámetro*	Vertedero nuevo (menos de 2 años)	Vertedero antiguo (más de dos años)
COT	6000	80-120
DBO ₅	10000	100-200
DQO	18000	100-500
Alcalinidad (como CaCO ₃)	3000	200-1000
Dureza total (como CaCO ₃)	3500	200-500
pH	6	6,6-7,5
Sólidos en suspensión	500	100-400
Nitrato	25	5-10
Nitrógeno amoniacal	200	20-40
Nitrógeno orgánico	200	80-120
Fósforo total	30	5-10
Ortofosfato	20	4-8
Calcio	1000	100-400
Cloro	500	100-400
Hierro total	60	20-200
Magnesio	250	50-200
Potasio	300	50-400
Sodio	500	100-200
Sulfatos	300	20-50

*Las unidades de todos los parámetros son mg/l, excepto el pH

La composición del lixiviado es muy variable incluso dentro de un mismo vertedero según los tipos de residuos depositados, la compactación, la cobertura, su edad, la forma de operarlos y como ya se ha visto de las entradas de agua y sus características [4].

1.3.2. Tratamiento de los lixiviados

La gestión de los lixiviados se basa principalmente en minimizar su generación en los vertederos de rechazos mediante un sistema de impermeabilización frente a las entradas de agua y la reducción de su concentración de contaminantes.

Los vertederos deben contar con un sistema de captación de lixiviados que evite su acumulación en el fondo del depósito y que por lo general suele consistir en un colector principal al que vierten ramales transversales y que cubre todo lo posible la superficie de vertido. Desde estos ramales el lixiviado se conduce o se bombea hacia balsas de acumulación previa a su tratamiento. La

capacidad de estas balsas debe calcularse y proyectarse de forma que cubra las necesidades de acumulación que puedan existir [6].

Los tratamientos de los lixiviados más extendidos en la actualidad son los que tratan el líquido in situ debido al coste de transportar el líquido tal cual.

Existe un amplio abanico de tratamientos biológicos y físico-químicos [7]:

- Recirculación del lixiviado

Este es el tratamiento más extendido en la actualidad ya que es más inmediato y disminuye el volumen de los lixiviados para subsecuentes tratamientos y por lo tanto reduce los costes de estos. El lixiviado que se extrae del vertedero de rechazos se canaliza hacia el interior del campo de residuos.

- Tratamientos biológicos

En los tratamientos biológicos se reduce la carga de materia orgánica de los lixiviados mediante poblaciones bacterianas.

Se puede distinguir entre tratamientos anaerobios y aerobios de acuerdo al tipo de microorganismos que lleven a cabo la degradación en presencia de oxígeno o no. Cada uno de estos tratamientos biológicos se adapta mejor a una tipología del sistema de tratamiento (reactores, lagunas aireadas, sistemas de lechos fluidizados, etc...) y la composición y antigüedad del lixiviado.

- Tratamientos fisicoquímicos

Estos tratamientos son más costosos debido a los productos que se deben emplear para conseguir reacciones químicas que estabilicen e inerticen los lixiviados, y a la combinación con acciones físicas que favorezcan la precipitación química, la oxidación, adsorción, o con sistemas de membranas y la deshidratación al vacío.

- Evaporación forzada

Una tipología muy extendida, y que se engloba en los tratamientos fisicoquímicos, de plantas diseñadas para reducir en gran medida los lixiviados que se recogen en el vertedero típico de RSU, son las plantas de evaporación atmosférica o evaporación forzada, que ponen en contacto una corriente de lixiviados con una gran cantidad de aire y por el efecto de transferencia de masa del agua al aire debido a su presión de vapor, consiguen evaporar el agua contenida en los lixiviados y reducir su volumen y concentrar el resto de elementos. Se puede esperar en un caso óptimo una reducción en volumen de hasta un 95% de los lixiviados así tratados. Esta es la tipología de la planta sobre la que se lleva a cabo esta auditoría [7].

2. Antecedentes

2.1. Descripción general del Complejo Medioambiental Loma de Manzanares.

El Complejo Medioambiental de la Loma de Manzanares, en adelante Ecocentral Granada, es una instalación situada a unos 20 km de la ciudad de Granada, en el término municipal de Alhendín a una cota de altura de 830 metros sobre el nivel del mar y que cuenta con una superficie de 890.500 m². El complejo está formado por tres instalaciones productivas: Una planta de tratamiento mecánico-biológico, la planta de tratamiento de lixiviados, un vertedero de rechazos. Ver Figura 2-1.

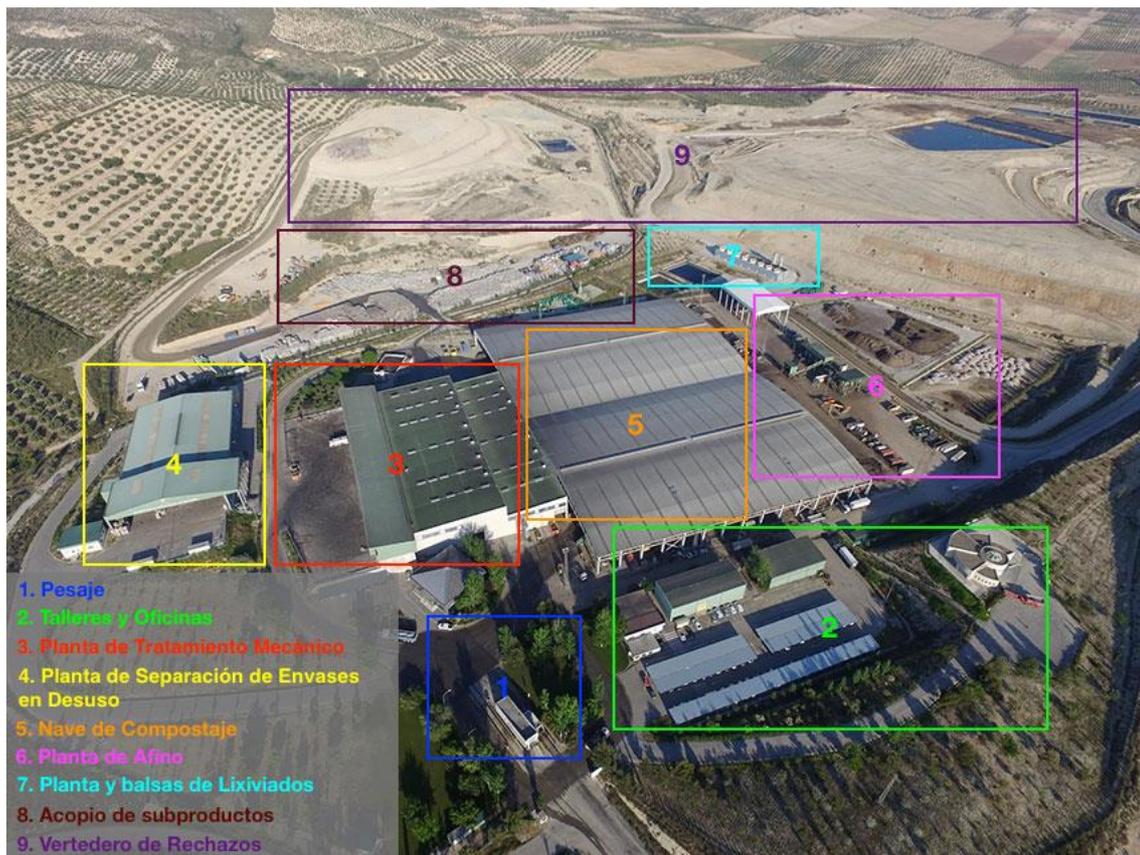


Figura 2-1: Vista aérea general del Complejo Medioambiental Loma de Manzanares [8]

En la siguiente figura se presenta un esquema del flujo de materiales en la Ecocentral Granada. En el anexo 8.3 de este proyecto de fin de carrera se incluye un diagrama más detallado del flujo de materiales en cada una de las etapas del proceso de aprovechamiento de subproductos y depósito en vertedero de los subproductos de rechazo y que ha sido proporcionado por la organización.

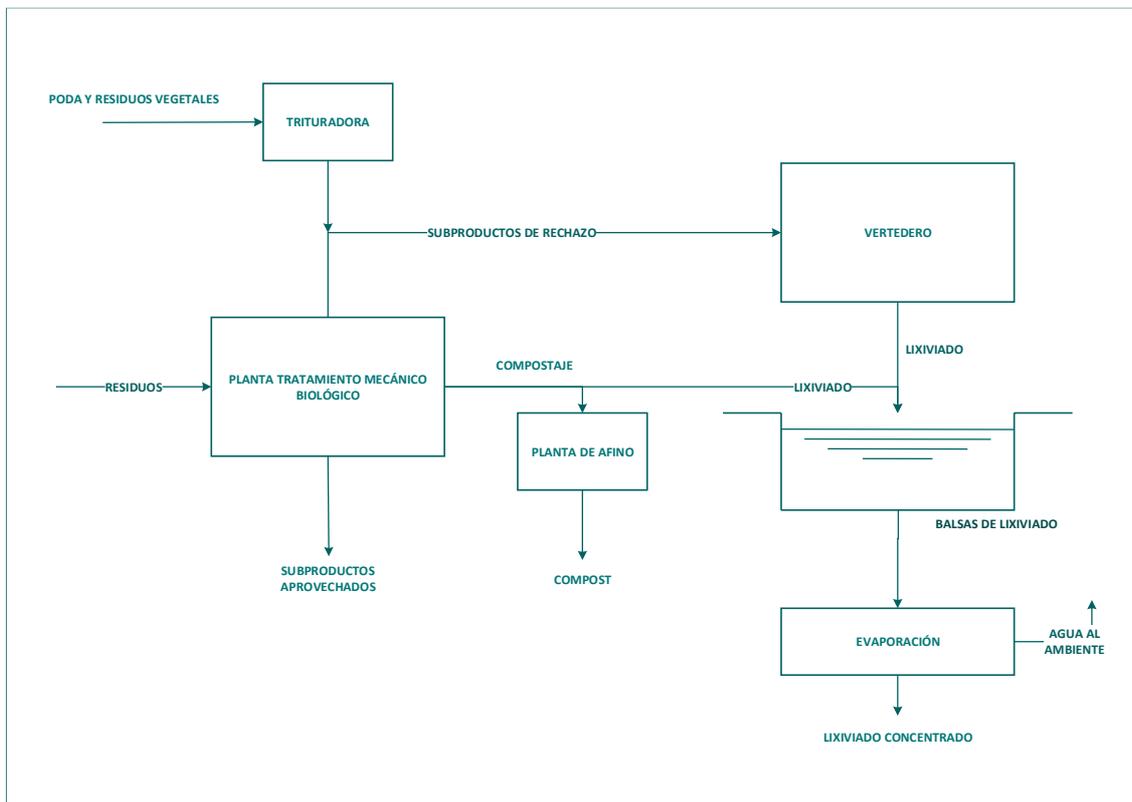


Figura 2-2: Diagrama de flujo de materiales

2.2. Planta de tratamiento mecánico-biológico

En esta instalación del complejo se lleva a cabo la recuperación y compostaje de los residuos orgánicos-resto y de los envases que llegan a las instalaciones procedentes de la recogida de RSU de todos los municipios de la provincia de Granada [8].

La instalación está diseñada para procesar hasta 450.000 toneladas de residuos orgánicos-resto al año. La cantidad procesada en 2015 fue de 356.000 toneladas procedentes de la fracción orgánico-resto y 8.100 toneladas de envases. De estas 450.000 toneladas procesadas se consigue un 12% de subproductos aprovechables.

Los subproductos aprovechables de la planta de tratamiento mecánico – biológico son: chatarra de hierro, aluminio, bricks, papel cartón, cajas y botes de PEAD, PP, PET y plásticos mezcla además del compost que se obtiene en el proceso de bioestabilización.

2.2.1. Proceso de tratamiento mecánico-biológico

- Pesaje y control de entrada: Todos los vehículos de transporte de residuos que llegan se pesan a la entrada y salida a fin de que el programa de control del proceso obtenga el peso neto de productos que transportan.
- Recepción en foso: En los 3 fosos de recepción con los que cuenta la planta se pueden almacenar los residuos que recibe la planta en 48 horas. En la zona de recepción, dos pulpos electrohidráulicos sobre sendos puentes grúa alimentan las cuatro líneas de proceso con las que cuenta la planta.
- Pretratamiento mecánico: Las cuatro líneas del proceso se agrupan en dos conjuntos prácticamente iguales y simétricos.

Los residuos pasan de la zona de recepción a la de triaje mediante unos alimentadores con velocidad variable para ajustarse al flujo requerido en cada momento y en cada línea de proceso. En el triaje se procede a la separación a mano de los recuperables.

Tras el triaje primario los residuos se conducen mediante cintas transportadoras a unos trómeles para ser cribados. Los residuos que pasan la criba se pasan por un separador magnético tras lo cual los finos sin materiales férricos se envían a contenedores de orgánicos.

El rebose de los trómeles se transporta en una cinta en un puesto de control de materiales extraños tras lo cual se pasa de nuevo por sendos trómeles en serie en los que se generan 3 fracciones de entre 80 y 200 mm, 200 y 350 mm y mayores que 350 mm.

Las fracciones más grandes se conducen a un nuevo triaje manual de envases de plástico de grandes dimensiones que se recogen en bunkers.

Las fracciones intermedias se procesan para abrir bolsas de plástico y luego se envían al triaje secundario para eliminar residuos que puedan obstruir el abre bolsas y lo resultante se lleva a un separador balístico.

Las fracciones más pequeñas de entre 80 y 200 mm pasan directamente al separador balístico.

De dichos separadores balísticos se extraen a su vez tres fracciones: finos, planares que se someten a subsiguientes tratamientos de separación de materiales férricos y por medios ópticos obteniendo un flujo de materiales recuperados y uno de resto que se inspeccionan en una cabina de control de calidad.

El flujo de material no recuperado se recircula para tener otra oportunidad de reciclado de los materiales que aún contiene.

- Prensado de subproductos: Los subproductos recuperados tras el triaje se prensan en 4 prensas.
- Compactación de rechazos: Los subproductos procedentes del triaje se transportan hasta una planta de transferencia con un compactador con una capacidad de 60 t/h.
- Proceso de bioestabilización: El proceso de bioestabilización de la fracción orgánica se realiza mediante volteo de mesetas en la nave abierta en un proceso que dura 8 semanas.
- Proceso de afino: Existe una planta de afino para el material resultante de la bioestabilización del material orgánico con capacidad para procesar 36 t/h.

2.3. Vertederos de rechazos

La Ecocentral Granada tiene asociado un vertedero de rechazos donde se depositan de forma controlada aquellos componentes de los Residuos Municipales que no pueden ser recuperados. El vertedero se ha diseñado de tal forma que cumple el R.D. 1481/2001, relativo al vertido de residuos. La impermeabilización basal se compone de una capa compactada de arcilla de 50 cm de espesor, sobre la que se ha colocado una membrana de PEAD, un geotextil y una capa de grava de 25 cm. De esta forma se asegura la impermeabilización del cuerpo de vertedero respecto al entorno en que se encuentra [8].

En ambos vertederos existe un sistema de drenaje de lixiviados, que termina en una red de 7 balsas interconectadas mediante una red de tuberías y bombas de transvase.



Figura 2-3: Vaso vacío de vertedero con recubrimiento [8]

El vertedero de la Ecocentral Granada se encuentra situado en cabecera de cuenca sobre materiales metamórficos prácticamente impermeables. Su superficie es de 66.000 m², con una vida útil de 25 años. Este vertedero se explota en media densidad, alcanzando un grado de compactación de 0,5.

Los rechazos son extendidos sobre su superficie y cubiertos diariamente con material inerte para evitar los posibles vuelos. Cuando se consiguen tongadas de 3 m se sellan con una capa de 20 cm de material impermeable.

La Ecocentral Granada tiene anexados dos vasos de vertido, uno ya colmatado y otro en explotación. Estos vertederos reciben principalmente los rechazos del proceso de recuperación y compostaje.



Figura 2-4: Vista aérea del vertedero de rechazos de la Ecocentral Granada. Fuente: Ecocentral Granada

2.4. Planta de tratamiento de lixiviados



Figura 2-5: Vista aérea de la planta de eliminación de lixiviados y balsas asociadas. Fuente: Ecocentral Granada

En la Ecocentral Granada, los lixiviados se eliminan mediante la evaporación mecanizada. Basa su principio de funcionamiento en el mismo método tradicional de evaporación natural por la acción del viento sobre la superficie de balsas de almacenamiento poco profundas. La diferencia estriba en qué en los panales de la instalación, a igualdad de superficie ocupada, el efecto se multiplica debido a:

- El líquido de proceso se extiende sobre paneles reticulares de gran superficie específica de contacto.
- El aire es impulsado por un ventilador de elevado rendimiento.
- La reducción de superficie ocupada en los módulos y la condición de circuito sellado minimizan el efecto negativo de la aportación de la lluvia.

El principio básico del proceso se basa en un fenómeno de evaporación a temperatura ambiente debido a las bajas presiones relativas del vapor de agua integrado en la masa del aire.

La descripción de la planta de eliminación de lixiviados y el proceso que se realiza en ella en la Ecocentral Granada se desarrollan más en detalle en el punto 3.2.1.1 de este documento.

La planta de tratamiento de lixiviados es el objeto de esta auditoría energética. El consumo total de energía de la planta fue de unos 350.000 kWh en 2016 respecto a un total de más de 3.000.000 kWh consumidos en el total del complejo. Aunque la planta de tratamiento de lixiviados es una instalación vital del complejo, no se incluyó en la auditoría energética general de la planta por encontrarse su consumo energético por debajo del 15% del total del complejo y por lo tanto la norma permitía no incluirla en el proceso de auditoría energética de toda la planta requerida por el RD 56/2016.

3. Auditoría energética

3.1. Contacto preliminar

Toda organización industrial, de mayor o menor tamaño, debe plantearse que sus instalaciones y procesos están optimizados desde un punto de vista energético. Además, una gestión energética adecuada dentro de la organización conlleva el uso eficiente de la energía y, por consiguiente, la reducción de los costes energéticos en los procesos de producción.

Una auditoría energética debe formar parte de los programas o planes de eficiencia energética de una empresa, y de acuerdo al Real Decreto 56/2016, se establece que las organizaciones de un cierto tamaño están requeridas a realizar una auditoría energética sobre el 85% del consumo total de energía.

Para realizar la auditoría energética de un proceso industrial se ha de seguir una metodología, en este caso, la norma UNE 16247-1 y la UNE 16247-3 establecen la metodología que el auditor ha de seguir para llevar a cabo una auditoría energética de un proceso industrial.

3.1.1. Objetivos y expectativas

El objetivo de esta auditoría energética es dar respuesta a una serie necesidades que la organización ha identificado y desea analizar.

Inicialmente, el proceso de evaporación de lixiviados de la planta de tratamiento de RSU Ecocentral Granada quedó fuera de la auditoría energética general del complejo por representar menos del 15% del consumo energético total. Por lo tanto, es de gran interés la realización de esta auditoría para asegurar que se pueda realizar un análisis de la situación energética de la planta y subsiguiente optimización del proceso de evaporación de lixiviados desde un punto de vista energético.

En el contexto del problema del tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos en vertederos, controlar, reducir y tratar la producción en los mismos de una cantidad de efluentes líquidos (o lixiviados) considerable y de un carácter contaminante muy importante es una de las claves para la sostenibilidad de los sistemas actuales de tratamiento de Residuos Sólidos.

De acuerdo con la organización se han establecido los siguientes objetivos a los que la auditoría energética debe dar respuesta:

- Optimizar la operación de la planta de evaporación de lixiviados, estableciendo las condiciones ambientales durante las cuales la operación de la planta maximice unos criterios económicos y energéticos. Esto debe permitir fijar unos objetivos económicos y energéticos y unos umbrales para la evaporación del lixiviado. Tras un análisis del coste de la energía que se consume en el proceso de la evaporación, basado en la factura energética que tuvo durante el año 2016 y lo consumido por la planta de evaporación en este mismo periodo, la organización ha identificado un objetivo de limitar el coste viable al que se puede operar la planta de 3 € por m³ de lixiviado evaporado.
- Estudiar la operación de la planta frente a las limitaciones de potencia contratada en el complejo y las tarifas horarias aplicadas al consumo de energía, para identificar las áreas en las que exista una oportunidad de ahorro energético.

3.1.2. Alcance y límites

A la hora de establecer el alcance de una auditoría energética sobre un proceso industrial, este puede definirse como el proceso completo, parte de un proceso o parte de un sistema.

El funcionamiento de una planta de evaporación de lixiviados implica un consumo de energía considerable. Se va realizar una auditoría energética sobre dicho proceso que lo caracterice, analice y proporcione una serie de mejoras de eficiencia energética con gran potencial de ahorro.

En nuestro caso se acuerda con la organización definir el alcance de esta auditoría energética como el proceso de evaporación de lixiviados procedentes del vertedero. En nuestro alcance no se incluyen algunos servicios auxiliares ajenos al proceso de eliminación de lixiviados como la iluminación. La justificación en la delimitación acordada es que el consumo que corresponde a estos conceptos es despreciable frente al del proceso de evaporación.

Así mismo, los datos en los que se basará la auditoría serán los datos históricos disponibles correspondientes al año 2016, por encontrarse la planta parada durante el periodo de realización de este PFC por condiciones ambientales desfavorables y por estar sufriendo reparaciones, ya que su periodo de funcionamiento normal es de mediados de mayo a finales de octubre.

Para todas las verificaciones de medidas y suposiciones que necesiten que el proceso esté en marcha se establecerán una serie de procedimientos que permitan que se realicen a posteriori, una vez que la planta vuelva a estar en funcionamiento.

Coincidiendo con el inicio del periodo de funcionamiento de la planta de lixiviados del año 2017, y gracias a modificaciones en el sistema de control y supervisión de la planta se han podido recabar datos de periodos de funcionamiento correspondientes a los meses de mayo y junio de 2017.

3.1.3. Otras consideraciones acordadas con la organización

3.1.3.1. Plazos y dedicación

En principio no se ha acordado con la organización ningún plazo establecido para la consecución de la auditoría energética del proceso de evaporación.

La organización se comprometió a dar apoyo técnico y de recopilación de datos y de una dedicación razonable por parte de sus miembros hacia la consecución de esta auditoría.

3.1.3.2. Criterios para la evaluación de las medidas de mejora de la eficiencia energética

De acuerdo a las expectativas de la organización y a la mejora en la eficiencia energética, las medidas que se presentarán en la auditoría energética se basarán en criterios de operación respecto al coste de evaporación.

El criterio principal que se ha definido en función de las necesidades de la organización es mantener el coste medio de la energía durante la operación de la planta por debajo de 3 €/m³ lixiviado evaporado.

3.1.3.3. Recogida de datos previa al inicio de la auditoría energética

La organización acuerda proporcionar todos los datos disponibles relativos al año 2016 al auditor, tales como:

- Datos meteorológicos de temperatura y humedad relativa recogidos en la estación meteorológica del complejo.
- Consumos diarios de la evaporación y el volumen diario de lixiviado evaporado.
- Consumos diarios del conjunto de la instalación de evaporación de lixiviados; planta de evaporación, planta de estabilización, alumbrado y servicios auxiliares de limpieza.

3.1.3.4. Mediciones e inspecciones previsibles que se realizarán

De acuerdo con la organización, no está prevista ninguna inspección funcional de la planta ya que en el momento de realizar la auditoría la planta se encuentra parada por condiciones ambientales desfavorables.

3.2. Recopilación de datos

3.2.1. Descripción de la planta y el proceso

La planta de evaporación de lixiviados de la Ecocentral Granada basa su funcionamiento en el contacto del aire atmosférico con un líquido, en este caso el lixiviado, y que en un proceso psicrométrico consigue una evaporación del mismo a temperatura ambiente.

La instalación de la que se dispone está diseñada para favorecer este efecto debido a tres factores principalmente:

- El lixiviado se extiende sobre paneles reticulares con gran superficie específica de contacto.
- El aire se impulsa con ventiladores de alto caudal sobre la superficie húmeda.
- Al ocupar menos superficie que una balsa de almacenamiento tradicional y tratarse de un circuito cerrado se minimiza el aporte de agua de lluvia.

Operativamente, la superficie de contacto líquido/aire debe resistir el ataque químico de los contaminantes presentes en el líquido de proceso, no obstruirse rápidamente y ser de fácil limpieza.

En el siguiente punto de este documento se hace una descripción detallada de la instalación, así como de la operación de la planta basado en el libro de ingeniería de la empresa INCRO [9, 10], que diseñó y construyó la planta.

3.2.1.1. Descripción general de la instalación

El sistema de recogida de lixiviados del vertedero del Complejo Medioambiental Loma de Manzanares recoge 30.000 m³/año de lixiviados y los conduce a unas balsas de almacenamiento. La producción de lixiviado es variable a lo largo del año aumentando considerablemente en los meses de mayores precipitaciones en forma de lluvia.

El objetivo de la instalación de eliminación de lixiviados es concentrar el líquido mediante la evaporación atmosférica del mismo, hasta reducirlo a un lodo concentrado con un volumen mucho menor al vertido bruto.



Figura 3-1: Detalle de la planta de eliminación de lixiviados. Fuente: Ecocentral Granada

En la instalación se identifican 3 unidades claramente diferenciadas [10]:

- 8 celdas de evaporación de la empresa INCRO tipo EM 42 8
- La plataforma de obra civil de hormigón sobre la que se asientan y se fijan las celdas de evaporación, y que integra los depósitos y el foso de bombas. La parte de la plataforma sobre la que se construyen los módulos está inclinada para reconducir el lixiviado por gravedad hasta el depósito de recirculación.
- Un cuadro eléctrico de control con un PLC y un PC con un pequeño sistema SCADA situado en una sala de control de obra civil junto a los módulos de evaporación y el foso de bombas.

Junto a la planta de evaporación se dispone de una balsa de almacenamiento de lixiviados que recoge los lixiviados a través de las canalizaciones que comunican con la red de balsas de almacenamiento repartidas por el vertedero de rechazos.

El aporte de lixiviados para la planta de eliminación se hace desde la balsa que se aprecia en la Figura 3-1. La función de dicha balsa es almacenar el lixiviado que se recoge en todo el vertedero. Existen una serie de balsas repartidas por la zona de vertedero que recogen el lixiviado y desde las cuales luego se impulsa a la susodicha balsa para su almacenamiento.

a. Depósitos y foso de bombas en la instalación

En la plataforma de obra civil se excava un depósito de recirculación o control bajo una de las celdas, que se encuentra comunicado con el resto mediante un canal en la plataforma que baja con una leve pendiente hasta el depósito.

En la plataforma se excava otro depósito para la acumulación del concentrado y un depósito para el agua limpia para lavado.

En el foso de bombas excavado en la plataforma junto a los depósitos de concentrado y agua de lavado se encuentran las bombas de recirculación, la de retorno y la de lavado.

b. Celdas de evaporación

Las celdas consisten en un edificio de sección rectangular de aproximadamente 60x12 m en planta y 5,2 m de altura.

El interior de las celdas está formado por dos cámaras:

- Cámara de evaporación: En esta sección de la celda se encuentran los paneles reticulares de evaporación y sobre ellos las toberas de riego del líquido de proceso que cuentan con las siguientes características:
 - Rejilla tridimensional para el soporte de la lámina de líquido, fabricada en PEAD. Cuenta con una estructura soldada formando conductos rectos de sección triangular en tres dimensiones, ofreciendo una gran capacidad de mojado y retención del líquido y baja resistencia aerodinámica al paso del aire.
 - Utilización de un sistema de aspersión con toberas de paso ancho que evita el riesgo de atasco, y que funcionan a muy baja presión de agua, lo que elimina aerosoles y reduce la energía mecánica de bombeo del líquido.
 - El diseño del panel permite un mojado permanente por el efecto de retención de líquido.
- Cámara de retención: La segunda cámara de la celda es simétrica a la anterior. En esta cámara, sobre el mismo plano en el que se sitúan los paneles de evaporación se sitúan los paneles de retención de gotas. La cámara de retención está cubierta y sobre esta cubierta se encuentra el grupo moto ventilador que saca el aire húmedo hacia el exterior.

El suelo de la celda es una plataforma inclinada hacia un canal que comunica las celdas entre sí y con el depósito de recirculación.



Figura 3-2: Alzado de una celda de evaporación. Fuente: INCRO

c. Módulo de evaporación

Las 8 celdas de evaporación con las que cuenta la planta se agrupan en 4 módulos de evaporación.

Cada módulo de evaporación tiene asociada una bomba de recirculación que recircula el lixiviado desde el depósito de control y a través de las toberas de aspersión de las dos celdas de evaporación correspondientes.

El control del proceso de evaporación se lleva a cabo automáticamente por un PLC de la marca OMRON que procesa las distintas señales de entrada y envía las señales de respuesta a los diferentes equipos de la planta.

Para iniciar el proceso se ha de abrir la aplicación de SCADA que hay en el PC local de la planta de lixiviados y, una vez comprobada que la comunicación entre el PC y el autómatas es correcta y que se tienen medidas de temperatura y humedad, en la pantalla pulsar en el botón de Marcha/Paro, pasando el indicador bajo este botón de color rojo a verde. Dependiendo de las condiciones del clima la planta arranca o permanece a la espera.

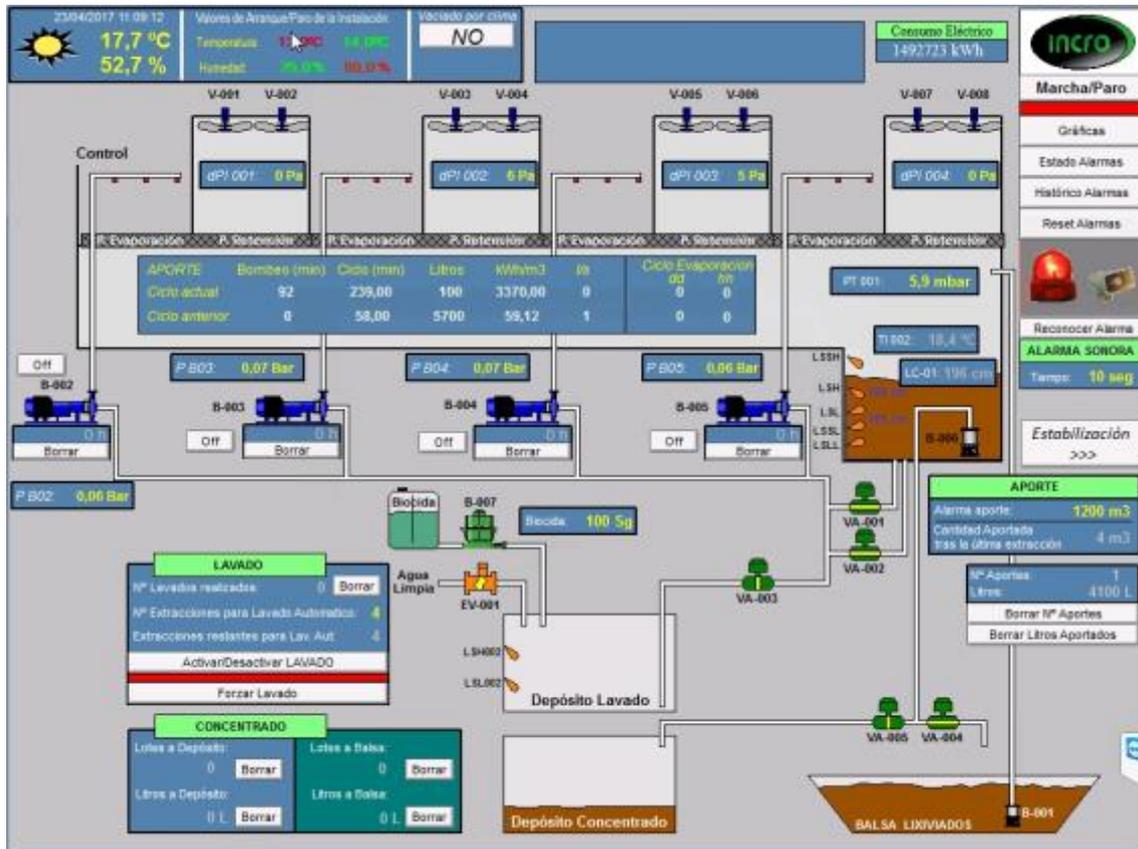


Figura 3-5: Pantalla del SCADA del sistema de control de la planta de lixiviados

Un psicrómetro mide la temperatura (TIC-001) y la humedad relativa ambiente (HIC-001). Según la señal de psicrómetro se desconectan las bombas de recirculación y los ventiladores cuando las condiciones ambientales son desfavorables al proceso.

Las condiciones climáticas se representan en la pantalla:

- Si la temperatura es superior a la de consigna y la humedad inferior aparece un sol.
- Si la humedad está por encima de la de consigna aparecen unas gotas de lluvia.
- Si la temperatura es inferior a la de consigna aparece una nube.

Para conocer los valores de consigna hay que hacer clic en el sol. El valor en rojo de la temperatura o la humedad relativa indica la temperatura/humedad relativa a la que la planta para. El valor en verde indica la temperatura/humedad relativa de arranque del proceso (+1°C en el caso de la temperatura, -5% para la humedad relativa). Para cambiar los valores hay que hacer clic en la lectura actual de temperatura o humedad y se despliega una nueva ventana con el valor actual y donde se permite introducir un nuevo valor. Por defecto los valores de consigna de temperatura y humedad respectivamente son 13°C y 80%.

Si los valores de temperatura y humedad relativa están dentro de lo normal se inicia el proceso tal y cómo se describe a continuación.

a. Aporte de lixiviado

El lixiviado se recoge en una balsa de almacenamiento que sirve además como decantación previa. La bomba de aporte B-001 situada en esta balsa envía el lixiviado a la planta de evaporación, regulándose los aportes mediante controles de nivel.

La entrada del lixiviado a la planta de evaporación se hace a través de conducciones de PEAD y de PVC pasando a través de un filtro de desbaste F-001 que impide el paso de sólidos de diámetro superior a 2 mm, atravesando después un contador FIT-001 para descargar en el interior de las celdas, en el depósito de control D-001. El contador FIT-001 da una medida del lixiviado que se ha tratado en el proceso, sumando un pulso cada 100 litros, y es el que permite llevar un registro de lo que se ha evaporado en la planta.

Cada celda consta de dos cámaras o secciones en cuyo interior se encuentra, a unos 3 metros de altura (medidos desde cota 0,00), un tipo de relleno denominado "panal". Podemos distinguir entre panales de evaporación, donde se evapora el líquido, y panales de retención, estando situado cada uno de los tipos de panal en una cámara diferente.

El aporte de lixiviado a la planta de evaporación es gobernado por el sistema de control, que actúa por las señales recibidas de los interruptores de nivel (LSH-001 y LSL-001) o alternativamente, si así se selecciona en el SCADA, del sensor de nivel por ultrasonidos (LC-01), situados todos ellos en el depósito de control.

Si la señal de nivel bajo (LSL-001) está en OFF se pone en marcha la bomba B-001 y se realiza el aporte. El aporte de lixiviado de la balsa no interrumpe la recirculación del líquido y por tanto la evaporación en el proceso.

b. Recirculación y evaporación del líquido

Una vez que se ha completado el primer aporte, cómo se aprecia en la Figura 3-4, las bombas de recirculación B-002, B-003, B-004 y B-005 succionan el líquido del depósito de control por medio de líneas en la que se colocan dos filtros caza piedras F-002/003, que impiden el paso de sólidos de diámetro superior a 4 mm, para la protección de la bomba.

Las bombas B-002/ /005 impulsan el líquido hacia los módulos, a través de las líneas correspondientes atravesando los filtros de desbaste F-004, F-005, F-006 y F-007 que impiden el paso de sólidos de diámetro superior a 2 mm, para continuar en cuatro colectores que llevan el líquido a los sistemas de aspersión de los panales de evaporación AP-001, AP-002, AP-003, AP-004, AP-005, AP-006, AP-007 y AP-008.

El proceso es controlado por el PLC de control, actuando sobre las bombas de la instalación y el juego de válvulas situadas en las líneas de aspiración de las bombas de recirculación B-002/ /005. Asimismo, desde el armario del cuadro eléctrico se pueden accionar y apagar todos los elementos de forma manual.

Los sistemas de aspersión AP-001/ /008 están situados encima del panal de evaporación de los módulos, extendiéndose sobre ellos y están constituido por 4 ramales cada uno paralelos entre sí.

Las cuatro líneas que salen de las bombas de recirculación actúan como colectores repartiendo el líquido a los distintos ramales. En cada uno de los ramales que llegan a los módulos hay dispuestas 4 toberas de aspersión, lo que hace un total de 128 toberas en la sección de evaporación. Las toberas son de cono lleno de ángulo 120°, lo que permite un riego continuo cubriendo toda la superficie de los panales.

Las toberas riegan a baja presión la cara superior de los panales de evaporación, donde el agua se evapora al ponerse en contacto con aire en circulación forzada. El exceso de líquido cae sobre la plataforma de hormigón escurriendo por gravedad hacia el depósito de control D-001.

Desde el depósito de control D-001 el líquido vuelve a ser aspirado por las bombas de recirculación B-002/ /005, recorriendo de nuevo todo el circuito y evaporándose constantemente.

Por el efecto de la evaporación el líquido se concentra y el nivel en la arqueta desciende hasta alcanzar el nivel bajo (LSL-001) o el sensor de nivel por ultrasonidos (LC-01) iniciándose un nuevo ciclo de aporte.

Los módulos de evaporación de la planta están asociados dos a dos a cada una de las cuatro bombas de recirculación que los alimentan de líquido de proceso por sus correspondientes ramales. El sistema permite arrancar cada grupo de bombas y ventiladores por separado y de hecho el arranque se realiza de forma progresiva activando primero la bomba de recirculación de un módulo y luego sus ventiladores y a continuación en el siguiente módulo hasta tener los cuatro módulos en recirculación y evaporando el lixiviado.

c. Evacuación del concentrado

Una vez que se ha alcanzado la concentración deseada en el depósito de control se produce la evacuación del concentrado obtenido.

La concentración debe controlarse de forma que no se supere el límite de funcionamiento, de forma que el líquido concentrado se mantenga bombeable y aspersable.

La concentración final a alcanzar se introduce como parámetro en el PC de control. Existe un sensor de presión PT-001 situado en una línea que hace un bypass entre las líneas de salida de las bombas de recirculación y el depósito de control D-001. Este sensor mide la presión de una columna de líquido de proceso de un metro de altura (ver Figura 3-7). Al aumentar la concentración del líquido de proceso aumenta la densidad del mismo, con el correspondiente aumento de la presión registrada por el sensor. Este sensor dará una señal de alarma por exceso de concentración. En el PC se programa el límite de presión que define la concentración máxima que debe alcanzar el lixiviado antes de trasvasarse al depósito de concentrado. Estos datos junto a los instrumentos proporcionarán las señales para la ejecución de las funciones.

Una vez alcanzada esta presión, la evacuación se realiza de forma automática, parando las bombas de recirculación y los ventiladores y poniendo en marcha la bomba sumergible de trasvase de concentrado B-006 que evacúa el concentrado a través de la línea de PVC desde el depósito de control, atravesando un nuevo filtro F-008, hacia el depósito de concentrado D-003. Con cada evacuación se actualiza el contador FIT-003 para llevar un control estadístico del funcionamiento de la planta.

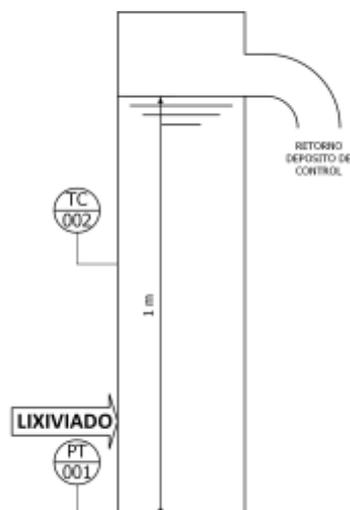


Figura 3-6: Esquema de columna para la medida de densidad y temperatura del lixiviado

Una vez que se alcanza el nivel LSLL-001 (muy bajo) en el depósito D-001, o el valor que se ha referenciado en el SCADA para ello, se para la bomba B-006 y se inicia la secuencia de aporte.

Una vez terminado el aporte se arranca de nuevo la instalación (ventiladores y bombas de recirculación).

Cada vez que se para la instalación por las condiciones climáticas, se inicia un tiempo de espera de 2 horas. Si transcurrido este tiempo las condiciones climáticas se mantienen adversas, en el SCADA se puede activar la opción para realizar un vaciado del líquido contenido en el depósito de control sobre la balsa para que el nuevo arranque se realice con un líquido lo menos concentrado posible.

d. Circulación del aire

El caudal de aire necesario para la evaporación es movido por aspiración por los grupos motoventiladores V-001/.../008, situados en la parte superior de las cámaras de retención de los módulos.

El aire entra por la abertura superior de la cámara de evaporación a baja velocidad y a continuación incide en los panales de evaporación P-001/ /008 en equi-corriente con el líquido aspersado, evaporando el agua si las condiciones de humedad y temperaturas lo permiten. La confluencia del aire en paralelo con el líquido a evaporar favorece que no se arrastren gotas.

El aire húmedo abandona la cámara de evaporación por su parte inferior entrando en la cámara de retención, y asciende pasando a través de los panales de retención de gotas S-001/ /008. Estos panales atrapan las gotas de líquido que pudiera arrastrar la corriente de aire, las hace coalescer hasta que, finalmente, caen sobre la plataforma de hormigón impermeabilizado.

La corriente de aire sin gotas abandona la sección de retención atravesando la cámara final de aspiración del aire donde se sitúan los grupos moto-ventiladores, siendo guiada por los conductos de salida a alta velocidad hacia el exterior.

Existen unos medidores de presión diferencial (dP-001/.../004) en cada módulo en uno de los ventiladores que miden la pérdida de carga del sistema (Pa), dando una idea del grado de ensuciamiento de los panales de evaporación. Si este valor es superior a 110 Pa (en el SCADA aparece un mensaje de alarma cuando se alcanzan), es necesario inspeccionar físicamente el estado de los panales y realizar una limpieza manual de los mismos si fuese necesario.

De acuerdo a la curva del ventilador de la celda que se muestra continuación y que ha sido proporcionada por el fabricante, el valor de pérdida de carga medido nos dará una idea del caudal de aire que circula.

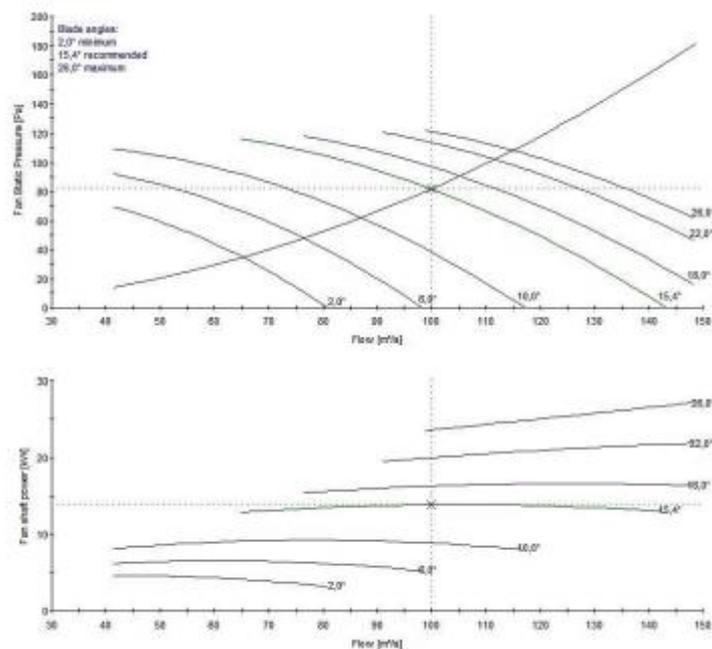


Figura 3-7: Curvas de caudal del ventilador para distintos caudales y ángulo de las palas. Fuente: Howden

e. Lavado de los panales

El mantenimiento de los panales se realiza mediante un lavado automático con agua bruta a la que se añade un producto biocida para evitar la proliferación de bacterias en los panales.

El ciclo de lavado se inicia cada vez que se completan 4 extracciones de concentrado por defecto. Adicionalmente, siempre que el operario lo considere oportuno, se puede forzar un lavado de la planta.

Al iniciarse el ciclo, el depósito de lavado D-002 debe estar lleno con agua bruta hasta el nivel LSH-002. El llenado del depósito se realiza a través de la línea AB-001. En esta línea se dispone de una electroválvula EV-001, controlada por el nivel LSH-002, mediante la cual se llena el depósito D-002 antes de cada operación de lavado.

Contiguo al depósito de lavado D-002 se dispone un depósito de 1000 litros (depósito D-004) de biocida que se adiciona al agua de lavado mediante una bomba de dosificación B-007. El biocida se aporta al iniciarse la secuencia de lavado.

El agua de lavado es aspirada por las bombas de recirculación B-002/005 a través de la línea de aspiración de agua de lavado. Tres válvulas automáticas VA-001, VA-002 y VA-003 situadas en la aspiración de las bombas permiten que las bombas B-002/005 impulsen el líquido de proceso o el agua de lavado hacia los paneles de evaporación.

El agua sigue el mismo recorrido que el lixiviado durante el proceso de operación normal, desde las líneas de impulsión de las bombas hasta los ramales de distribución hacia los módulos, que constituyen el sistema de aspersión AP-001/008, llegando a las toberas de evaporación, que en este caso actúan como “sprays” de lavado.

El agua de lavado riega a presión los panales de evaporación, ejerciendo una enérgica limpieza sobre ellos, al mismo tiempo que también se limpian las tuberías del circuito.

La secuencia de lavado se repite 2 veces: en la primera se lavan las celdas 1 a 4 y en la segunda las celdas 5 a 8. El agua de lavado se recoge sobre la plataforma inclinada y en el depósito de control. Una vez que se ha vaciado el depósito de lavado, se paran las bombas de recirculación, se cambian de posición las válvulas VA-001/003 y continúa el proceso normal de evaporación y concentración.

Durante la recirculación de esta agua de lavado continúa en cierta medida la limpieza de la instalación, ya que el agua está más limpia que el lixiviado en proceso y el agua continúa con determinada concentración de biocida durante algún tiempo.

En el PC se puede seleccionar la realización de los lavados automáticamente, cancelar los lavados o forzar un lavado (hacer un lavado en ese momento). En todo caso se recomienda realizar un mínimo de 12 lavados al año.

No obstante, además de estos lavados preventivos, se realiza una limpieza manual de los panales con máquinas de lavado con agua a presión portátiles, mucho más exhaustiva, cuando se observa una alta carga de residuos en los panales.

3.2.1.3. Procesos de Transferencia de Masa – Bases Teóricas

Las operaciones en las que se modifica la composición de soluciones y mezclas mediante métodos que no conllevan reacciones químicas, son muy comunes sobre todo en procesos en los que se intenta separar componentes de una sustancia [11].

Existen dos formas de separar componentes sin que ocurra una reacción química: los métodos mecánicos como el cribado o la filtración, y los conocidos como operaciones de transferencia de masa.

Teniendo en cuenta el tipo de proyecto que nos ocupa, nos centraremos en el desarrollo teórico de procesos de transferencia de masa.

En un proceso de transferencia de masa, una sustancia pasa a través de otra a escala molecular. Esta transferencia de masa ocurre como resultado de una diferencia o gradiente de concentraciones que favorece que la sustancia en mayor concentración se difunda hacia una zona de menor concentración.

Las diferencias entre concentraciones serán lo que determine la facilidad de completar el proceso de transferencia de masa.

- Operaciones de humidificación

Las operaciones consideradas de humidificación se dan cuando se produce una transferencia de masa interfacial cuando un gas se pone en contacto con un líquido puro, en el cual es insoluble.

Estas operaciones de humidificación engloban la deshumidificación y el enfriamiento del gas, mediciones de su contenido de vapor, y el enfriamiento del líquido y la humidificación del gas, en la última de las cuales nos centramos en este proyecto.

En estos casos, la materia transferida entre las fases es la sustancia que forma la fase líquida, que o bien se evapora o bien se condensa. Como en todos los problemas de transferencia de masa, para lograr una comprensión total de las operaciones es necesario familiarizarse con las características en el equilibrio de los sistemas. Sin embargo, puesto que la transferencia de masa en estos casos estará acompañada, invariablemente, de una transferencia simultánea de energía calorífica, también debe considerarse las características de entalpía de los sistemas. En nuestro caso, la transferencia de energía calorífica no será relevante para el proceso.

Debido a que la transferencia de la fase líquida se difunde en forma de vapor en el gas, es muy importante conocer las características de presión de vapor en el equilibrio.

La presión de vapor que ejerce cada líquido está determinada por la temperatura. Las curvas de presión de vapor en función de la temperatura son únicas para cada sustancia, pero tienen unas ciertas características similares.

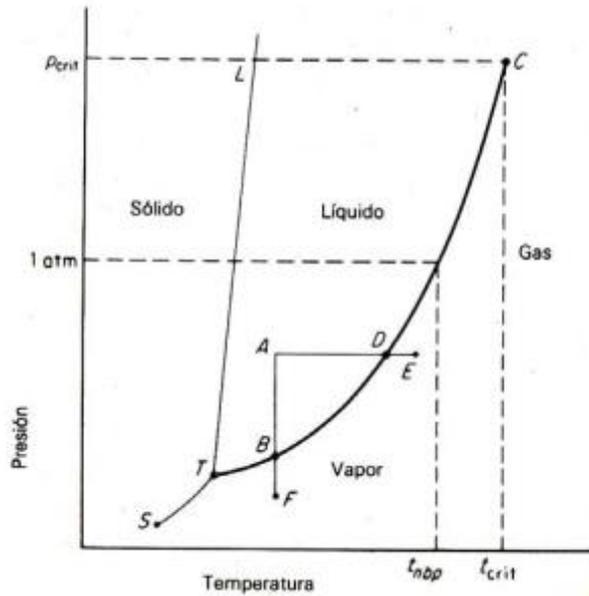


Figura 3-8: Curva de presión de vapor en función temperatura del agua [11]

La curva separa dos áreas de la gráfica, una en la que la sustancia existe en forma totalmente líquida y otra en la que está completamente en estado vapor.

En el punto A la sustancia es totalmente líquida y en el punto E será totalmente vapor. Los puntos que forman la curva TBDC son puntos en los que la sustancia puede coexistir en estado líquido y vapor en diferentes proporciones. El líquido sobre la curva TBDC se llama líquido saturado y el vapor, vapor saturado.

El punto T es el punto triple, en el cual pueden existir los tres estados de la materia y el punto C es el punto crítico, donde desaparece la distinción entre el líquido y el vapor y las propiedades del líquido son las mismas que las del vapor. A partir de esa temperatura la sustancia no se licuará para ninguna presión.

Siempre que en un proceso una muestra de fluido deba llevarse a través de la curva de presión de vapor, como en el proceso isobárico ADE o en el proceso isotérmico ABF, habrá un cambio de fase. Este cambio irá acompañado de la evolución (por condensación) o absorción (por evaporación) del calor latente de evaporación a temperatura constante, por ejemplo, en los puntos B o D en los procesos antes mencionados. El calor añadido o cedido al cambiar la temperatura se llama calor sensible.

La energía interna "U" de una sustancia es la energía total que tiene la sustancia por el movimiento de los átomos que la forman. No se tienen valores absolutos de "U" pero se pueden tener valores relativos frente a un estado arbitrario definido para la sustancia. La suma de la energía interna y el producto de la presión por el volumen de la sustancia es la entalpía:

$$H = U + p \cdot v$$

En un proceso por lotes a presión constante, en donde sólo se realiza trabajo por expansión contra la presión, el calor absorbido por la sustancia es la ganancia en entalpía:

$$Q = \Delta H = \Delta(U + p \cdot v)$$

En un proceso continuo en estado estacionario, la energía neta transferida al sistema en la forma de calor y trabajo, será la suma de la ganancia en entalpía más la energía potencial y cinética. Frecuentemente sucede que los cambios en la energía potencial y cinética son insignificantes en comparación con el cambio en entalpía y que no se realiza trabajo. En estos casos la ecuación anterior puede utilizarse para calcular el calor adicionado al sistema; este cálculo se denomina balance de calor

En las operaciones adiabáticas, en donde no hay intercambio de calor entre el sistema y sus alrededores, el balance de calor es simplemente una igualdad de entalpías en la condición inicial y final.

$$H_1 = H_2 \rightarrow \Delta H_{1-2} = 0$$

Lo mismo que con la energía interna solo podemos tener valores relativos de entalpía de una sustancia respecto a un estado estándar arbitrario. En general, para el agua las tablas que se usan comúnmente dan valores de la entalpía respecto a la sustancia a 0°C, la presión de vapor en equilibrio a esta temperatura y el estado líquido.

A continuación, se muestra la representación gráfica de la entalpía relativa de una sustancia, se muestra el estado líquido, vapor y gaseoso.

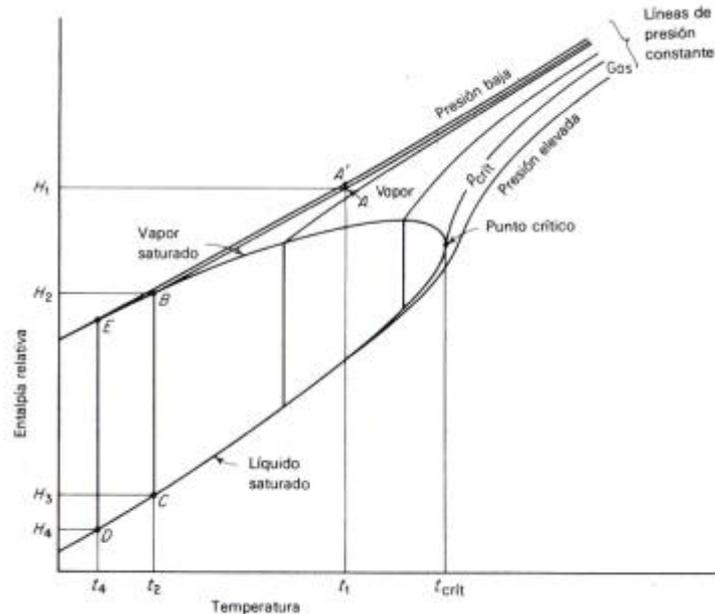


Figura 3-9: Entalpía relativa de una sustancia [11]

La distancia vertical entre las curvas de vapor y líquido saturado, representa el calor latente de evaporación a la temperatura correspondiente. Por lo tanto, el calor latente decrece al aumentar la temperatura y es cero en el punto crítico. En el estado de vapor a presiones bajas, la entalpía es prácticamente función de la temperatura; en todas las presiones en donde pueda utilizarse la ley de los gases ideales, las líneas de presión constante están superpuestas, y la entalpía es independiente de la presión. Excepto cerca de la temperatura crítica, la entalpía del líquido también es bastante independiente de la presión mientras no se alcancen presiones excesivamente elevadas.

El cambio de entalpía entre dos condiciones, como las presentes en A y D, pueden tomarse sencillamente como la diferencia en las ordenadas correspondientes a los puntos. Por lo tanto, para calcular la entalpía de la sustancia en la condición sobrecalentada en el punto A, con relación al líquido saturado en D, $H_1 - H_4$, se pueden sumar tres términos: el cambio en entalpía $H_1 - H_2$, que es el calor sensible del vapor de la temperatura de saturación t_2 a la misma presión, a la condición sobrecalentada en A, a la temperatura t_1 ; $H_2 - H_3$, que es el calor latente de evaporación en t_2 , y $H_3 - H_4$, que es el calor sensible del líquido de la condición final en D (temperatura t_4) al punto de ebullición a la presión dominante t_2 . Para un líquido o vapor, la pendiente de las líneas a presión constante a cualquier temperatura se denomina capacidad calorífica. Las líneas no son estrictamente rectas, de forma que la capacidad calorífica cambia con la temperatura. Sin embargo, utilizando la capacidad calorífica promedio o la pendiente promedio, se pueden calcular fácilmente los calores sensibles. Por lo tanto:

$$H_1 - H_2 = C \cdot (t_1 - t_2)$$

En donde "C" es la capacidad calorífica promedio del vapor a presión constante en el rango indicado de temperatura.

- Clasificación de operaciones gas-líquido

Existen varias operaciones que tienen como base el contacto de un gas con un líquido:

Operaciones adiabáticas

- a. Enfriamiento de un líquido. El líquido se enfría por la transferencia de calor sensible y también por evaporación. Por ejemplo, es útil para el enfriamiento de agua en contacto con aire atmosférico.
- b. Enfriamiento de un gas caliente. El contacto directo proporciona un intercambio de calor efectivo, siempre que no importe que haya vapor en el gas.
- c. Humidificación de un gas. Por ejemplo, para controlar la humedad de un gas en un proceso.
- d. Deshumidificación de un gas. Una mezcla de gas-líquido con un líquido frío produce que el vapor se condense. Esta operación puede tener muchas aplicaciones en la climatización, el secado y similares.

Operaciones no adiabáticas

- e. Enfriamiento por evaporación. Un líquido o un gas dentro de un tubo se enfría con un flujo de agua en forma de película en la superficie externa del tubo; a su vez, esta última se enfría por contacto directo con aire.
- f. Deshumidificación de un gas. Una mezcla de gas-vapor se pone en contacto con tubos refrigerantes y el vapor se condensa en los tubos.

- Fundamentos de las operaciones gas-líquido adiabáticas

Normalmente este tipo de operaciones se llevan a cabo poniendo en contracorriente un flujo del gas y del líquido dentro de una torre empacada.

En las siguientes figuras se muestra el balance de materia y energía para desarrollar las operaciones de gas-líquido adiabáticas. La primera de las dos figuras representa una torre de área transversal unitaria: la segunda de ellas representa una sección transversal de la torre de altura diferencial y muestra al líquido y al gas que fluyen uno al lado de otro, separados por la interfase gas-líquido.

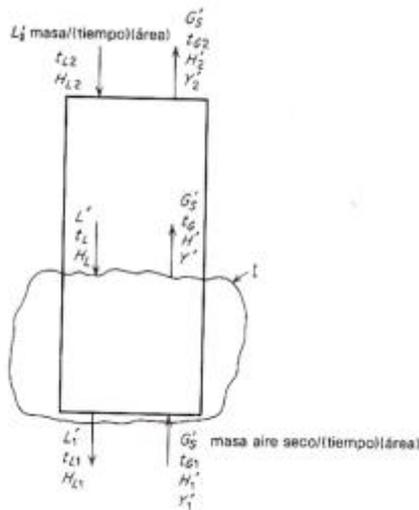


Figura 3-10: Torre empacada con flujo contracorriente gas-líquido [11]

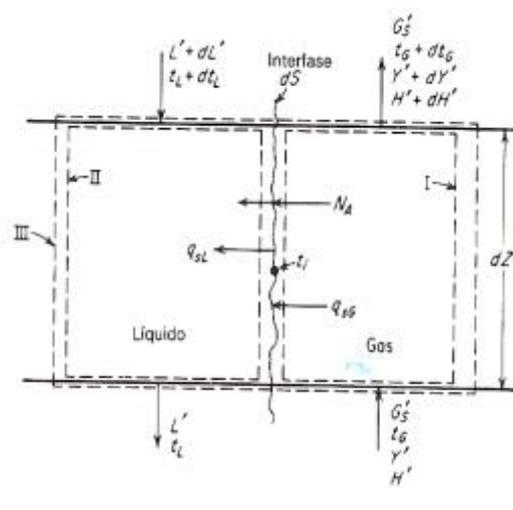


Figura 3-11: Sección transversal de la interfase gas-líquido [11]

Si realizamos un balance de materia para la sustancia A en la zona I de la primera figura tenemos que:

$$L' - L'_1 = G'_S \cdot (Y' - Y'_1)$$

$$dL' = G'_S \cdot dY'$$

Siendo:

L' : Masa de sustancia líquida por unidad de tiempo y área

G'_S : Masa de gas seco por unidad de tiempo y área

Y' : Humedad absoluta (kg de líquido/kg de gas seco) en el aire en equilibrio

Si realizamos un balance de entalpía sobre la zona I de la Figura 3-10:

$$L' \cdot H_L + G'_S \cdot H'_1 = L'_1 \cdot H_{L1} + G'_S \cdot H'$$

Siendo:

H_L : Entalpía del líquido

H' : Entalpía del aire húmedo, expresado en kcal/kg aire seco

Estas expresiones son análogas para el resto de la torre si se sustituye el índice 1 por el 2.

Si se realiza una serie de balances de energía en los tres entornos de la Figura 3-11, se ponen de manifiesto las implicaciones de las operaciones adiabáticas. En los balances del "contorno I" y el "contorno II" aparecen términos asociados al flujo de entalpía entre ellos que es la entalpía asociada al proceso de transferencia de materia. Por el contrario, en el balance global no se tienen estos términos de intercambio con otros procesos ya que se trata de un proceso adiabático y no hay intercambio de calor con el contorno.

Balance sobre el "contorno I":

$$G'_S \cdot H' + (G'_S \cdot dY') \cdot [C_A \cdot (t_G - t_0) + \lambda_0] = G'_S \cdot (H' + dH')$$

Siendo:

- C_A : Capacidad calorífica del aire
 $C_{A,L}$: Capacidad calorífica del líquido
 λ_0 : Calor latente de evaporación del líquido
 t_0 : Temperatura de referencia

Análogamente sobre el "contorno II":

$$(L' + dL') \cdot C_{A,L} \cdot (t_L + dt_L - t_0) = L' \cdot C_{A,L} \cdot (t_L - t_0) + G'_S \cdot dY' \cdot C_{A,L} \cdot (t_i - t_0)$$

Siendo:

- L' : Masa de líquido
 t_i : Temperatura de la interfase

Y aplicando el mismo procedimiento sobre el "contorno global o III":

$$G'_S \cdot H' + (L' + dL') \cdot C_{A,L} \cdot (t_L + dt_L - t_0) = L' \cdot C_{A,L} \cdot (t_L - t_0) + G'_S \cdot (H' + dH')$$

Si se combinan las tres expresiones anteriores e ignorando los términos de segundo orden se tiene:

$$L' \cdot C_{A,L} \cdot dt_L = G'_S \cdot \{C_S \cdot dt_G + [C_A \cdot (t_G - t_0) - C_{A,L} \cdot (t_L - t_0) + \lambda_0] \cdot dY'\}$$

Siendo:

- C_S : Capacidad calorífica del aire seco

- Humidificación adiabática de un gas

La humidificación de un gas es un caso especial en el que el líquido entra al equipo a la temperatura de saturación adiabática del gas entrante. El líquido debe introducirse continuamente en la zona de contacto de forma inmediata sin que haya transferencia de calor.

En estas condiciones el gas se enfriará y se humidificará siguiendo la trayectoria de la curva de saturación adiabática de la carta psicrométrica, según cómo sea el contacto el gas se acercará más al equilibrio con el líquido o sus condiciones de saturación adiabática.

En el caso del sistema aire-agua, el calor latente del agua es tan grande que se producen efectos de enfriamiento notables solo con una pequeña cantidad de evaporación. Los términos asociados al calor sensible en las expresiones obtenidas anteriormente, son por tanto despreciables frente a las asociadas al calor latente y se pueden simplificar de la siguiente manera:

$$L' \cdot C_{A,L} \cdot dt_L = G'_S \cdot C_S \cdot dt_G + G'_S \cdot \lambda_0 \cdot dY' \approx G'_S \cdot dH$$

Integrando la expresión anterior suponiendo que L' es constante si el nivel de evaporación es pequeño respecto al agua recirculada, se tiene:

$$L' \cdot C_{A,L} \cdot (t_{L2} - t_{L1}) = G'_S \cdot (H'_2 - H'_1)$$

La representación gráfica de este balance de energía se tiene representando H' frente a t_L :

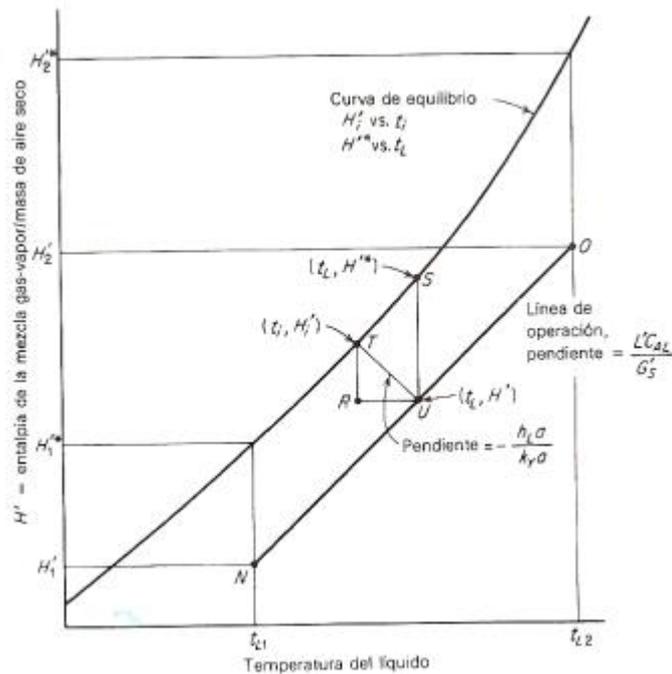


Figura 3-12: Entalpía de una mezcla gas-líquido en función de la temperatura del líquido [11]

La línea "ON" representa la ecuación anterior y contiene los puntos que representan las condiciones finales del gas y el líquido. Como $(L'_2 - L'_1)$ es pequeña comparada con L' , se trata de una línea recta con pendiente $(L' \cdot C_{A,L} / G'_S)$. La curva en el equilibrio en la figura se grafica para las condiciones del gas en la interfase gas - líquido, es decir, la entalpía del gas saturado a cada temperatura.

La entalpía del gas es en realidad función únicamente de su temperatura de saturación adiabática, que permanece constante a lo largo de todo el proceso de humidificación de un gas. La entalpía del líquido a temperatura constante también es constante, de tal forma que "la línea de operación" para el proceso de humidificación de un gas en una gráfica como la anterior será simplemente un único punto sobre la curva en el equilibrio. Por lo tanto, este diagrama no puede utilizarse para el diseño de un proceso de humidificación. Sin embargo, pueden utilizarse los cambios de temperatura y humedad, los cuales caen totalmente en la fase gaseosa y se muestran de forma esquemática en la figura siguiente.

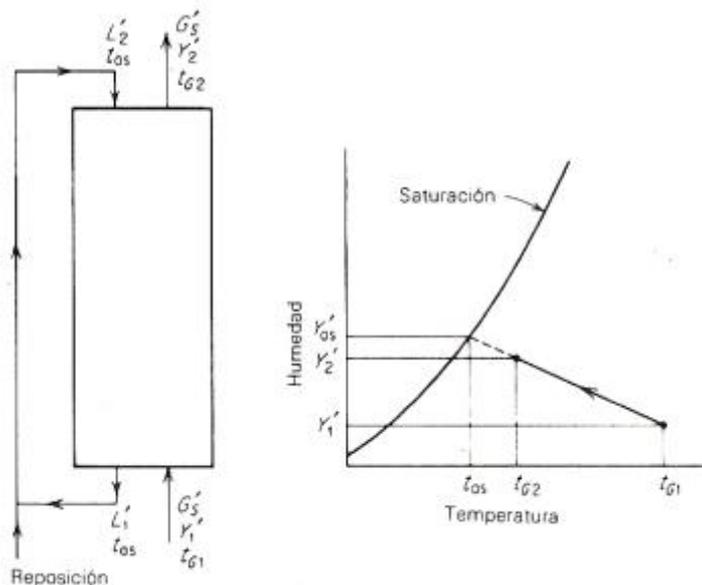


Figura 3-13: Curva del proceso de humidificación de un gas [11]

El proceso de humidificación de gases se puede describir en términos de la transferencia de masas mediante la expresión:

$$G'_S \cdot dY = k_Y \cdot a \cdot (Y'_{as} - Y') \cdot dZ$$

Siendo k_Y el coeficiente global de transferencia de masa [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], a la superficie específica del material de relleno que se emplee en el interior de la torre [m^2/m^3] y Z la longitud de contacto de la torre en metros [11].

3.2.1.4. El sistema aire-agua. Transformaciones de humidificación del aire con agua.

El sistema aire-agua se encuentra en la base de tantos procesos que existen cartas psicrométricas muy completas para esta mezcla vapor-gas.

Las gráficas psicrométricas representan las propiedades termodinámicas del aire húmedo. Las gráficas psicrométricas con coordenadas de entalpía y humedad relativa proporcionan una solución gráfica conveniente a la mayoría de problemas sobre aire húmedo con un mínimo de aproximaciones termodinámicas. La ASHRAE ha desarrollado varias gráficas psicrométricas con diferentes coordenadas [12]. Dichas gráficas son consistentes con los cálculos obtenidos mediante los métodos desarrollados por Goff y Gratch (1945), y Goff (1949) y también Hyland y Wexler (1983).

El proceso mediante el cual se evapora la corriente de lixiviado en la planta de eliminación de la Ecocentral Granada es un proceso de transferencia de agua hacia el aire ambiente, para lo cual ha de producirse un fenómeno de transferencia de masas. El volumen de lixiviados se reducirá ya que el agua de los lixiviados se evapora y humidifica el aire. Por lo tanto, para su descripción nos basamos en el proceso de humidificación del aire.

Los lixiviados provenientes de vertederos de RSU descritos comúnmente en la literatura están compuestos en un 95% por agua por lo que en la descripción del proceso ideal de evaporación se supondrá que el líquido de proceso se puede aproximar por agua pura.

La cantidad de agua que el aire puede absorber depende directamente de su temperatura, de su humedad relativa y de la temperatura del agua.

Para desarrollar el proceso ideal de evaporación del líquido de proceso partimos del esquema ideal de una celda básica de evaporación atmosférica INCRO [10].

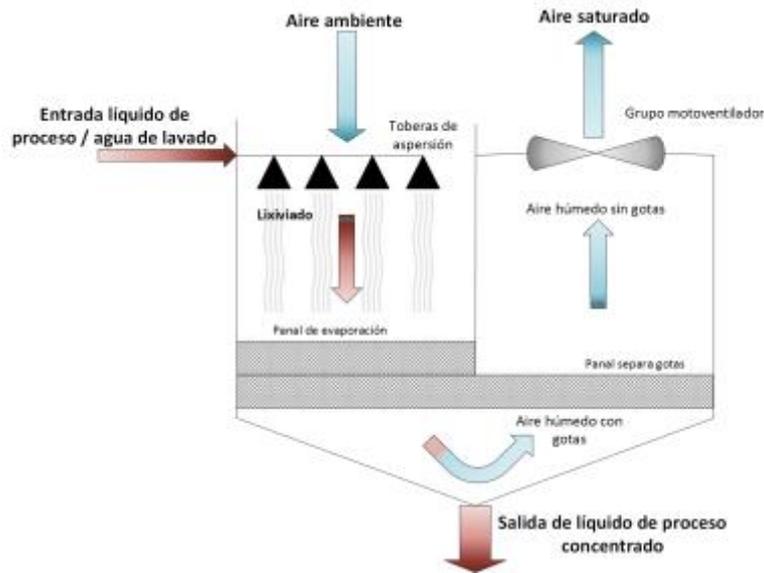


Figura 3-14: Representación ideal del paso de aire a través del lixiviado aspersado sobre los panales en una celda de evaporación

El líquido de proceso se introduce pulverizado en la celda a través de las toberas de aspersión a una temperatura determinada y entra en contacto con el aire ambiente que circula desde el exterior a través de la celda gracias al grupo motoventilador.

Se supone que el calor intercambiado con el exterior a través de las paredes del módulo se puede considerar nulo, ya que consideramos el proceso adiabático.

El aire que circula por el módulo deberá salir a la misma temperatura del líquido de proceso (T_{age}) (al tratarse de un proceso adiabático el calor intercambiado por convección es nulo) y con una humedad relativa del 100%, es decir, el aire ya no es capaz de retener más agua en forma de vapor. El aire húmedo de salida del proceso se vierte al ambiente y por lo tanto las condiciones del mismo no serán relevantes en el proceso [13].

En la figura siguiente se muestra el esquema del proceso de evaporación mostrando las magnitudes relevantes y el balance de materia y de masa:

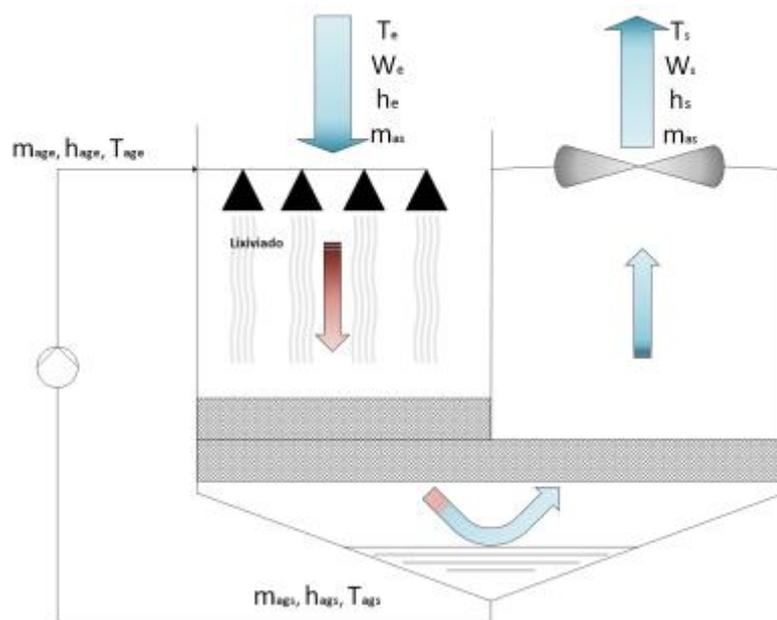


Figura 3-15: Circulación del aire en contacto con el líquido de proceso en una celda de evaporación y magnitudes relevantes

Partiendo de esta configuración, se pueden describir una serie de transformaciones que se pueden llevar a cabo al poner en contacto el líquido de proceso pulverizado con el aire ambiente según las condiciones de ambos fluidos [14]:

- A El líquido de proceso a mayor temperatura que la temperatura seca del aire: en esta situación, el aire absorberá agua en forma de vapor, es decir, se humidificará y aumentará su temperatura seca y su entalpía
- B Con el agua a la misma temperatura seca del aire: el aire se humidifica y aumenta su entalpía, pero mantiene la temperatura de entrada.
- C Con el agua a mayor temperatura que la temperatura húmeda del aire, pero menor que su temperatura seca: el aire se humidifica y se enfría, pero su entalpía final también aumenta.
- D Con el agua a la temperatura húmeda del aire o usando agua recirculada: el aire se humidificará y se enfriará, pero su entalpía final será prácticamente la misma.
- E Con el agua a menor temperatura que la húmeda del aire, pero superior a la de rocío: el aire se humidifica y se enfría al igual que antes, pero su entalpía final es inferior a la inicial.
- F Con el agua a la temperatura de rocío del aire: el aire se enfría sin cambio de humedad en un proceso de enfriamiento sensible que disminuye su temperatura y entalpía.
- G Con el agua a una temperatura inferior a la de rocío del aire: en estas condiciones del aire y el líquido de proceso el aire se deshumidificará, es decir, tendrá menor humedad específica. Además, baja su temperatura seca. Por lo tanto, en este caso se producirá condensación del vapor de agua en el aire y estaremos incrementando el volumen de agua recirculada en el módulo.

En las transformaciones A, B y C, la temperatura del agua T_{ag1} irá disminuyendo hacia la temperatura de saturación del aire húmedo mientras que en las E, F y G la temperatura del agua irá aumentando hacia la temperatura de saturación adiabática del aire en el punto 1 ($T_{ag1} \rightarrow T_{h1}$).

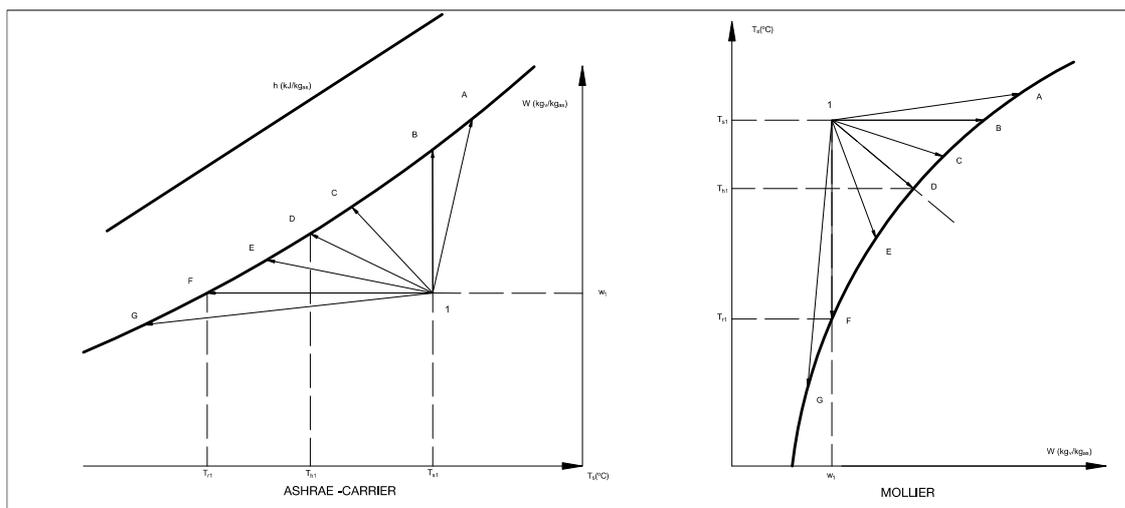


Figura 3-16: Posibles procesos psicrométricos cuando existe agua en contacto con aire

Previamente hemos definido un proceso ideal en el que el aire de salida se encuentra saturado. En el proceso real no se dispone de una interfase perfecta ni un tiempo infinito de contacto agua-

aire. Las condiciones del aire a la salida dependerán del mayor o menor contacto existente entre la corriente de aire y la de agua, pero siempre estarán entre las condiciones de entrada y las condiciones de saturación a la temperatura del agua, es decir las ideales.

Para aproximar el proceso ideal al real se define una eficiencia, por lo que suponemos que una parte del aire atraviesa la cortina de lixiviado sin que se produzca transferencia de masa ni ningún efecto en el proceso y que la otra parte ha sufrido por completo la transformación.

Definimos la eficiencia como: $\eta = 100 \cdot \frac{\dot{m}_{as\ tratada}}{\dot{m}_{as\ total}}$

siendo:

η	eficiencia en %.
$\dot{m}_{as\ tratada}$	masa de aire tratada por unidad de tiempo.
$\dot{m}_{as\ total}$	masa de aire total por unidad de tiempo.

De acuerdo a la regla de la palanca:

$$\frac{\eta}{100} = \frac{\dot{m}_{as\ tratada}}{\dot{m}_{as\ total}} = \frac{h_s - h_e}{h_{ag} - h_e} = \frac{W_s - W_e}{W_{ag} - W_e} = \frac{T_s - T_e}{T_{ag} - T_e} \quad (1)$$

siendo:

e	condiciones del aire a la entrada del módulo.
s	condiciones del aire a la salida del módulo.
T_{ag}	temperatura del agua.
h_{ag}	entalpía de un aire que con una humedad relativa del 100% y a la T_{ag} .
W_{ag}	Humedad específica de un aire que con una humedad relativa del 100% y a la temperatura del agua T_{ag} .

La humedad específica, la entalpía real, y de forma aproximada la temperatura seca de salida del aire en su paso a través de la cortina de agua que se encuentra a una temperatura T_{ag} (también se suele llamar temperatura del agua ideal, T_{ai}) y con una eficiencia η se calculan respectivamente como:

$$W_2 = W_1 + \frac{\eta}{100} \cdot (W_{ag} - W_1) \quad (2)$$

$$h_2 = h_1 + \frac{\eta}{100} \cdot (h_{ag} - h_1) \quad (3)$$

$$T_{s2} = T_{s1} + \frac{\eta}{100} \cdot (T_{ag} - T_{s1}) \quad (4)$$

Con estas expresiones podemos definir las condiciones del aire a la salida completamente.

Los valores de eficiencia dependen de las características del sistema de evaporación, en nuestro caso no tenemos valores de la eficiencia de los módulos de la planta de eliminación de lixiviados, pero en la literatura se encuentran algunos valores de eficiencias típicas para los humidificadores de aire [14].

Tabla 3-1: Eficiencias típicas en humidificadores

Eficiencia η (%)	Velocidad del aire	
	1,5 m/s	3,5 m/s
Corriente	70-80	50-60
Paralelo	75-82	65-70
Contracorriente		

Más adelante se desarrolla e implementa un método para estimar la eficiencia de los módulos de evaporación de los que cuenta la planta de forma experimental gracias a los datos de producción de los que contamos y a las ecuaciones del proceso psicrométrico descrito.

- Evaluación de la eficiencia

El dato de eficiencia de evaporación de las celdas de la empresa INCRO no está disponible. Si bien ya hemos visto algunos datos típicos de eficiencia para humidificadores, la eficiencia se puede ver afectada por muchos factores como el diseño, el mantenimiento y los materiales del evaporador en sí.

Sin embargo, gracias al gran número de datos que actualmente permite recoger el sistema de control y supervisión de la planta de lixiviados en tiempo real y de forma histórica, se podría llegar a conseguir un valor empírico de eficiencia, comparando datos de evaporación reales en un ciclo medidos por la planta frente a los valores teóricos ideales que se calculan en un apartado siguiente con la ecuación (5).

La precisión de la instrumentación de medida de la planta, sobre todo de los niveles de los depósitos, así como las cambiantes condiciones ambientales, dan pie a cierta incertidumbre en el valor de eficiencia que se podría obtener de forma empírica.

- Cálculo de la capacidad de evaporación de la planta.

Como ya hemos visto, el líquido de proceso es típicamente un 95% agua. A la hora de determinar el cálculo del lixiviado evaporado se ha considerado el proceso de humidificación del aire que entra en contacto con el agua en las celdas de evaporación (Ver Figura 3-14). Según sus condiciones de temperatura y humedad relativa, así como la temperatura del lixiviado que son nuestros datos, el aire se humidificará o perderá humedad según los casos antes descritos.

El objetivo de la planta es siempre humidificar el aire y evaporar en todo lo posible la masa de agua en recirculación. La masa de agua evaporada en una celda ($\Delta\dot{m}_{ag}$) viene dada por la expresión [13]:

$$\Delta\dot{m}_{ag} = \eta \cdot (\dot{m}_{ae} - \dot{m}_{as}) = \eta \cdot \dot{m}_{as} \cdot (W_{ag} - W_e) \quad (5)$$

Siendo:

- η Eficiencia de la celda de evaporación
- \dot{m}_{as} Flujo másico de aire seco
- W_e Humedad absoluta del aire de entrada
- W_{ag} Humedad absoluta del aire saturado 100% a la temperatura del líquido

El flujo másico de aire seco se calcula a partir del caudal de aire que impulsa el ventilador (\dot{Q} [m³/h]) en cada celda que es un dato que se obtiene de la curva de carga del ventilador de la Figura 3-7 y del volumen específico (v_e [m³/kg as]) del aire para unas condiciones de presión y temperatura según la expresión:

$$v_e = 287,055 \cdot \frac{T_e [K]}{P_T - P_v} \text{ [m}^3/\text{kg}_{as}] \quad (6)$$

$$\dot{m}_{as} = \frac{\dot{Q}}{v_e} \text{ [kg}_{as}/\text{h}] \quad (7)$$

Para calcular la humedad absoluta del aire en función de la presión de vapor del agua en equilibrio con el tenemos la siguiente expresión:

$$W = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_T - P_v} \text{ [kg}_{ag}/\text{kg}_{as}] \quad (8)$$

Siendo:

T_e	Temperatura del aire en grados Kelvin
P_T	Presión atmosférica [Pa]
P_v	Presión parcial de vapor [Pa]

Dado que conocemos la humedad relativa del aire podemos calcular la presión parcial de vapor en función de la presión de vapor de saturación:

$$HR = 100 \cdot \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \quad (9)$$

Se tiene que:

$$P_v = \frac{HR \cdot P_{vs}}{100} \quad (10)$$

La presión de vapor de saturación del agua en el aire en función de la temperatura está tabulada para un amplio rango de temperaturas y además existen una gran cantidad de expresiones empíricas en la literatura. Para nuestros cálculos hemos usado la expresión de Hyland and Wexler 1983b que propone la ASHRAE para el líquido entre 0° y 200°C, donde la temperatura es la absoluta en grados Kelvin y el valor de presión está en Pascales [12]:

$$\ln P_{vs} = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T$$

donde:

$C_8=$	-5,8002206 E+03
$C_9=$	1,3914993
$C_{10}=$	-4,8640239 E-02
$C_{11}=$	4,1764768 E-05
$C_{12}=$	-1,4452093 E-08
$C_{13}=$	6,5459673

Con lo cual P_{vs} :

$$P_{vs} = e^{(C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T)} \quad (11)$$

La presión atmosférica en función de la altura se puede calcular en base a la siguiente expresión [12]:

$$P_T = 101325 \cdot (1 - 2.25577 \cdot 10^{-5} \cdot Z)^{5,2559} \quad (12)$$

donde:

P_T	Presión atmosférica [Pa]
Z	Cota en metros

Calcularemos la humedad específica del aire de entrada W_e en función de la presión de vapor a la T_e y a la humedad relativa de entrada HR_e utilizando las ecuaciones anteriores.

Con estas mismas ecuaciones calcularemos la W_{ag} del aire saturado a la temperatura del líquido.

Con la ecuación de masa de agua evaporada ya podemos calcular lo que evaporamos en función de la eficiencia y los datos de temperatura, humedad relativa del aire y la temperatura del lixiviado.

- Factores que influyen en el proceso de evaporación

Existen una serie de factores que influyen en el proceso de evaporación del lixiviado en la planta objeto de esta auditoría energética.

Como ya se ha visto anteriormente, la temperatura del aire y su humedad relativa darán una idea de la capacidad de este para humidificarse y determinará la cantidad de lixiviado que es posible evaporar. Actualmente el sistema de control de la planta recoge estos datos meteorológicos y si se encuentran fuera de las consignas de operación prefijadas en el sistema la planta dejará de operar. Como veremos en posteriores capítulos de análisis de datos y propuestas de mejoras de la eficiencia en la planta, se hará un estudio en función de las condiciones del aire, el consumo energético y el coste de la energía empleada para ver cuando es óptima la operación de la planta.

Se observa también que la temperatura de lixiviado cuando se pone en contacto con el aire para su evaporación tiene una gran influencia en las propiedades físicas del aire húmedo y por lo tanto influirá en la humedad que es posible aportar al aire para evaporar el lixiviado.

Otro factor que impacta a la eficiencia es el grado de ensuciamiento de las superficies de evaporación. Los lixiviados arrastran una cierta cantidad de materiales sedimentables y a medida que los ciclos de evaporación aumentan la concentración del líquido de proceso en la planta y con ello la proporción de materiales sedimentables, estos se van depositando progresivamente sobre las superficies de los paneles.

Esto tiene dos efectos, primero la pérdida de superficie efectiva de los paneles para permitir el contacto aire-agua sobre ellos, y segundo, la pérdida de carga que sufre el aire impulsado por los ventiladores a través de la estructura reticular de los paneles que puede llegar a ser considerable si no se solventa, disminuyendo el caudal de aire que se dispone para la evaporación y por lo tanto perdiendo capacidad de evaporar el lixiviado. Como se puede comprobar en las curvas de caudal de los ventiladores de la Figura 3-7, un aumento de la pérdida de carga de 10 Pa provoca una disminución del caudal de aire impulsado de alrededor del 8% y dejaremos de evaporar una masa de agua proporcional. El sistema de control tiene una serie de transmisores de presión diferencial por cada módulo que envían una alarma al sistema SCADA cuando se superan los 110 Pa de pérdida de carga. En este caso, como se ha visto en el punto 3.2.1.2 de este apartado, la planta cuenta con un sistema de lavado automático a partir de un

número de ciclos programable, y además los operarios de mantenimiento de Ecocentral Granada realizan periódicamente tareas de lavado de los panales manualmente con agua a presión y productos de limpieza.

Otra consideración a tener en cuenta es el número de módulos de evaporación con los que cuenta la planta. Como se ha descrito la planta cuenta con cuatro módulos que pueden funcionar de forma independiente. La capacidad de los módulos para evaporar el lixiviado es la misma ya que son idénticos.

El número de módulos en funcionamiento estará determinado por la potencia de máximo disponible durante la operación de Ecocentral Granada en los periodos en los que se quiera evaporar el lixiviado. Esto es debido a que la potencia disponible hasta sobrepasar la potencia contratada por la organización puede llegar a ser inferior a la potencia que requieren para su funcionamiento los cuatro módulos. Por este motivo se puede llegar a funcionar con uno, dos, tres o cuatro módulos de evaporación a fin de no sobrepasar ese límite, para evitar provocar un disparo de las protecciones por sobrepotencia.

También hay que tener en cuenta las posibles averías o paradas para el mantenimiento de alguno de los módulos que limiten la capacidad de evaporación de la planta.

3.2.2. Características de los equipos de medida

Listado detallado de los equipos de medida de los que vamos a hacer uso en la auditoría energética y para el desarrollo de las propuestas de mejora de eficiencia energética.

Tabla 3-2: Listado de equipos de medida utilizados en la Auditoría Energética

Categoría	Equipo	Descripción	Ubicación	Características
Datos Meteorológicos	Estación meteorológica	Watchdog 2000. Spectrum Technologies	Perímetro del Complejo Medioambiental	-Data logger. Registro de datos cada media hora. -Descarga mensual manual de datos de la estación. -Datos recogidos: Humedad Relativa, Temperatura absoluta, Temperatura de rocío, Velocidad y dirección del viento, precipitación.
Datos de consumo de energía	Contadores de Energía eléctrica Planta de Lixiviados	Contador de pulsos por cada 1 kWh consumido.	Cuadro eléctrico de la Planta de Lixiviados	Envía un pulso al PLC de control de la Planta de Tratamiento de Lixiviados cada vez que el proceso consume 1kWh. Se muestra en el SCADA local.
Datos de consumo de energía	Analizador de Redes en Transformador 1	Modelo: CVMNRG96. Circutor	Armario eléctrico del Transformador 1	- Conectado al SCADA Wonderware de la instalación mediante Modbus. -Datos recopilados en el servidor de históricos del SCADA, el cual permite realizar consultas muy potentes. - Exportación de datos en formato csv y luego hoja de cálculo Excel.
Datos de consumo de energía	Analizador de Redes en Transformador 2	Modelo: CVMNRG96. Circutor	Armario eléctrico del Transformador 2	Mismas características para todos los analizadores de red
Datos de consumo de energía	Analizador de Redes en Transformador de Cola	Modelo: CVMNRG96. Circutor	Armario eléctrico del Transformador de Cola	Mismas características para todos los analizadores de red

Analizador de red



Modelo Circutor CVMNRG96

Características generales

El analizador de panel CVM-NRG 96 es un instrumento de medida programable; ofrece una serie de posibilidades de empleo, las cuales pueden seleccionarse mediante menús de configuración en el propio instrumento.

- Comunicación RS485 (Modbus RTU®) incorporado.
- Función medidor de energía
 - 1 GW·h en energía consumida.
 - 100 MW·h en energía generada.
- Valores instantáneos, máximos y mínimos de cada parámetro.

Figura 3-17: Analizador de red en los cuadros eléctricos de los transformadores

- Medición en verdadero valor eficaz.
- Datos de precisión:
 - Tensión: $0,5\% \pm 2$ dígitos
 - Corriente: $0,5\% \pm 2$ dígitos
 - Potencias: $1\% \pm 2$ dígitos

Contador de pulsos

Modelo Siemens SENTRON PAC3200



Características generales

El PAC3200 es un aparato de medida y monitorización de redes eléctricas que puede ser usado tanto para monitorizar independientemente hasta 50 parámetros o como parte de un sistema de automatización industrial o de gestión de la energía

- Comunicación RS485 (Modbus RTU®) incorporado.
- Datos de precisión:
 - Tensión: $\pm 0,3$
 - Corriente: $\pm 0,2$
 - Potencias y factor de potencia: $\pm 0,5\% 2$

Figura 3-18: Analizador de red en el cuadro eléctrico de la planta de lixiviados

Estación meteorológica

Modelo Spectrum Technologies Watchdog 2000



Figura 3-19: Detalle de la estación meteorológica data logger de Ecocentral Granada

Datos meteorológicos recogidos por la estación:

- Temperatura
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Ráfagas de viento
- Dirección del viento
- Temperatura de rocío

3.2.3. Características y clasificación de los equipos consumidores de energía

En la instalación de eliminación de lixiviados el consumo de energía ocurre en forma de energía eléctrica exclusivamente, por parte de los motores que accionan las bombas que impulsan el líquido de proceso y los que accionan los motorreductores de los ventiladores que hay en cada módulo.

También se identifica en el proceso objeto de esta auditoría un consumo de energía eléctrica en los servomotores eléctricos de las válvulas y en los equipos de automatización de la planta, como son el PC, el PLC y la instrumentación correspondiente. Sin embargo, los consumos de estos equipos son mucho menores que los de los motores, siendo su potencia instalada de entorno a 0,5 kW, por lo que no se clasificarían como grandes consumidores.

A continuación, se detallan los equipos consumidores de energía de la planta de eliminación de lixiviados:

Tabla 3-3: Listado de principales equipos consumidores de energía

Equipo	Tipo	Uds.	Potencia instalada	Voltios / Fases / Hz	rpm	Intens. (A)	Arranque
Bomba de aporte	Motor eléctrico	1	2,2 kW	400-690 / 3 / 50hz	2930	5 A	D
Bombas de recirculación	Motor eléctrico	4	11 kW	400-690 / 3 / 50hz	2930	27 A	ET
Bomba de trasvase de concentrado	Motor eléctrico	1	1,5 kW	400 / 3 / 50	2900	3,6 A	D
Bomba de achique	Motor eléctrico	1	0,25 kW	240 / 1 / 50	2800	2,2 A	D
Motorreductor ventilador	Motor eléctrico	8	18,5 kW	400-690 / 3 / 50hz	1465	35,5 A	ET

El consumo principal de energía en la planta de lixiviados se debe a la operación durante el proceso de evaporación en el que las bombas de recirculación y los ventiladores de impulsión del aire están en marcha. Estos son los elementos que funcionarán de forma más continuada durante el proceso de recirculación y evaporación, ya que las bombas de aporte, de trasvase de concentrado y de achique tienen un funcionamiento más puntual y por supuesto su consumo es mucho menor.

El sistema de control permite que cada bomba de recirculación y su módulo asociado funcionen de forma independiente durante la evaporación del lixiviado.

Por lo tanto, se tiene que la potencia instalada del proceso durante el ciclo de recirculación y evaporación, y teniendo en cuenta el consumo de la bomba de aporte de lixiviado cuando está en funcionamiento desde la balsa, es tal que:

Tabla 3-4: Consumo energético según grupos de evaporación en marcha

Equipos en funcionamiento	Aporte de lixiviado	Consumo real	Potencia Nominal
1 módulo y una bomba de recirculación	No	36,7 kW	48 kW
1 módulo y una bomba de recirculación	Sí	38,7 kW	50,2 kW
2 módulos y dos bombas de recirculación	No	73,4 kW	96 kW
2 módulos y dos bombas de recirculación	Sí	75,4kW	98,2 kW
3 módulos y tres bombas de recirculación	No	110 kW	144 kW
3 módulos y tres bombas de recirculación	Sí	112 kW	146,2 kW
4 módulos y cuatro bombas de recirculación	No	146,7 kW	192 kW
4 módulos y cuatro bombas de recirculación	Sí	148,7 kW	194,2 kW

El consumo real se ha determinado a partir de los datos de consumo energético recabados por el analizador de red 5-3 situado en el cuadro eléctrico del transformador de cola como se puede observar en el anexo 8.2.

En general la decisión de trabajar con uno con más o menos módulos de evaporación se toma de acuerdo a la potencia que está consumiendo el resto del complejo, ya que en los últimos tiempos el consumo de energía de la planta está sobrepasando la potencia contratada de la

Ecocentral Granada, lo que conlleva un incremento considerable en el término de exceso de potencia como penalización en la factura eléctrica y se podría llegar incluso a superar la potencia disponible en la subestación que alimenta a la planta en el peor de los casos. Según la demanda de potencia del resto del complejo es posible que no se pueda funcionar a la plena capacidad.

Este consumo energético nominal de los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de evaporación de lixiviados en esta instalación es independiente de la cantidad evaporada en cada momento, que cómo se ha visto en el apartado de la descripción del proceso psicrométrico de evaporación, dependerá de las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire ambiente y de la temperatura del lixiviado en ese momento. Por ello, es de suma importancia conocer el proceso psicrométrico para poder fijar las consignas de temperatura y humedad relativa para la operación de la planta.

3.2.4. Unificar de la instalación

El esquema unifilar se encuentra en el anexo 8.2 del documento y en este apartado se explicará la configuración de la instalación eléctrica de la planta.

3.2.4.1. Datos del sistema SCADA y las comunicaciones

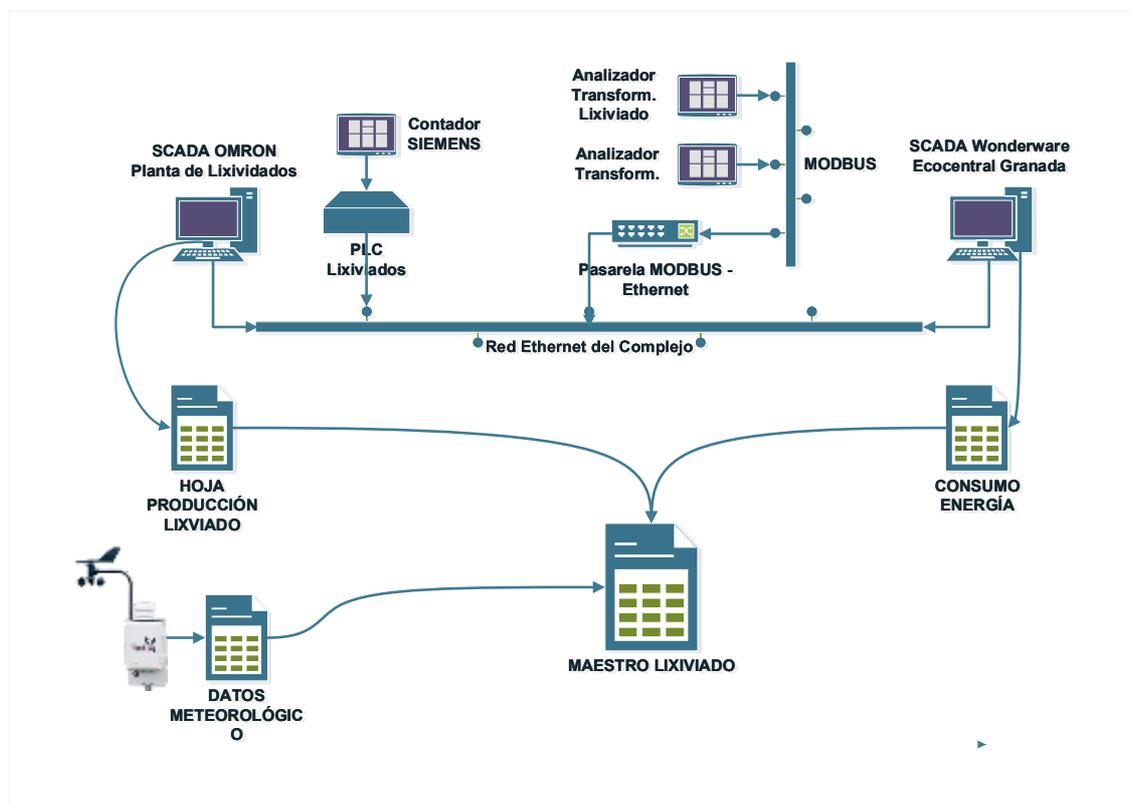


Figura 3-20: Arquitectura de adquisición de datos de Ecocentral Granada y la planta de lixiviados.

En la Figura 3-20 se presenta la estructura de adquisición de datos que se ha utilizado para la recopilación de los datos usados en la auditoría y el subsecuente análisis llevado a cabo.

En los capítulos siguientes se profundiza en las características de estos datos y el tratamiento que se ha hecho de ellos.

3.2.5. Características de los datos recopilados

Para la elaboración de esta Auditoría Energética se han recopilado gran cantidad de datos del año 2016 proporcionados por la organización y que se han obtenido de los sistemas de monitorización de la planta de lixiviados y de la Ecocentral Granada.

La planta de lixiviados cuenta con su propio SCADA para el control de la planta, como ya se ha visto en el punto anterior. Este sistema dispone de una capacidad muy limitada para el almacenamiento de los datos de evaporación de lixiviados que se miden en el sistema, del consumo energético que mide su analizador de red y de los datos de humedad relativa y temperatura ambiente medidos por el sistema. Por lo tanto, la recopilación de estos datos a lo largo del año 2016 se hace manualmente accediendo al PC de la planta de lixiviados sobre el que funciona el SCADA por parte de los técnicos de Ecocentral Granada.

En este proceso manual, se recogen los datos diarios de humedad relativa, temperatura ambiente, m³ de lixiviado evaporado, kWh/día consumidos y el índice calculado de kWh/m³. Estos datos han sido proporcionados por la organización en una hoja de cálculo en el período del 16/05/2016 al 11/10/2016. Este corresponde al periodo de funcionamiento de la planta de lixiviados en el año 2016.

El consumo energético recogido por el contador de energía de la planta de lixiviados solo obtiene información de lo que se consume en el proceso de evaporación sin tener en cuenta alumbrado exterior, sistema de vigilancia y máquinas de limpieza con agua a presión de los panales. Como ya se vio en el apartado 3.2.3 de caracterización de los equipos de medida, existen una serie de consumos energéticos que no se reflejan en este valor pero que sí aparecen en el consumo recogido por el analizador de red que está en el cuadro eléctrico del transformador que alimenta a la planta de lixiviados.

En los datos proporcionados existe una franja entre el 14/09/2016 y el 30/09/2016 en la que no se obtuvieron datos de evaporación de lixiviado del sistema por algún fallo en el sistema.

Tabla 3-5: Ejemplo de datos de evaporación recogidos en una semana

Fecha	Humedad Relativa media (%)	Temperatura (°C)	m ³ evaporados por la planta	kWh/m ³	kWh/día
1/6/16	30,4	22,8	88,5	13,982	13,982
2/6/16	32,0	22,3	133,5	21,108	21,108
3/6/16	38,3	21,9	94,6	23,430	23,430
4/6/16	36,3	20,4	89,4	25,340	25,340
5/6/16	38,3	21,3	98,6	26,377	26,377
6/6/16	27,8	25,4	83,4	19,101	19,101
7/6/16	33,0	28,5	84,5	20,850	20,850

3.2.5.1. Consumo energético

El valor de la energía activa total en kWh se saca de la base de datos de históricos del SCADA de Ecocentral Granada mediante una consulta en la que se consulta el valor cada 30 minutos para todo el año 2016. Esta consulta se hace mediante un query SQL y los datos se obtienen en un archivo con formato csv que permite importarlo a una hoja de cálculo para su manejo.

Estos datos de energía activa los recoge el analizador de redes 5-3 que hay en el cuadro eléctrico del transformador de lixiviados, que se puede ver en el Anexo 8.2 del esquema unifilar de la planta, y cuyas características se recogen en el apartado 3.2.2. Los datos son transmitidos al sistema SCADA a través de una pasarela MODBUS – Ethernet que conecta el analizador con la red de comunicaciones de la planta cómo se ve en la Figura 3-20.

El archivo de energía activa total para el año 2016 tiene un número de datos medio-horarios de 17520 valores. Estos registros presentan algunos fallos por problemas puntuales en los equipos de medida. En los casos en los que ha sido necesario, se han interpolado linealmente los valores que no estaban disponibles en el archivo de la base de datos del SCADA.

El consumo de energía medio-horario se calcula como la diferencia entre los valores de energía activa total de dos periodos consecutivos de media hora.

Multiplicando por dos el consumo energético medio-horario se calcula la potencia media consumida por la planta en una hora.

A partir del consumo real de energía de cada módulo de la planta de lixiviados se hace una estimación del número de módulos de evaporación de la planta que estaban en funcionamiento en cada periodo de media hora, dividiendo el consumo en ese periodo por el de un módulo (poner valor) y redondeando al entero más próximo. En 2016 el sistema de recogida de datos no estaba preparado para obtener automáticamente del autómata de control de la planta, el número de módulos en funcionamiento en cada momento. Actualmente este se ha podido implementar con una mejora en el sistema de adquisición de datos que permite conocer este dato en tiempo real.

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo con datos de consumo de energía y potencia, además del número de módulos de evaporación en operación estimado para cada media hora, de los que se dispone para establecer el consumo energético de la planta de lixiviados.

Tabla 3-6: Ejemplo de datos de consumo energético medio-horarios de la planta de lixiviados en 2016

Fecha y hora	Energía activa Total (kWh)	Consumo energético (kWh)	Potencia media (kW)	Módulos activos
30/5/16 20:00	110487,7344	57,1875	114,4	3,0
30/5/16 20:30	110545,5469	57,8125	115,6	3,0
30/5/16 21:00	110602,8438	57,296875	114,6	3,0
30/5/16 21:30	110660,5625	57,71875	115,4	3,0
30/5/16 22:00	110717,9844	57,421875	114,8	3,0
30/5/16 22:30	110736,6484	18,6640625	37,3	1,0

3.2.5.2. Factores de ajuste

En nuestro caso no aplican los factores de ajuste sobre los datos tomados porque no se cuenta con datos de un año base.

3.2.5.3. Verificación y precisión de los equipos de medida

Las especificaciones de precisión de los equipos de medida que se han utilizado en esta auditoría se recogen en la hoja de características de los mismos que se incluye en el apartado 3.2.2.

3.2.6. Tarifas actuales y proyectadas

La organización ha proporcionado al auditor un desglose del precio de la energía medio mensual que tuvo durante el año 2016 para el conjunto del complejo Ecocentral Granada. Este precio se ha obtenido a partir de un análisis de la energía consumida en cada periodo tarifario que se aplica al complejo según el Real Decreto 1164/2001 del 26 de diciembre.

Según el Artículo 7 del Real Decreto la tarifa aplicable es la Tarifa 6, en la modalidad 6.1, según la potencia contratada y el nivel de tensión. A su vez esta tarifa se estructura en 6 tarifas por periodo tarifario y que se aplican a todas las horas del año. El calendario tarifario para el año 2014 correspondiente a la tarifa 6.1 se muestra en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7: Calendario de periodos tarifarios en 2014 según OMIE

Mes						Horarios Mañana					Horarios Tarde														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Enero	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Febrero	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Marzo	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Abril	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Mayo	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	4	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Junio 1-15	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	4	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Junio 15-30	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Julio	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Agosto	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Septiembre	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	4	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Octubre	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Noviembre	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Diciembre	L-V	6	6	6	6	6	6	6	6	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2
	S-D	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

El precio unitario del kWh se calcula de acuerdo al Real Decreto 1164/2001 para cada uno de los 6 periodos, siendo el periodo 6 el de menor precio y el periodo 1 el de mayor precio.

De acuerdo a la Tabla 3-7 se comprueba que los precios de la energía serán más altos en los meses de enero, febrero, julio y diciembre mientras que agosto es el mes con los precios de la energía más bajos.

La tabla que se presenta a continuación contiene los precios medios mensuales y el tanto por ciento de energía que se ha consumido cada mes para cada uno de los 6 periodos en los que se estructuran los precios de la energía para la tarifa 6.1 para el conjunto del complejo Ecocentral Granada. La organización ha tenido a bien proporcionar solo un precio medio mensual ya que el precio contratado con la distribuidora es confidencial.

Tabla 3-8: Precios mensuales de la energía en Ecocentral Granada en 2016

Mes	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Precio en €/kWh
enero-16	26,7%	35,5%	0,0%	0,0%	0,0%	37,9%	0,149
febrero-16	28,5%	38,1%	0,0%	0,0%	0,0%	33,4%	0,148
marzo-16	0,0%	0,0%	24,4%	43,5%	0,0%	32,1%	0,116
abril-16	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	65,9%	34,1%	0,105
mayo-16	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	67,6%	32,4%	0,107
junio-16	17,3%	15,0%	13,1%	18,2%	0,0%	36,4%	0,145
julio-16	32,8%	27,6%	0,0%	0,0%	0,0%	39,6%	0,150
agosto-16	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,080
septiembre-16	0,0%	0,0%	26,9%	37,1%	0,0%	36,0%	0,114
octubre-16	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	62,1%	37,9%	0,105
noviembre-16	0,0%	0,0%	24,2%	41,1%	0,0%	34,7%	0,116
diciembre-16	26,6%	35,7%	0,0%	0,0%	0,0%	37,7%	0,151

A la hora de determinar un coste medio de la energía para la planta de evaporación de lixiviados se ha tomado en consideración el periodo de operación que ha tenido la planta en el año 2016, que estuvo comprendido entre el mes de mayo y el de octubre. Por lo tanto, se puede tomar como el precio medio de la energía para la planta de lixiviados como el promedio del precio en este periodo.

Se tiene un precio medio de la energía en el periodo de operación de la planta de 0,117 €/kWh.

En principio, no se contempla un cambio en la tarifa aplicable al complejo Ecocentral Granada a medio plazo por lo que en cualquier consideración en la que se calcule el coste y el ahorro económico en esta auditoría energética se hará en base al precio anteriormente establecido

3.2.7. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos con los que se cuentan del año 2016 se obtuvieron de una estación meteorológica *data logger*, que registra las condiciones ambientales de temperatura ambiente, temperatura de rocío, velocidad, dirección y ráfagas del viento, precipitación y la humedad relativa.

Estos datos se recogen en un archivo con valores medio horarios para todo el año, que cuenta con unos 17520 valores. En 2016 la estación meteorológica de Ecocentral Granada no estaba conectada a la base de datos de históricos del SCADA y el archivo de datos se recogía manualmente y se exportaba a una hoja de cálculo de datos meteorológicos.

Tabla 3-9: Ejemplo de datos meteorológicos recogidos

Fecha y hora	Humedad relativa (%)	Temp. amb. (°C)	Precipitaciones (mm)	Dir. del viento (grados)	Vel. Rafagas (km/h)	Vel. Viento (km/h)	Temp. Rocío (°C)
1/1/16 12:30	79,7	17,4	0	261	1	0	13,9
1/1/16 13:00	74,6	17,1	0	275	1	0	12,6
1/1/16 13:30	64,5	18,8	0	279	0	0	12,1
1/1/16 14:00	56,6	20,7	0	231	3	0	11,8
1/1/16 14:30	60,2	19,6	0	223	4	0	11,8
1/1/16 15:00	61,2	19,4	0	199	6	0	11,8
1/1/16 15:30	66,2	18,1	0	223	9	1	11,8

En la actualidad se ha implementado una mejora que tener acceso en tiempo real a los datos de la nueva estación meteorológica y representarlos en un panel de control en línea y se han incluido estos datos en la base de datos de históricos del SCADA de la planta.



Figura 3-21: Detalle del panel de control de datos meteorológicos en línea implementado en Ecocentral Granada en 2017.

3.2.8. Otros datos económicos

Actualmente, se tienen periodos de operación del complejo Ecocentral Granada en los que la potencia demandada supera a la potencia contratada. Esto supone que la distribuidora eléctrica cobrará un término extra en la factura por sobrepasamiento de potencia. El término de la factura por sobrepasamiento de potencia (F_{EP}) en euros viene dado por la normativa que regula la factura eléctrica. Para la tarifa 6.1 aplicable al complejo, se calcula de la siguiente forma, teniendo en cuenta los periodos tarifarios de la Tabla 3-7:

$$F_{EP} = \sum_{i=1}^6 K_i \cdot 1.4 \cdot A_{ei} \text{ [€]} \quad (13)$$

$$A_{ei} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=n} (P_{dj} - P_{ci})^2} \quad (14)$$

Donde:

K_i Coeficiente según el periodo tarifario

P_{ci} Potencia contratada en el periodo i en el periodo considerado

P_{dj} Potencia demandada en cada cuarto de hora del periodo i en el que se ha sobrepasado P_{ci}

El coeficiente K_i toma los siguientes valores:

Tabla 3-10: Valores del coeficiente K_i según periodo tarifario

Periodo tarifario	1	2	3	4	5	6
K_i	1	0,5	0,37	0,37	0,37	0,17

El coste debido a este término de sobrepasamiento de potencia puede llegar a ser bastante importante, sobre todo en los periodos de mayor coste, y podría considerarse su cuantía ante una eventual decisión de operar la planta de evaporación de lixiviados o no, aunque en general será muy difícil determinar qué influencia puede tener la operación de la planta de lixiviados sobre este término debido al carácter muy variable de la potencia demandada en el resto del complejo Ecocentral Granada.

Para el análisis que hemos llevado a cabo en esta auditoría, no se va a tener en cuenta este término a la hora de establecer los costes de la energía de forma directa, pero sí se ha tenido en cuenta para determinar el precio de la energía media mensual que proporciona la organización, así como el precio medio del kWh para el periodo de evaporación que utilizamos para nuestros cálculos en el apartado 3.2.6.

3.2.9. Análisis preliminar de los datos

Se ha tenido acceso a un gran volumen de datos referentes a la meteorología, el consumo energético de los equipos y la evaporación de lixiviados en la planta del año 2016. Sin embargo, debido a averías que han existido en los equipos de medida de la planta de lixiviados, a paradas no previstas y a fallos en las comunicaciones de los equipos analizadores de red conectados al SCADA, hemos encontrado periodos en los que la toma de datos no ha sido fiable. En los casos en los que se ha considerado factible se ha realizado una interpolación lineal de los datos y en otros casos se han desechado los datos por inconclusivos.

3.2.10. Trabajo de campo

Gracias a la estrecha colaboración con la organización el trabajo de campo por parte del auditor ha sido nulo. Los recursos y tiempo puestos a disposición por la organización han permitido realizar el trabajo de campo de la Auditoría Energética apoyándose en trabajadores técnicos cualificados de la propia organización.

3.2.10.1. Visitas

En el año 2016 se realizó una visita a las instalaciones en las que el auditor tuvo acceso a las instalaciones de todo el complejo de Ecocentral Granada. Lamentablemente, la planta de evaporación de lixiviados permaneció inactiva durante la visita por una avería grave.

3.2.10.2. Medidas adicionales

Teniendo en cuenta las características de los datos recopilados no ha sido necesario llevar a cabo medidas adicionales en el curso de la realización de esta auditoría.

3.3. Análisis

En el presente capítulo se lleva a cabo un análisis de los diferentes aspectos de la operación de la planta que se han podido estudiar basándonos en los datos proporcionados por la entidad y que se han caracterizado en el apartado 3.2.5.

Se busca dar una imagen de aspectos como la evaporación, el consumo energético a lo largo del año 2016 y los factores que influyen en la operación de forma más relevante.

Para ello se ha seguido la siguiente metodología para el trabajo con la gran cantidad de datos y cálculos relacionados, basada en hojas de cálculo:

- El análisis de los datos recopilados en la auditoría se ha centralizado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel.
- La hoja de cálculo desarrollada contiene todos los datos recopilados de consumo energético, datos meteorológicos y de producción de lixiviado así como tablas dinámicas y gráficos elaborados para el análisis en profundidad de los datos.
- En la hoja se han incluido los datos tarifarios aplicables de la energía y de costes para poder llevar a cabo un análisis económico de las medidas de ahorro.
- Las ecuaciones necesarias para el cálculo de los valores teóricos de producción se han implementado mediante código de Visual Basic que se incluye en el anexo 8.4.
- Para el cálculo del efecto de la pérdida de carga en el relleno de las celdas de evaporación se ha desarrollado un método basado en hoja de cálculo.

3.3.1. Indicador del desempeño energético

Es crucial para nuestro trabajo de auditoría caracterizar el desempeño energético del proceso de evaporación de forma precisa y significativa. Para ello, se ha tomado como indicador de desempeño energético más relevante la relación entre la energía consumida en kWh por m³ de lixiviado evaporado. El indicador permitirá además comparar el desempeño energético en distintos periodos y bajo distintas consideraciones.

Este indicador se calcula de la siguiente forma:

$$R_{eva} = \frac{Pot.}{m^3 \text{lix}/h} = \frac{n \cdot (2P_v + P_B) + P_{ap}}{Q_{lix}} \quad (15)$$

$$Q_{lix} = \frac{2n \cdot \Delta \dot{m}_{ag}}{0,95 \cdot \rho_{ag}} \quad (16)$$

donde:

- n : Número de módulos en funcionamiento
- P_v : Potencia del ventilador [kW]
- P_B : Potencia de la bomba de recirculación [kW]
- P_{ap} : Potencia media de la bomba de aporte [kW]
- $\Delta \dot{m}_{ag}$: Flujo másico de agua evaporada en la celda de evaporación [kg_{ag}/h]
- ρ_{ag} : Densidad del agua

El flujo másico de agua evaporada en la planta $\Delta \dot{m}_{ag}$ se calcula mediante la ecuación (5) planteada para el cálculo de la capacidad de evaporación de forma teórica o con los datos de producción recogidos manualmente a lo largo del período entre 16/05/2016 y el 11/10/2016.

A partir del agua evaporada calculamos un caudal de lixiviado tratado por la planta teniendo en cuenta que el agua supone un 95% del volumen de los lixiviados.

Los datos de potencia consumida se tienen de dos formas: el valor de energía activa medio horario recogido por el analizador de red que hay en el cuadro eléctrico del transformador de lixiviados y que queda registrado en la base de datos de históricos del SCADA de Ecocentral Granada, y las medidas que recoge el contador de pulsos instalado en el cuadro de control de la planta de lixiviados y que se recogen diariamente de forma manual en el PC de control.

En la siguiente tabla se muestran los valores promedio mensuales del indicador energético definido en la ecuación (15) para el año 2016. La primera columna recoge los valores calculados a partir del consumo energético medido directamente por el contador de la planta y la segunda columna el valor del indicador calculado con los datos de consumo energético recogidos por el analizador de red en el cuadro del transformador de lixiviados.

Tabla 3-11: Valores promedio mensuales del indicador energético en 2016

Mes	kWh/m ³	kWh/m ³ Transf.
mayo	20,2	20,6
junio	20,8	19,7
julio	22,1	20,9
agosto	33,8	33,1
septiembre	29,7	30,9
octubre	50,1	48,0
Valor medio	27,4	26,7

La comparación de los índices calculados cómo se presentan en la Tabla 3-11 nos permite comprobar que existe una diferencia entre los valores medidos por el analizador de red del transformador y la energía medida por el contador que está en el cuadro eléctrico de la planta de lixiviados.

Si bien la tendencia en el indicador se mantiene para ambos casos, existe una pequeña mejora en el mismo cuando se considera el consumo de energía recogido por el analizador de red del cuadro del transformador de lixiviados. Como ya se vio en el apartado 3.2.5, la medida de consumo arrojada por el contador de la planta debería ser ligeramente menor en general que la que da el analizador de red en el transformador de lixiviados debido a los servicios consumidores de energía aguas abajo del transformador que no contabiliza en contador del cuadro de la planta de lixiviados.

Se tiene que, contrariamente a lo esperado, los valores de energía obtenidos del contador de lixiviados son mayores que los que recoge el analizador de red del transformador, lo cual no se puede explicar en este momento salvo por algún problema en el equipo o fallo de configuración en el contador de energía de la planta de lixiviados.

Se comprueba además que revisando los datos ofrecidos por la organización de ambos consumos a lo largo de 2016 y comparándolos, se corrobora lo observado, aun cuando la diferencia en las medidas de la energía no varía en más de un 5%. Se ha tomado la decisión de analizar los datos en base a los valores de consumo energético que se obtienen del analizador de red del cuadro del transformador de lixiviados.

Desde la mejora que se ha implementado en 2017 en el sistema de captación de datos, y que permite recoger la medida de potencia consumida que arroja el dispositivo del cuadro eléctrico de la planta de lixiviados y su registro en el servidor de históricos del SCADA de Ecocentral Granada, se pasará a usar dicha medida para el análisis del consumo de la planta, ya que se están realizando una serie de mejoras que añadirán varios equipos nuevos no relacionados con los lixiviados a la línea que sale del transformador de cola y que previamente solo alimentaba a la planta de lixiviados y sus auxiliares. (Ver Anexo 8.2)

Dado que el objetivo de coste de la evaporación deseado por la organización son 3 €/m³ y que el precio medio de la energía son 0,117 €/kWh, obtenemos un límite para nuestro indicador energético de 25,64 kWh/m³, que redondeamos a 25 kWh/m³.

La empresa fabricante de los módulos de evaporación INCRO en su página web, da una serie de valores de consumo energético típicos de entre 10 y 80 kWh/m³ para nuestra configuración por lo que el indicador límite que hemos considerado está dentro del rango de eficiencia considerado por el fabricante [9].

3.3.1.1. Análisis en base al indicador energético considerado

En la Tabla 3-11 se observa una evolución del indicador en función del momento del año y por tanto de las condiciones meteorológicas.

Los meses más calurosos y secos de mayo, junio y julio arrojan un indicador del rendimiento de la evaporación entorno a 20 kWh/m³ y, salvo la excepción de agosto, en el que sube a pesar de las buenas condiciones de evaporación predominantes, se observa que en los siguientes meses, más fríos y húmedos, el indicador de rendimiento aumenta, como es de esperar.

Es obvio el interés de trabajar con un indicador cuanto más bajo mejor desde el punto de vista energético.

Dado que el consumo energético de la planta en operación es dependiente únicamente del número de módulos en funcionamiento y de los ciclos que lleve a cabo la bomba de aporte, se tiene que valor del indicador energético depende de las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire ambiente, de la temperatura del lixiviado en cada momento y de la eficiencia de los módulos de evaporación.

Los datos meteorológicos con los que se cuenta permiten conocer la temperatura y humedad del aire en cada media hora del año 2016. Sin embargo, la temperatura del lixiviado que se extrae de la balsa y se añade al proceso no es un dato conocido.

El sistema de control de la planta tiene una sonda de temperatura que mide la temperatura del lixiviado pero estos datos no se recogen en el SCADA local de la planta de forma automática ni se ha venido haciendo de forma manual por lo tanto no se cuenta con ellos.

Para realizar los cálculos en nuestro análisis hemos supuesto una serie de valores de temperatura del lixiviado basado en la temperatura de bulbo húmedo, que sí es un valor que conocemos y que es la temperatura a la que tiende el líquido en equilibrio con aire.

Tabla 3-12: Temperaturas mensuales estimadas del lixiviado de la balsa

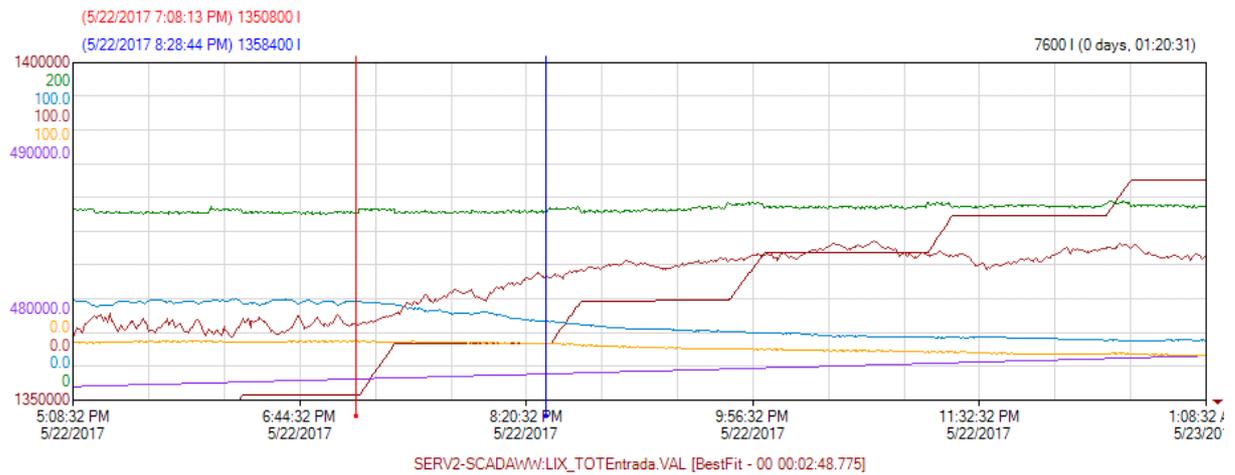
Mes	Temperatura lixiviado media (°C)
Mayo	15
Junio	17,7
Julio	20
Agosto	19,4
Septiembre	15
Octubre	13,5

Con estos datos de temperatura del aire, humedad ambiente y temperatura del lixiviado podemos calcular la capacidad de evaporación de nuestra planta, para una eficiencia y un número de módulos dado.

Sin embargo, el dato de la eficiencia de los módulos de evaporación no se tiene de forma directa ya que no es un dato que proporcione el fabricante y se ve influido por varios factores, como se vio en el apartado 3.2.1.4 de descripción del proceso de evaporación.

Gracias a las mejoras en el sistema de supervisión de la planta de lixiviados implantadas en 2017, se ha podido monitorizar en tiempo real y almacenar en la base de datos históricos del SCADA Wonderware los valores de energía activa total consumida, número y duración de los periodos de aporte, así como la cantidad de lixiviado aportado desde la balsa en cada uno de los ciclos de evaporación.

De esta misma forma, a partir de 2017 también se tienen datos de temperatura de lixiviado y la concentración del mismo durante el proceso de evaporación.



Tag Name	Description	N...	Server	Color	Units	Minimum	Maximum	ID Address
<input checked="" type="checkbox"/> LIX_TOTEntrada.VAL	Lectura, Contador lixiviados entrada, Lixiviados	2	SERV2-S...	Red	I	1350000	1400000	\\SERV2-SCADA\WwL...
<input checked="" type="checkbox"/> Analiz_Lixiviados.Potencia_Activ...	Potencia Activa Total, Analizador Lixiviados, Ar...	3	SERV2-S...	Green	kw	0	200	\\SERV2-SCADA\WwL...
<input checked="" type="checkbox"/> LIX_AireTemperatura.VAL	Lectura, Medidor de temperatura en aire ambie...	4	SERV2-S...	Blue	°C	0.0	100.0	\\SERV2-SCADA\WwL...
<input checked="" type="checkbox"/> LIX_AireHumedad.VAL	Lectura, Medidor de humedad en aire ambie...	5	SERV2-S...	Orange	%	0.0	100.0	\\SERV2-SCADA\WwL...
<input checked="" type="checkbox"/> LIX_TempProceso.VAL	Lectura, Temperatura trasvase concentrado, Li...	6	SERV2-S...	Yellow	°C	0.0	100.0	\\SERV2-SCADA\WwL...
<input checked="" type="checkbox"/> Analiz_Lixiviados.Energia_Activa...	Energia Activa Total, Analizador Lixiviados, Are...	7	SERV2-S...	Purple	kWh	480000.0	490000.0	\\SERV2-SCADA\WwL...

Figura 3-22: Gráficas del SCADA con variables de la planta de lixiviados

En la figura anterior se muestra un periodo en el que se aprecian varios ciclos de aporte de lixiviado, la energía activa consumida en cada momento además de algunos valores de las condiciones ambientales medidos por el psicrómetro de la planta de lixiviados.

En base a los nuevos datos a los que se tiene acceso y coincidiendo con la vuelta a la operación de la planta de lixiviados en torno a mediados de mayo de 2017, se ha llevado a cabo un análisis de la eficiencia de los módulos de evaporación. En la tabla siguiente se muestran los datos recabados y la eficiencia calculada a lo largo de 12 ciclos de aporte y evaporación en la planta en un día.

Tabla 3-13: Análisis de la eficiencia obtenida en los ciclos de evaporación

Inicio ciclo	Fin aporte	Fin ciclo	Tiempo Evap. [h]	Tiempo aporte [h]	Lixiviados aportados [l]	T amb. [C°]	HR [%]	T lixi. [C°]	Agua Evap. Máx [l]	Efi.	kwh/m ³
21/5/17 10:15	21/5/17 10:33	21/5/17 11:44	1,48	0,30	8300	22,5	19	12,5	22200	35,5%	20,55
21/5/17 11:44	21/5/17 12:01	21/5/17 12:52	1,13	0,28	8000	25	15,5	13,5	19094	39,8%	16,35
21/5/17 12:52	21/5/17 13:10	21/5/17 13:57	1,08	0,30	8300	26,5	16	14	17967	43,9%	15,00
21/5/17 13:57	21/5/17 14:15	21/5/17 15:10	1,22	0,30	8400	26,5	17,5	14	19174	41,6%	16,30
21/5/17 15:10	21/5/17 15:25	21/5/17 16:18	1,13	0,25	7600	26	19,5	15	18944	38,1%	17,09
21/5/17 16:18	21/5/17 16:35	21/5/17 17:33	1,25	0,28	7800	25,5	22,5	15	19358	38,3%	18,31
21/5/17 17:33	21/5/17 17:47	21/5/17 18:42	1,15	0,23	7300	24,5	25,5	15	16953	40,9%	18,25
21/5/17 18:42	21/5/17 18:58	21/5/17 20:19	1,62	0,27	7400	23	31	15	21694	32,4%	24,58
21/5/17 20:19	21/5/17 20:36	21/5/17 21:35	1,27	0,28	7500	21	34,5	14,5	16259	43,8%	19,56
21/5/17 21:35	21/5/17 21:49	21/5/17 23:12	1,62	0,23	6900	19,5	38	14	19374	33,8%	26,64
21/5/17 23:12	21/5/17 23:26	22/5/17 1:23	2,18	0,23	6700	18,5	50	13,5	17175	37,1%	37,55

Para cada ciclo, se mide el tiempo entre aportes y el tiempo de funcionamiento de la bomba de aporte directamente de una gráfica como la de la Figura 3-22 del SCADA Wonderware. En esta misma gráfica se obtiene el número de litros de lixiviado que se introduce en el depósito de control con cada aporte.

Estos datos, junto a las condiciones ambientales y la temperatura del lixiviado, se recopilan en una hoja de cálculo y se utiliza la función de Visual Basic que implementa la ecuación (5) para calcular la cantidad de agua evaporada máxima teórica que se puede evaporar en cada periodo.

Como se vio en la definición de la eficiencia de la ecuación (1), la relación entre la cantidad de lixiviado introducido en cada aporte, que es la cantidad real que se evapora en total en ese ciclo, y la capacidad máxima teórica de evaporar en el mismo, es la eficiencia de la planta calculada durante un ciclo de evaporación.

El análisis se realizó durante un periodo de tres días en el que se calculó la eficiencia para un total de 45 ciclos. La Tabla 3-13 muestra un ejemplo del análisis llevado a cabo.

Se ha comprobado que la eficiencia así calculada varía para cada periodo de forma apreciable. En principio esta variación se produce porque en cada aporte la cantidad de lixiviado introducida tiene una cierta incertidumbre, ya que los sensores de nivel bajo y alto del depósito se basan en unas boyas de flotación que pueden dar falsas medidas por las espumas del lixiviado presentes en el depósito y la turbulencia del lixiviado cuando entra en el depósito.

Sin embargo, la variación media a lo largo de todos los ciclos estudiados se puede considerar válida y se ha tomado un valor medio de eficiencia para nuestra planta de un 36,8%. Este valor es algo inferior a los valores de eficiencia para humidificadores de la literatura de la Tabla 3-1 pero es consistente con los mismos.

También se ha hecho un análisis de frecuencia del indicador energético observado en los ciclos estudiados para tener una idea de los valores que se pueden esperar.

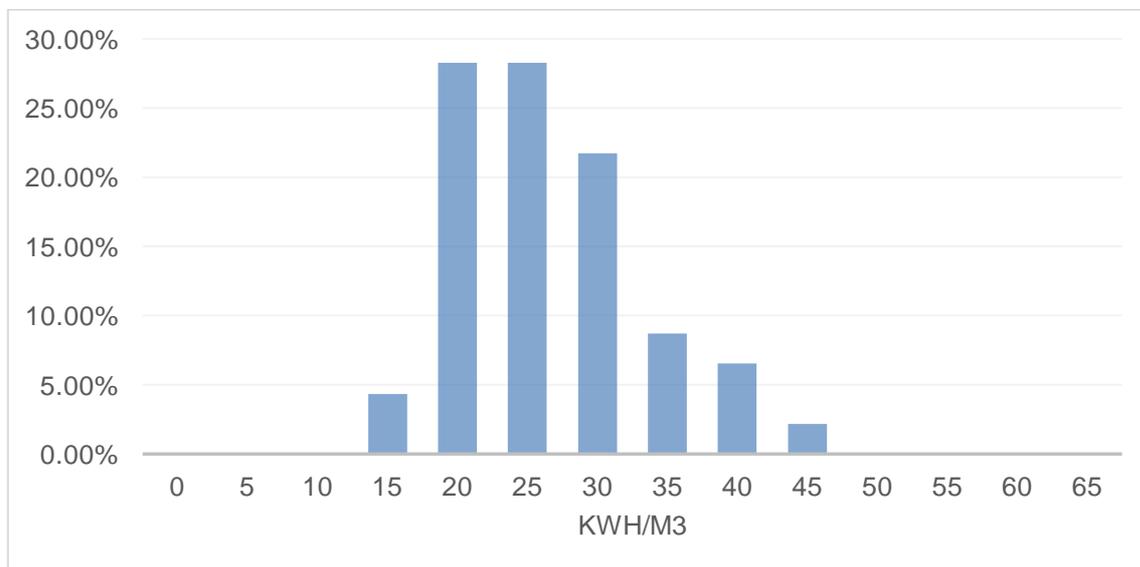


Figura 3-23: Distribución de los indicadores energéticos observados en los ciclos completos analizados

De los datos del indicador obtenidos, un 78,3% de los valores se encuentran entre los 20 y los 30 kWh/m³. Si consideramos el precio medio de la energía anteriormente establecido de 0,117 €/kWh esto nos da unos valores de entre 2,34 €/m³ y 3,51 €/m³, por lo que hay valores por encima del objetivo de gasto de la organización en la operación de la planta durante el periodo estudiado del mes de mayo de 2017.

Se tienen datos muy completos de la operación de la planta a lo largo de 2016, con un periodo de muestreo de media hora, como se ha visto en capítulos anteriores. A partir de estos datos se

han calculado valores medios diarios para el periodo completo de funcionamiento de la planta de lixiviados, los cuales se muestran en la tabla Tabla 3-14. Se incluyen los siguientes valores:

Tabla 3-14: Datos de evaporación recopilados y estimados en 2016

Fecha	HR [%]	Temp. media [°C]	Evap. Planta [m³]	Evap. Est. [m³]	Evap. Corr. [m³]	kWh Lixiviados	kWh Transf.	kWh Corregido	kWh/m ³ medido	kWh/m ³ Transf.	kWh/m ³ Estimado
16/5/16	55,7	18,3	19,9	0,0	0,0	92,0	43,9	0,0	4,6	2,2	0,0
17/5/16	38,5	20,5	16,3	8,5	0,0	241,9	267,5	0,0	14,8	16,4	27,5
18/5/16	35,9	22,6	45,7	36,6	21,5	839,0	870,8	459,0	18,4	19,1	23,5
19/5/16	42,2	21,1	39,6	56,8	25,8	1.048,3	1.448,0	490,4	26,5	36,6	25,2
20/5/16	42,6	22,2	44,1	36,5	24,1	927,9	869,6	486,2	21,0	19,7	23,9
21/5/16	35,0	23,1	50,3	29,8	0,0	1.065,0	997,9	0,0	21,2	19,8	35,3
22/5/16	34,2	23,2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	--	--	0,0
23/5/16	32,9	23,8	62,8	25,8	25,8	604,1	566,6	566,2	9,6	9,0	22,6
24/5/16	29,6	24,1	21,3	32,3	32,3	656,5	659,1	655,8	30,8	30,9	19,9
25/5/16	66,8	18,4	0	0,0	0,0	0,0	8,5	0,0	--	--	0,0
26/5/16	41,7	21,3	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	--	--	0,0
27/5/16	25,4	24,8	63,2	41,2	41,2	897,0	844,5	826,9	14,2	13,4	20,9
28/5/16	49,3	18,2	22,8	25,2	25,2	545,0	514,5	514,5	23,9	22,6	20,7
29/5/16	44,9	17,3	24,1	53,6	53,6	895,6	973,8	958,8	37,2	40,4	18,5
30/5/16	34,5	20,6	59,1	35,7	11,8	1.000,0	952,0	233,4	16,9	16,1	26,3
31/5/16	39,8	20,2	39,4	46,9	39,2	918,0	861,6	656,8	23,3	21,9	17,6
1/6/16	30,4	22,8	88,5	70,7	62,1	1.237,4	1.128,1	898,4	14,0	12,7	15,9
2/6/16	32,0	22,3	133,5	139,4	95,7	2.817,9	2.647,0	1.436,1	21,1	19,8	18,6
3/6/16	38,3	21,9	94,6	117,0	99,5	2.216,5	2.081,7	1.617,3	23,4	22,0	17,4
4/6/16	36,3	20,4	89,4	140,6	140,6	2.265,4	2.110,2	2.110,2	25,3	23,6	14,6
5/6/16	38,3	21,3	98,6	146,0	130,7	2.600,8	2.567,2	2.162,7	26,4	26,0	16,8
6/6/16	27,8	25,4	83,4	81,5	75,1	1.593,0	1.412,0	1.237,4	19,1	16,9	16,7
7/6/16	33,0	28,5	84,5	66,6	43,5	1.761,8	1.680,6	851,2	20,9	19,9	25,0
8/6/16	28,6	28,7	168,7	171,3	171,3	2.925,4	2.747,4	2.747,4	17,3	16,3	16,2
9/6/16	22,7	28,7	182,6	185,3	185,3	2.918,0	2.741,5	2.741,5	16,0	15,0	14,8
10/6/16	33,8	26,0	114,8	200,2	200,2	2.611,4	2.538,4	2.538,4	22,7	22,1	12,6
11/6/16	36,9	24,1	166,4	184,0	184,0	2.704,2	2.490,5	2.490,5	16,3	15,0	13,4
12/6/16	25,9	26,2	160,7	206,5	206,5	2.777,9	2.690,0	2.690,0	17,3	16,7	12,8
13/6/16	29,1	27,7	136,9	126,5	126,5	1.917,3	1.713,9	1.713,9	14,0	12,5	13,5
14/6/16	30,8	26,8	148,9	200,9	200,9	2.880,0	2.731,3	2.731,3	19,3	18,3	13,5
15/6/16	45,2	20,9	77,4	165,7	165,7	2.535,7	2.608,6	2.608,6	32,8	33,7	15,4
16/6/16	43,8	17,1	66,6	132,3	132,3	2.239,1	2.017,7	2.017,6	33,6	30,3	14,6
17/6/16	45,3	17,5	133	151,8	151,8	2.164,0	2.050,3	2.045,2	16,3	15,4	13,1
18/6/16	27,6	22,6	176	155,4	137,1	3.413,9	3.221,3	1.921,7	19,4	18,3	20,2
19/6/16	34,9	22,1	148,8	98,3	20,6	3.617,3	3.695,5	462,5	24,3	24,8	36,2
20/6/16	34,1	21,4	173,7	111,2	53,9	3.332,6	3.147,5	1.104,0	19,2	18,1	27,1
21/6/16	34,0	23,0	104	91,8	45,1	3.119,1	2.938,7	905,3	30,0	28,3	31,6
22/6/16	26,4	25,4	162,2	60,8	0,0	3.135,5	2.957,5	0,0	19,3	18,2	47,2
23/6/16	33,3	25,7	155,9	157,8	129,2	3.348,0	3.168,1	2.373,4	21,5	20,3	19,9
24/6/16	24,7	28,5	189,1	144,8	112,7	3.118,8	2.975,8	1.969,4	16,5	15,7	20,2
25/6/16	25,5	28,9	205,4	165,1	125,9	3.442,9	3.261,7	1.999,4	16,8	15,9	19,5
26/6/16	32,2	24,7	178,6	128,5	87,8	3.530,9	3.436,8	1.741,7	19,8	19,2	26,3
27/6/16	51,2	25,2	109,6	38,5	3,0	1.792,0	1.597,8	73,3	16,4	14,6	41,9
28/6/16	41,7	26,9	151	65,3	16,9	3.128,0	2.951,4	394,2	20,7	19,5	45,0
29/6/16	48,9	25,2	121,2	76,4	4,8	3.134,4	3.076,8	111,4	25,9	25,4	40,4
30/6/16	38,9	25,3	166,8	94,4	46,8	3.144,8	2.837,5	884,7	18,9	17,0	30,1
1/7/16	32,7	25,5	193,2	146,4	146,4	3.780,9	2.506,8	2.506,8	19,6	13,0	17,1
2/7/16	33,8	24,9	185,6	196,8	196,8	3.009,3	3.167,0	3.167,0	16,2	17,1	15,9
3/7/16	32,6	25,6	159,1	266,1	266,1	2.815,0	3.569,9	3.569,9	17,7	22,4	13,3
4/7/16	36,2	28,4	152,3	224,5	224,5	2.475,0	2.643,7	2.643,7	16,3	17,4	11,8
5/7/16	42,8	25,6	105,3	119,4	99,9	2.386,8	2.273,2	1.206,7	22,7	21,6	19,0
6/7/16	47,2	26,8	117,6	51,0	0,0	3.127,0	2.932,2	0,0	26,6	24,9	57,1
7/7/16	51,9	24,2	98,4	111,4	65,9	3.096,0	2.925,5	1.411,0	31,5	29,7	26,2
8/7/16	56,2	24,3	130,1	80,9	26,5	2.228,0	2.102,9	611,3	17,1	16,2	26,0
9/7/16	36,6	27,6	186,9	171,4	111,9	3.527,0	3.335,3	1.564,6	18,9	17,8	19,5
10/7/16	38,6	28,0	179,9	168,1	139,1	3.814,1	3.589,5	2.329,6	21,2	20,0	21,3
11/7/16	33,1	28,8	190,3	168,5	160,6	2.639,8	2.492,4	2.265,0	13,9	13,1	14,6
12/7/16	27,8	29,1	203,8	195,4	181,9	3.213,3	3.027,1	2.579,9	15,8	14,9	15,2
13/7/16	40,5	25,7	165,9	252,7	252,7	3.135,8	2.960,0	2.959,8	18,9	17,8	11,5
14/7/16	78,5	24,1	92,1	162,2	162,2	1.953,0	1.824,6	1.824,6	21,2	19,8	11,4
15/7/16	49,4	26,4	68,9	50,9	20,0	1.987,8	1.757,8	256,8	28,9	25,5	34,5
16/7/16	53,2	25,1	83,8	137,2	123,1	2.720,1	2.604,6	2.060,9	32,5	31,1	19,0
17/7/16	44,5	25,2	102,9	177,7	177,7	3.013,9	2.703,4	2.697,2	29,3	26,3	14,9
18/7/16	41,4	27,9	71,3	186,9	186,9	2.284,7	2.193,3	2.193,3	32,0	30,8	11,6
19/7/16	30,3	28,8	129,2	232,7	232,7	2.898,5	2.757,7	2.757,7	22,4	21,3	11,7
20/7/16	30,3	29,1	131,1	161,8	151,3	2.456,8	2.347,3	1.962,4	18,7	17,9	14,7

21/7/16	24,6	30,4	172	164,6	146,9	2.823,9	2.670,0	2.115,8	16,4	15,5	16,1
22/7/16	32,2	23,8	138,6	175,0	175,0	2.555,9	2.412,2	2.412,2	18,4	17,4	13,6
23/7/16	39,6	26,8	104,5	308,0	308,0	2.946,8	2.873,3	2.873,3	28,2	27,5	9,4
24/7/16	43,8	26,6	94,7	139,6	122,1	2.554,9	2.316,1	1.359,8	27,0	24,5	16,5
25/7/16	36,3	27,0	140,1	69,1	0,0	3.128,0	2.983,6	0,0	22,3	21,3	44,0
26/7/16	33,4	27,9	140,4	179,8	168,9	3.136,0	2.989,4	2.470,2	22,3	21,3	16,6
27/7/16	32,0	27,8	171	272,1	272,1	3.533,9	3.322,1	3.322,1	20,7	19,4	12,2
28/7/16	32,9	27,0	143,1	165,2	134,3	3.288,6	3.118,9	1.912,6	23,0	21,8	19,1
29/7/16	32,9	28,2	107	53,1	18,8	2.618,0	2.473,7	434,4	24,5	23,1	47,8
30/7/16	34,9	30,4	160,8	90,3	9,5	3.245,6	3.007,8	219,2	20,2	18,7	34,2
31/7/16	29,9	28,0	189,9	205,3	193,5	3.675,9	3.516,3	3.148,1	19,4	18,5	17,4
1/8/16	29,3	28,5	135,1	201,5	201,5	3.414,0	3.206,6	3.206,6	25,3	23,7	16,4
2/8/16	52,0	27,2	88,1	76,4	41,5	2.567,0	2.450,2	890,4	29,1	27,8	33,9
3/8/16	30,4	31,2	126,6	54,7	0,0	2.752,9	2.578,0	0,0	21,7	20,4	49,4
4/8/16	26,6	29,8	156,7	100,4	39,7	3.352,9	3.177,0	815,0	21,4	20,3	33,0
5/8/16	34,3	27,7	97,5	130,0	100,9	2.949,5	2.822,8	1.513,4	30,3	29,0	22,6
6/8/16	54,6	27,3	63,1	31,0	0,0	2.074,0	1.939,6	0,0	32,9	30,7	66,4
7/8/16	55,7	25,1	61,9	113,0	69,2	2.043,0	3.278,3	1.262,8	33,0	53,0	30,6
8/8/16	44,2	24,3	114,5	103,1	86,8	2.541,0	2.323,9	1.756,7	22,2	20,3	23,7
9/8/16	40,9	24,0	94,5	226,0	226,0	3.277,0	3.126,5	3.126,5	34,7	33,1	14,4
10/8/16	60,0	22,5	57,3	170,1	164,7	2.361,6	2.803,1	2.660,1	41,2	48,9	17,2
11/8/16	62,2	24,3	35,1	153,0	153,0	1.645,3	1.747,1	1.738,4	46,9	49,8	12,1
12/8/16	52,8	23,4	92,9	115,0	115,0	2.165,5	1.942,4	1.939,2	23,3	20,9	17,6
13/8/16	46,4	24,2	57,6	47,5	43,9	2.316,7	2.280,0	738,0	40,2	39,6	50,4
14/8/16	59,6	25,2	42,7	9,7	0,0	1.675,0	1.585,6	0,0	39,2	37,1	173,4
15/8/16	43,7	27,5	50,1	24,7	3,0	1.670,0	1.504,2	71,4	33,3	30,0	64,3
16/8/16	48,4	25,1	74,3	73,5	31,7	2.831,9	2.678,1	524,3	38,1	36,0	38,9
17/8/16	30,3	27,9	110,8	112,3	64,5	3.279,9	3.111,7	1.103,2	29,6	28,1	29,4
18/8/16	32,6	28,2	110,9	119,3	76,7	3.158,0	3.036,0	1.373,4	28,5	27,4	26,8
19/8/16	29,7	27,3	145,9	109,2	92,0	2.370,9	2.209,1	1.687,5	16,3	15,1	21,2
20/8/16	33,1	28,0	110,9	238,1	238,1	3.267,6	3.081,5	3.081,5	29,5	27,8	13,7
21/8/16	47,0	25,7	78,9	308,3	308,3	3.321,0	3.243,3	3.243,3	42,1	41,1	11,2
22/8/16	66,9	25,7	39	46,4	27,4	1.761,0	1.659,8	251,8	45,2	42,6	38,6
23/8/16	58,9	25,5	37,4	27,1	0,0	1.716,5	1.868,8	0,0	45,9	50,0	73,8
24/8/16	53,5	25,7	59,5	15,3	0,0	1.717,9	1.672,3	0,0	28,9	28,1	116,1
25/8/16	56,8	23,2	31,3	50,8	21,5	1.613,9	1.523,4	460,8	51,6	48,7	31,8
26/8/16	48,2	25,6	36,5	125,5	114,9	1.999,9	1.892,0	1.616,1	54,8	51,8	16,1
27/8/16	41,5	26,8	78,9	226,6	226,6	2.732,1	2.499,7	2.495,9	34,6	31,7	11,7
28/8/16	37,0	26,3	96,2	100,3	100,3	2.294,1	1.210,0	1.210,0	23,8	12,6	12,9
29/8/16	18,8	30,8	114,3	118,1	118,1	1.551,2	1.311,6	1.299,3	13,6	11,5	11,3
30/8/16	41,0	25,9	82,3	234,5	234,5	2.904,9	2.761,1	2.758,3	35,3	33,5	12,4
31/8/16	55,1	24,6	29,9	144,7	144,7	1.632,9	1.634,7	1.627,7	54,6	54,7	12,0
1/9/16	70,0	24,3	41	104,6	98,3	1.695,8	1.507,4	1.347,3	41,4	36,8	15,5
2/9/16	56,7	25,6	45,3	203,7	203,7	2.326,8	2.747,0	2.747,0	51,4	60,6	14,5
3/9/16	34,9	28,4	98,1	29,5	34,4	2.955,3	2.825,8	747,9	30,1	28,8	101,2
4/9/16	28,9	28,8	119,9	47,2	0,0	3.155,4	3.374,8	0,0	26,3	28,1	75,8
5/9/16	25,7	29,5	175,6	40,6	25,7	2.888,6	2.895,8	360,7	16,5	16,5	76,6
6/9/16	21,6	32,1	196,1	105,1	86,1	3.286,8	3.112,6	1.758,7	16,8	15,9	32,5
7/9/16	23,9	31,1	169,3	147,4	104,9	3.492,0	3.308,3	2.092,0	20,6	19,5	24,7
8/9/16	23,8	29,0	133,3	102,0	49,3	3.260,1	2.762,7	1.040,6	24,5	20,7	29,0
9/9/16	21,8	28,4	80,8	85,7	85,7	1.673,0	1.482,9	1.482,9	20,7	18,4	18,5
10/9/16	22,3	24,1	135,1	202,1	199,1	3.647,8	3.455,7	3.383,2	27,0	25,6	18,0
11/9/16	41,9	22,6	76,6	101,6	37,6	3.256,6	3.424,9	568,7	42,5	44,7	35,6
12/9/16	34,9	27,7	83,5	68,0	20,5	2.035,3	1.919,3	380,0	24,4	23,0	30,2
13/9/16	50,1	22,2	35,4	109,8	70,0	1.544,0	2.231,3	1.130,2	43,6	63,0	21,9
14/9/16	74,4	22,4	49,7	67,4	52,9	0,0	1.341,2	856,6	--	27,0	21,0
15/9/16	64,8	24,0	--	45,1	22,8	0,0	1.410,8	517,4	--	--	33,0
16/9/16	52,0	25,4	--	33,3	0,0	0,0	1.825,7	0,0	--	--	57,3
17/9/16	34,0	27,3	--	109,8	51,1	0,0	3.414,3	992,6	--	--	33,0
18/9/16	33,7	28,6	--	150,4	103,8	0,0	3.432,7	2.008,1	--	--	24,1
19/9/16	25,5	28,7	--	37,0	3,1	0,0	3.170,4	72,2	--	--	90,2
20/9/16	33,4	28,2	--	34,6	0,0	0,0	2.810,0	0,0	--	--	86,5
21/9/16	47,8	26,5	--	84,2	0,0	0,0	2.879,0	0,0	--	--	36,4
22/9/16	77,0	24,6	--	86,7	16,2	0,0	2.797,8	317,3	--	--	34,7
23/9/16	67,3	24,4	--	45,1	28,4	0,0	2.130,4	513,0	--	--	50,6
24/9/16	67,7	23,4	--	71,1	18,6	0,0	2.178,8	315,6	--	--	33,1
25/9/16	66,1	21,9	--	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	--	--	0,0
26/9/16	60,6	24,3	--	135,0	93,2	0,0	2.682,4	1.538,7	--	--	21,1
27/9/16	41,9	27,3	--	113,2	35,0	0,0	2.825,4	685,1	--	--	26,8
28/9/16	25,6	31,1	--	70,5	37,5	0,0	1.674,9	585,9	--	--	25,4
29/9/16	20,0	29,4	--	61,7	0,0	0,0	2.797,6	0,0	--	--	49,3
30/9/16	38,2	27,4	--	41,2	0,0	0,0	2.583,8	0,0	--	--	69,9
1/10/16	50,4	19,3	39,2	33,9	0,0	2.196,4	2.582,9	0,0	56,0	65,9	81,9
2/10/16	40,0	21,7	47,5	52,4	0,0	2.251,0	2.202,8	0,0	47,4	46,4	45,3
3/10/16	39,6	24,6	--	25,6	0,0	0,0	1.503,5	0,0	--	--	63,7

4/10/16	40,9	23,1	31,1	31,0	2,4	1.785,8	1.674,5	53,1	57,4	53,8	57,6
5/10/16	42,1	22,2	57,7	20,5	0,0	3.265,8	2.577,2	0,0	56,6	44,7	133,6
6/10/16	41,0	22,8	69,3	-15,9	0,0	1.471,4	1.342,2	0,0	21,2	19,4	0,0
7/10/16	36,1	22,3	58,2	-28,3	0,0	2.677,0	2.544,0	0,0	46,0	43,7	0,0
8/10/16	35,6	22,7	92,6	-12,5	0,0	3.006,4	2.834,1	0,0	32,5	30,6	0,0
9/10/16	37,9	20,5	81,3	17,7	0,0	3.600,9	3.424,5	0,0	44,3	42,1	207,9
10/10/16	41,5	20,0	54,2	10,6	0,0	3.109,0	2.958,3	0,0	57,4	54,6	299,9
11/10/16	52,6	17,4	29,3	7,8	0,0	2.409,3	2.311,1	0,0	82,2	78,9	317,0
TOTAL PERIODO			13.400	15.670	12.456	317.174	345.616	183.208			

HR [%]	Valor medio diario de la humedad relativa
Temp. Media [°C]	Valor medio diario de la temperatura ambiente
Evap. Planta [m³]	Valor leído del contador volumétrico de entrada de lixiviados a la planta de evaporación
Evap. Est. [m³]	Volumen estimado de lixiviados evaporados en base al modelo desarrollado y según los datos meteorológicos
Evap. Corr. [m³]	Volumen estimado de evaporación en base al modelo, suponiendo que se para la planta cuando el indicador kWh/m ³ estimado es mayor que 25
kWh Lixiviados	kWh medidos por el contador del cuadro de la planta de lixiviados
kWh Transf.	kWh medidos por el analizador de redes del cuadro del transformador de baja tensión de lixiviados
kWh Corregido	kWh del analizador de redes, suponiendo que la planta para cuando el indicador kWh/m ³ estimado es mayor que 25
kWh/m³ medido	Indicador calculado en base a la energía consumida medida por el contador de la planta de lixiviados entre el volumen de lixiviados que mide el contador volumétrico a la entrada de la planta.
kWh/m³ Transf	Indicador calculado en base a la energía consumida medida por el analizador de redes del transformador entre el volumen de lixiviados que mide el contador volumétrico a la entrada de la planta.
kWh/m³ Estimado	Indicador calculado en base a la energía consumida medida por el analizador de redes del transformador entre el volumen de lixiviados estimado en base al modelo de evaporación desarrollado y según los datos met.

Del análisis de los datos presentados en la tabla anterior se comprueba que se obtienen valores del indicador energético estimado superiores al límite que hemos establecido de 25 kWh/m³ para un gran número de días del periodo de operación de la campaña de 2016 (las celdas correspondientes a esos valores se encuentran sombreadas en rojo), es decir, el objetivo de la organización de mantener el coste de evaporación por debajo de 3 €/m³ no se ha cumplido en la totalidad de la campaña.

Por ello se ha estudiado el efecto que tendría sobre el consumo de energía y la evaporación de lixiviados en la planta limitar la operación de la misma a los momentos en los que las condiciones ambientales permitan que el indicador energético se mantenga por debajo de 25 kWh/m³. Los valores de consumo de energía y de evaporación estimada por el modelo corregidos de acuerdo a este criterio para el año 2016 están en la Tabla 3-14. Los resultados obtenidos de este análisis se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3-15: Resultados del ajuste de la operación de la planta en base a los datos de 2016

Reducción en la evaporación	3.214,3 m³	Volumen de lixiviados que se dejaría de evaporar si se implantara el algoritmo de parada de planta en base a la estimación de un indicador energético superior a 25 kWh/m ³
% Reducción de la evaporación	20,5%	Porcentaje de reducción respecto a la evaporación estimada con el modelo
Reducción de la energía consumida	162.407,5 kWh	Energía que se ahorraría si se implantara el algoritmo de parada de planta en base a la estimación de indicador energético superior a 25 kWh/m ³
% Reducción de la energía consumida	47,0%	Porcentaje de ahorro respecto a lo consumido en 2016
kWh/m³ medido medio en 2016	25,8	Indicador energético medio del periodo de operación de la planta en 2016, calculado en base a la energía consumida medida por el analizador de redes del transformador entre el volumen total de lixiviados evaporados medidos por el contador volumétrico de entrada de la planta
kWh/m³ estimado medio en 2016	22,1	Indicador energético medio del periodo de operación de la planta en 2016, calculado en base a la energía consumida medida por el analizador de redes del transformador entre el volumen total de lixiviados evaporados estimados mediante el modelo desarrollado y según los datos meteo.
kWh/m³ corregido medio en 2016	14,7	Indicador energético medio del periodo de operación de la planta en 2016, calculado en base a la energía consumida medida entre el volumen de lixiviados evaporados si se implantara el algoritmo de parada de la planta para indicadores mayores de 25 kWh/m ³

Los resultados ponen en evidencia que se obtiene un gran ahorro energético, de casi el 50%, si se aplica el criterio de parar la planta en los periodos en los que el indicador energético supera los 25 kWh/m³.

Sin embargo, también se constata que cómo es lógico, reduciendo el tiempo de operación de la planta notablemente también se reduce el lixiviado evaporado total, en este caso la reducción es de unos 3.214,3 m³ o un 20,5% menos respecto a la capacidad de evaporación estimada para las condiciones que se tuvieron en el periodo de operación de 2016.

La reducción de la cantidad de lixiviados evaporados se considera aceptable ya que se está cumpliendo el objetivo de la organización de mantener el coste de evaporación por debajo de 3€/m³ en cada momento y el complejo Ecocentral Granada cuenta con una serie de balsas para el almacenamiento de lixiviados que pueden suplir con creces un aumento de la producción de lixiviado en el complejo que no pueda ser tratado de forma completa en la planta de lixiviados mientras que no se dan las condiciones ambientales adecuadas.

El ahorro energético no se consigue solo por parar la operación de la planta cuando los indicadores son muy altos y por tanto la eficiencia energética de la planta es muy mala, además, como se puede constatar para algunos días de octubre en la Tabla 3-14, la evaporación puede ser negativa en algunos periodos de operación de la planta, es decir, se puede llegar a extraer humedad del aire según las condiciones atmosféricas. Este fenómeno se analizará en más detalle en el siguiente apartado.

En definitiva, se ha identificado un ahorro muy importante de energía simplemente variando los criterios de operación de la planta.

Si nos fijamos de nuevo en la Tabla 3-15 de resultados, los indicadores energéticos medios anuales obtenidos para 2016 en base a los datos medidos y los estimados con nuestro modelo son comparables y están cerca o por debajo de nuestro límite de 25 kWh/m³. Pero al analizar todos los datos meteorológicos que se tienen de 2016 se pone de manifiesto que se está evaporando con eficiencias energéticas muy inferiores a nuestro límite e incluso durante periodos concretos se está deshumidificando el aire y añadiendo volumen de agua a nuestros lixiviados y por esto tras aplicar la corrección con nuestro criterio el indicador medio anual es solo de 14,7 kWh/m³.

3.3.1.2. Efecto de las consignas de operación de la planta

Como se vio en la descripción del sistema de control de la planta, el proceso de evaporación se lleva a cabo siempre que se esté dentro de unas consignas de humedad relativa y temperatura ambiente medidas por el psicrómetro de la planta.

Estas consignas son modificables por el usuario en el SCADA local de la planta de lixiviados, pero de acuerdo a las especificaciones de diseño la planta deja de funcionar si la humedad relativa del aire sube del 80% y/o la temperatura ambiente baja por debajo de 13°C.

Sin embargo, como ya se vio en el apartado 3.2.1.4, existen varios casos posibles en las operaciones de humidificación de aire según las condiciones de este y las del agua con el que se pone en contacto, que es algo que no se tiene en cuenta con las consignas de control de la planta en este momento.

En la Figura 3-24 se muestra el diagrama psicrométrico, donde aparece sombreada en rojo la zona del mismo que contiene al aire con las propiedades que están fuera de las consignas de operación de la planta. Si el psicrómetro detecta aire ambiente en la zona sombreada en rojo, para la operación de la planta y se deja de evaporar.

Sin embargo, tras analizar los datos de evaporación estimados del año 2016 y con la ayuda del diagrama psicrométrico, se constata que hay ocasiones en las que el sistema de control de la planta permite su operación aun cuando las condiciones meteorológicas no permiten la humidificación del aire con el lixiviado y de hecho se está deshumidificando este, añadiendo un cierto volumen de agua al lixiviado en recirculación en la planta.

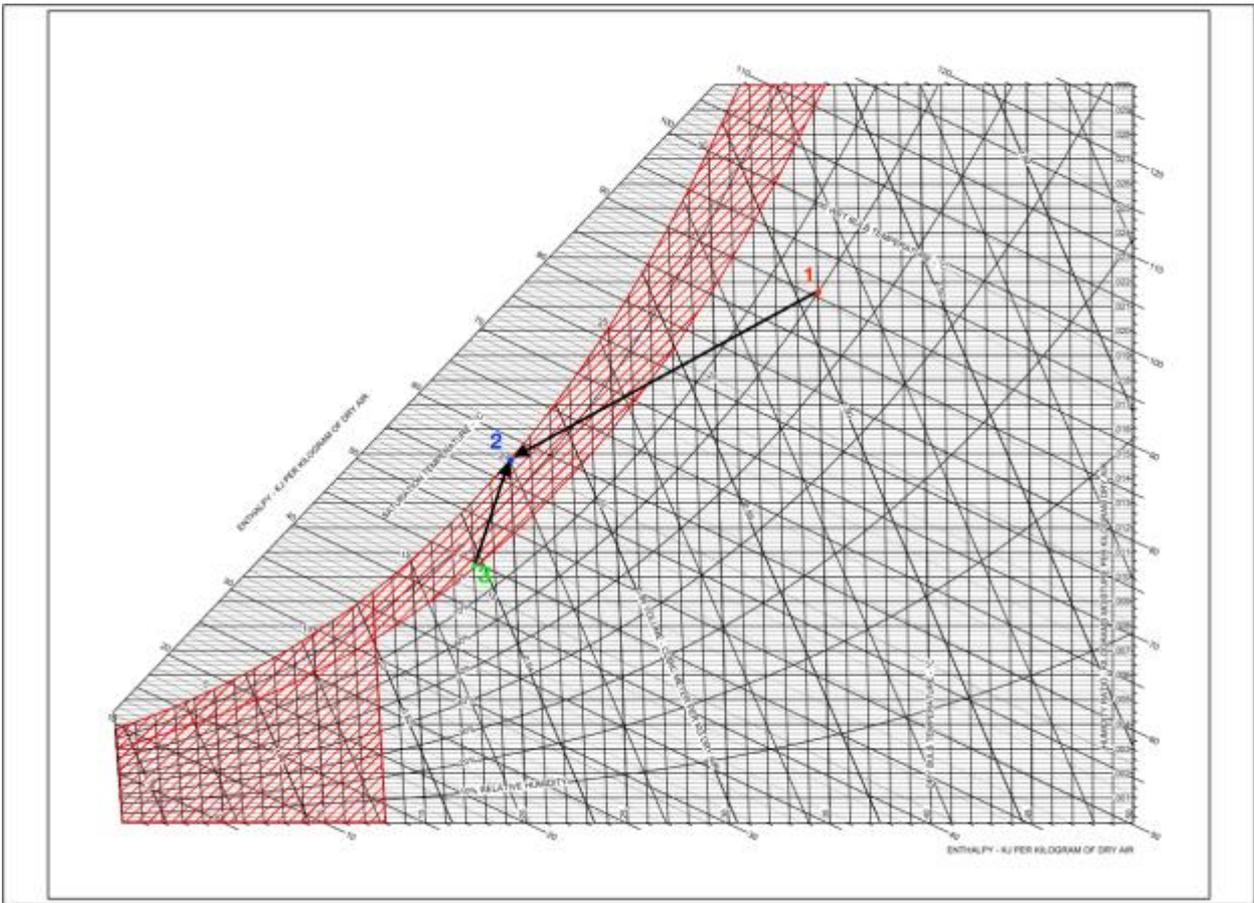


Figura 3-24: Diagrama psicrométrico con valores de consigna de parada de la planta sombreados en rojo

En la Figura 3-24 se ha marcado un posible caso en el que las condiciones del aire ambiente corresponden a las del punto 1, una humedad relativa del 60% y una temperatura de 35°C, es decir se encuentra en la zona de operación de acuerdo a las consignas de control de la planta.

Si este aire ambiente se pone en contacto con el lixiviado que está a la temperatura del punto 2, es decir a unos 20°C, cómo se ha explicado en el apartado sobre la humidificación del aire, el aire irá desplazándose hacia esas condiciones. Estas condiciones son posibles a lo largo del año, sobre todo en algunos periodos de agosto en los que la temperatura del aire es muy alta.

El efecto de este proceso es que el aire en contacto con el líquido dentro de nuestros módulos de evaporación se enfría y se deshumidifica ya que la temperatura de rocío del aire es superior a la del líquido, y por consiguiente estamos extrayendo agua del aire ambiente que está condensando en la superficie de contacto aire-agua y añadiéndose al lixiviado. Para este caso tenemos el efecto completamente opuesto al objetivo de la planta de evaporación, y sin embargo el sistema de control de la planta no detiene su operación.

De la misma manera, el sistema de control de la planta lleva a parar la operación de la misma cuando el aire ambiente tiene las características del punto 3 de la Figura 3-24, por ser la humedad relativa superior al 80% y sin embargo, si la temperatura del lixiviado es mayor a la temperatura de rocío del punto 3, como ocurre en el caso de la figura, efectivamente se puede humidificar el aire y evaporar lixiviado aun cuando las características del aire están fuera de la consigna de operación de la planta.

En la siguiente gráfica se han analizado los momentos en los que durante la operación de la planta en el periodo de funcionamiento de 2016 se obtuvo el efecto contrario a la evaporación y la planta condensó agua del aire ambiente.

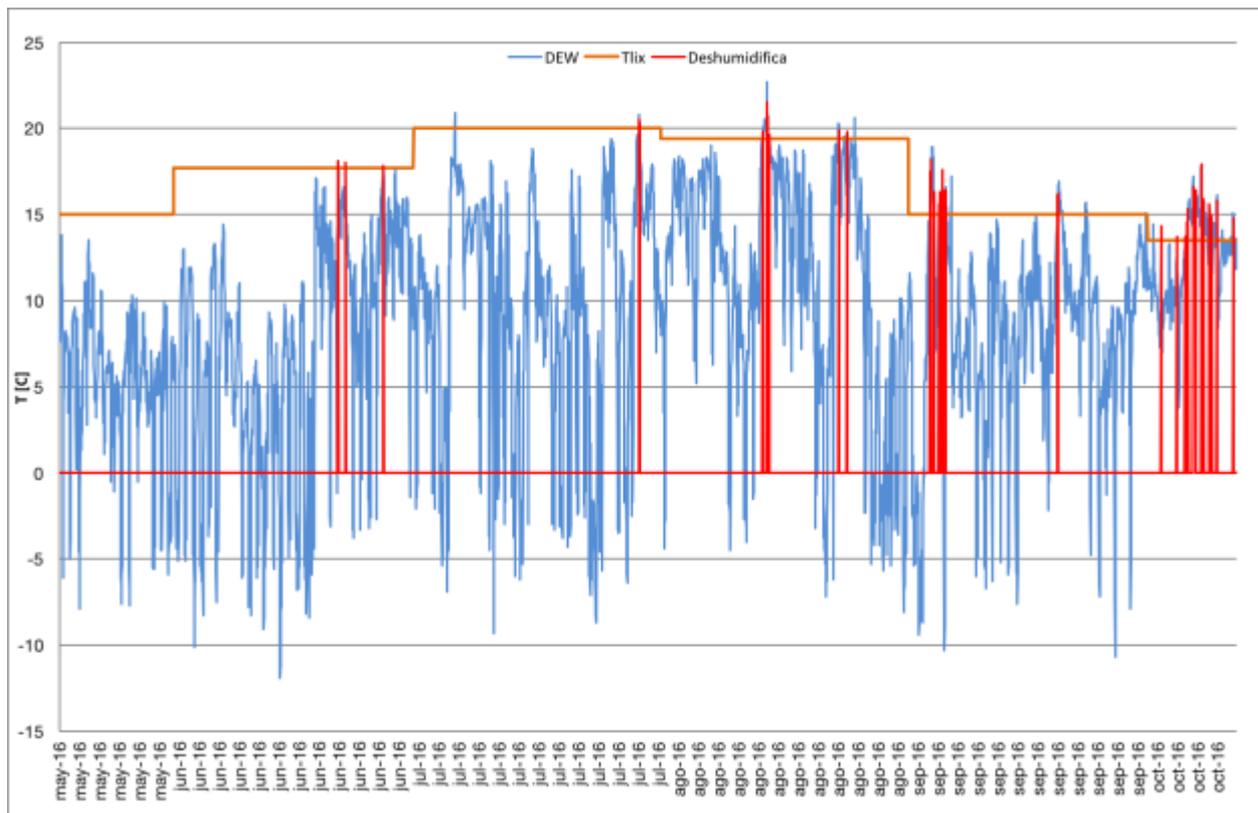


Figura 3-25: Deshumidificación del aire en la planta de lixiviados a lo largo de 2016

En la gráfica anterior se representan las temperaturas de lixiviados estimadas a lo largo del año y las temperaturas de rocío del aire que se han medido en la estación meteorológica a lo largo del periodo de operación de la planta de 2016. En rojo se marcan los momentos en los que las condiciones del aire ambiente eran tales que estaban dentro de las consignas de operación del control de la planta, pero no permitían la evaporación de agua y se ha producido el efecto contrario.

En consecuencia, podemos decir que el sistema de control por consignas de humedad relativa y temperatura ambiente no es adecuado, ya que no es capaz de parar la planta cuando se está produciendo el efecto opuesto al deseado, y en ocasiones puede llegar a parar la planta cuando las condiciones permiten la evaporación, incluso con indicadores energéticos aceptables de acuerdo a nuestro límite.

Implantar un sistema de control que aplique un algoritmo que decida si operar o no la planta de acuerdo a nuestro indicador energético podría solventar el problema si se diseña de forma que pare la planta para condiciones del aire en las que no es posible evaporar por ser su temperatura de rocío mayor a la del lixiviado.

3.3.1.3. Efecto de la pérdida de carga en los ventiladores

El caudal de aire seco de los ventiladores de la planta es esencial para el análisis energético de la planta de evaporación de lixiviados. Variaciones en este caudal tienen una repercusión proporcional en la capacidad de evaporar el agua de los lixiviados, como se comprueba en la ecuación (5).

Durante el proceso de evaporación y en la fase de recirculación la operación de los ventiladores es constante, como ya hemos visto en la descripción del mismo. Sin embargo, las características del lixiviado que se trata en el proceso, que arrastra componentes sedimentables y sólidos en suspensión hacen que el ensuciamiento del relleno de panales reticulares en las celdas de evaporación sea notable y cause un aumento de la pérdida de carga del aire a través de las celdas de evaporación.

Se ha analizado la influencia de esta pérdida de carga debida al ensuciamiento gracias a las curvas de caudal de los ventiladores proporcionadas por el fabricante (ver Figura 3-7).

Se trata de una serie de curvas en función del ángulo fijado de las palas, que permiten conocer el caudal que impulsa el ventilador en función de la presión estática a la entrada del mismo.

En nuestra planta, existen 4 sensores de presión diferencial que se encuentran en una de las dos celdas de cada módulo y que permiten saber la presión diferencial para cada uno de ellos. En el anexo 8.1 se puede observar su ubicación y la distribución. Como ya se ha visto en la descripción de la planta y del proceso, estos indicadores de presión mandan una señal de alarma en el SCADA de la planta de lixiviados cuando se superan los 110 Pa de pérdida de carga.

Para analizar la variación del caudal de aire disponible en los módulos de evaporación se han tomado una serie de 30 puntos de la curva de caudal de la Figura 3-7 para un ángulo de las palas de 15,4° y se ha obtenido una curva de ajuste cuadrático con la siguiente expresión:

$$P = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C \tag{17}$$

$$R^2 = 0,999859$$

siendo:

P Pérdida de carga en Pascales

Q Caudal en m³/s

$A=-0,1188$

$B=0,9844$

$C=102,65$

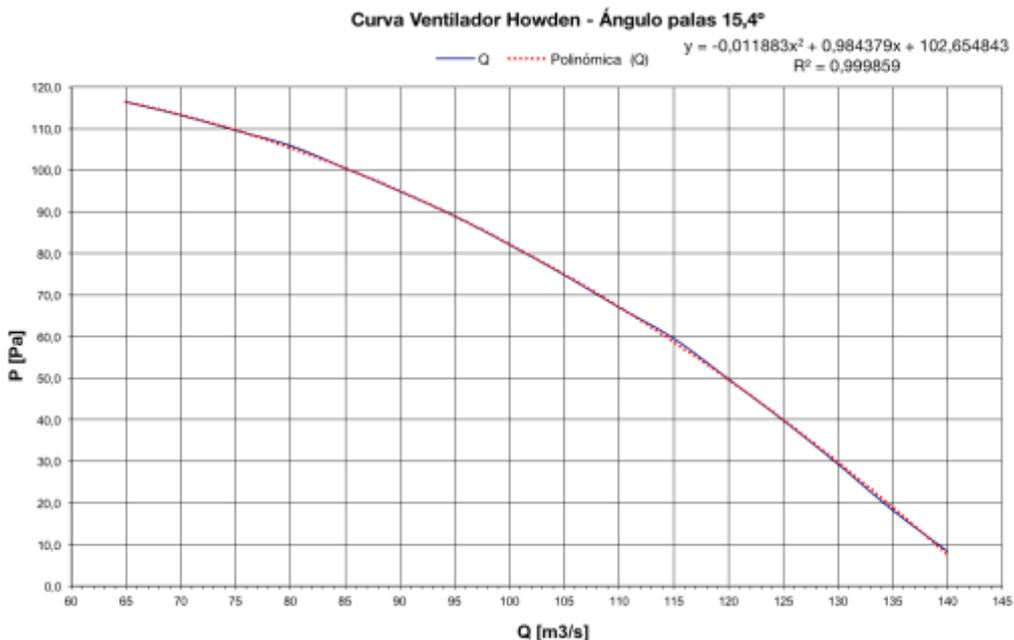


Figura 3-26: Curva de ajuste cuadrático del caudal del ventilador en función de la pérdida de carga

Actualmente se tiene acceso a los valores de pérdida de carga que marcan los indicadores de presión diferencial de cada uno de los módulos de evaporación a través del SCADA del complejo.

A continuación, se analiza la evolución de la pérdida de carga comparando entre dos días de operación de la planta de lixiviados separados entre sí 25 días. Del SCADA se obtienen las siguientes gráficas de la evolución de la pérdida de carga en los módulos de evaporación a lo largo del día 21 de mayo de 2017 y el 16 de junio de 2017.

Durante el día 21 de mayo el primer módulo de evaporación no estuvo en operación así que no se tienen datos de su pérdida de carga, pero es comparable a las demás, siendo un poco menor ya que es el módulo que menos frecuentemente entra en operación y por lo tanto el que menos ensuciamiento sufre.

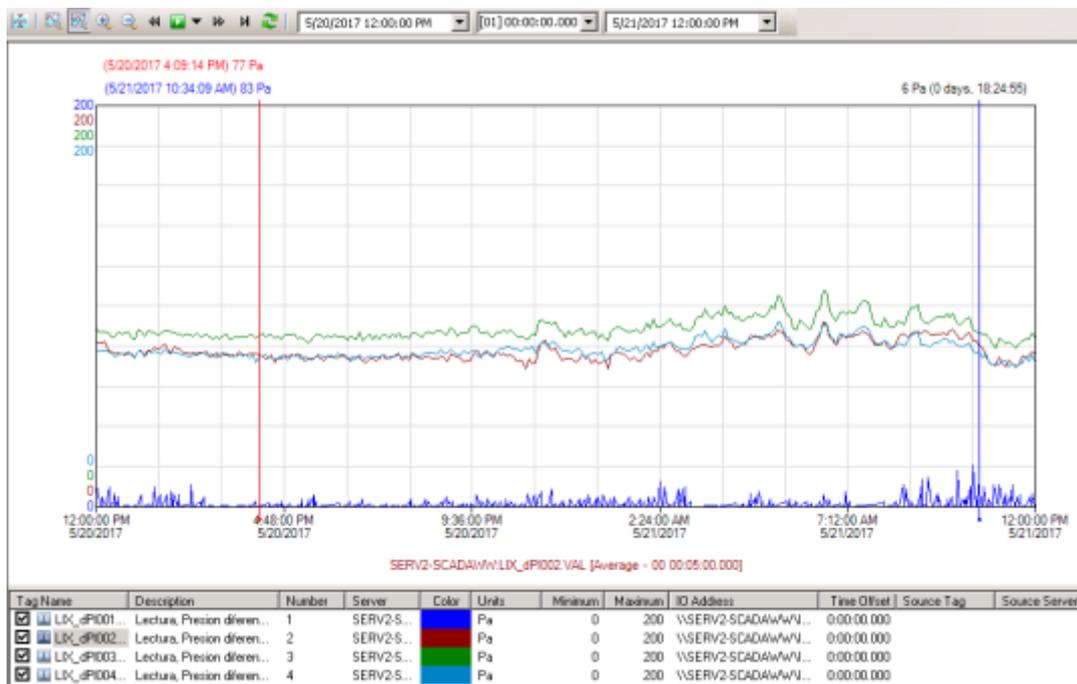


Figura 3-27: Pérdida de carga registrada durante el día 21/05/2017



Figura 3-28: Pérdida de carga registrada durante el día 16/06/2017

Despejando el caudal en función de la pérdida de carga de la ecuación (17) calculamos los caudales en función de la pérdida de carga registrada tal y como aparece en la Tabla 3-16.

Tabla 3-16: Comparación de caudales de aire de los ventiladores

Ventilador	Presion [Pa]		Caudal [m3/s]		Variación
	21/5/17	15/6/17	21/5/17	15/6/17	
dP 001	--	84	--	98,7	--
dP 002	82	96	100,2	89,1	-11,0%
dP 003	88	105	95,7	80,4	-16,0%
dP 004	79	88	102,3	95,7	-6,4%

Se pone de manifiesto el aumento de pérdida de carga que experimentan los módulos de evaporación tras la operación continua de la planta, y la consiguiente reducción del caudal de aire que los atraviesa y se pone en contacto con el agua.

Esta reducción de caudal del aire seco afecta proporcionalmente a la cantidad de agua evaporada, como se deduce de la ecuación (5), y por lo tanto sobre la eficiencia de los módulos de evaporación, por la reducción de la cantidad de lixiviado tratado respecto a la cantidad máxima evaporable según las condiciones ambientales del aire en ese momento.

Igualmente, el ensuciamiento y el consiguiente aumento de pérdida de carga y reducción del caudal de aire tendrá un efecto proporcional sobre el indicador de rendimiento establecido en el apartado 3.3.1

3.3.1.4. Incidencia de los periodos tarifarios

Se ha analizado la incidencia de los periodos tarifarios sobre el coste de la energía consumida en el proceso de evaporación. Como se ha visto en el apartado 3.2.6, los periodos tarifarios que se aplican a la tarifa 6.1, de aplicación al complejo Ecocentral Granada son diferentes para cada mes del año y para las horas del día. En la Tabla 3-7 se muestra esta distribución. Se hace evidente que operar durante los periodos tarifarios en los que la energía es más barata preferentemente presentaría beneficios económicos frente a no usar este criterio.

Para ver la situación anterior se han analizados los datos de evaporación estimada de lixiviado de la planta a lo largo del periodo de funcionamiento del año 2016, como se muestran en la Figura 3-29.

En la figura se aprecia como la mayor cantidad de evaporación se ha producido en los meses de junio y julio, es decir, las condiciones para la evaporación han sido las más favorables en los meses con los periodos tarifarios con el precio de la energía más alto a lo largo del año, por lo que parece claro que favorecer la operación de la planta fuera de estos meses no aportaría beneficios ya que no se podría evaporar a los mismos niveles.

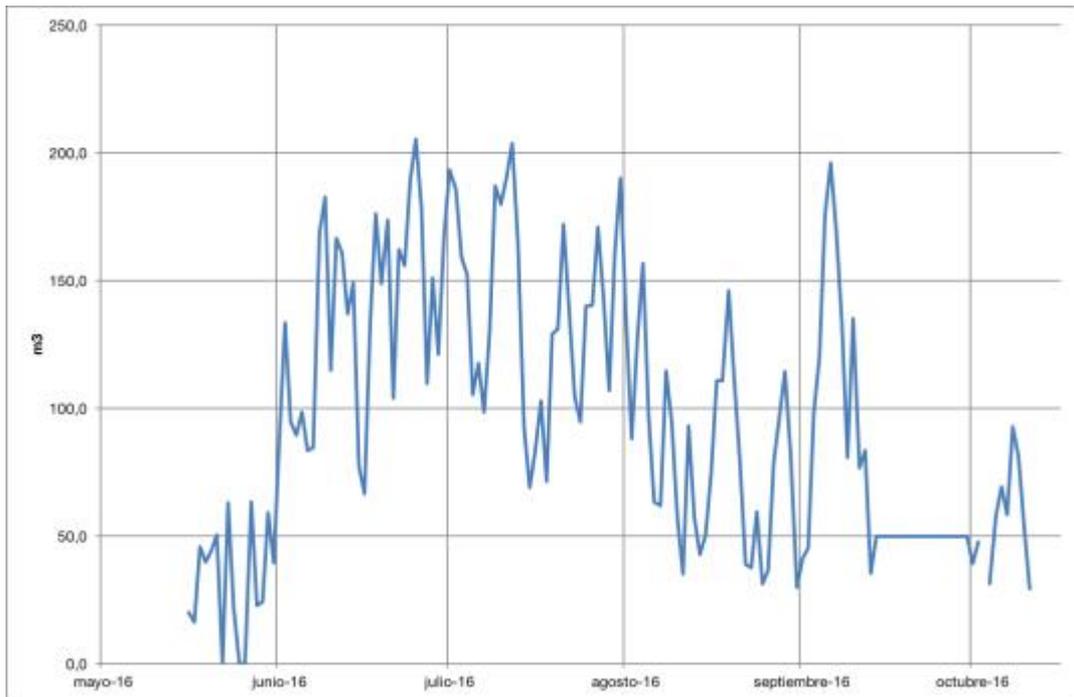


Figura 3-29: Lixiviado evaporado por la planta en cada mes del período de operación

También se ha analizado la capacidad de evaporación por horas que ha tenido la planta a lo largo del periodo de evaporación del año 2016.

En la siguiente figura se representa la capacidad de evaporación media hora a hora respecto a la hora de mayor evaporación en cada mes. Se aprecia que se evapora más en las horas centrales de día para todos los meses del periodo de operación de la planta.

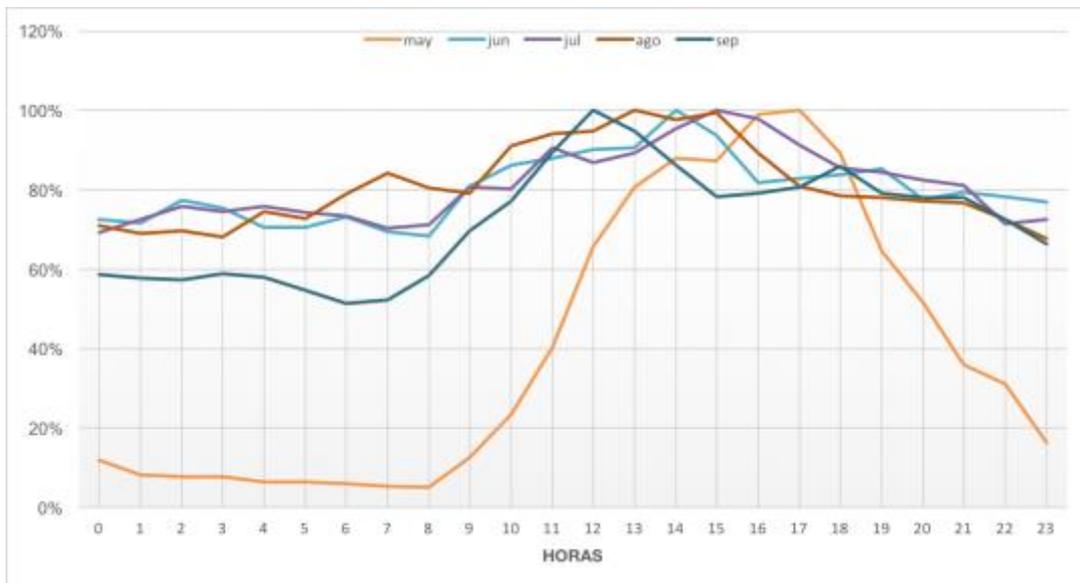


Figura 3-30: Capacidad de evaporación media por horas para los meses del periodo de evaporación

Contrastando los datos de capacidad de evaporación por horas con los periodos tarifarios aplicables, se comprueba que la mayor evaporación se produce en las horas centrales del día con máximos entre las 12 y 17 horas según el mes, horas del día que en los meses del periodo considerado corresponden a los periodos tarifarios con los precios más altos en general, a excepción de agosto cuyo único periodo tarifario es el 6 de menor coste.

Por esto se deduce que no se podrá ajustar la operación de la planta de acuerdo a los periodos tarifarios ya que aquellos que representan un menor coste de la energía coinciden a su vez con la menor capacidad de evaporación del lixiviado por las condiciones del ambiente.

4. Medidas de mejora eficiencia energética

En el presente capítulo se describen las medidas de mejora de eficiencia energética que han sido identificadas tras el análisis de los datos recopilados en esta auditoría energética y el estudio de la planta de lixiviados y su operación. El estudio del proceso de evaporación y el modelo desarrollado del mismo en este documento han facilitado el desarrollo de estas medidas, y sobre el trabajo desarrollado se han basado las mismas, su cuantificación y su implementación.

Considerando las características de la planta, su operación y el proceso, la principal medida de mejora de la eficiencia identificada tiene que ver con la operación de la planta en sí misma y no con ningún equipo de la misma que tuviese que ser sustituido o mejorado. Los equipos consumidores de energía principales de la planta son los motoredutores de los ventiladores de impulsión de aire y las bombas de recirculación de lixiviado, que funcionan de forma continua, y no se estima ninguna ventaja de instalar dispositivos arrancadores o variadores de frecuencia, ya que su funcionamiento va a ser constante, en cualquier caso.

En siguientes apartados se describen las medidas de mejora de eficiencia energética propuestas, así como la forma en la que se van a implementar.

4.1. Medidas de mejora de eficiencia en la operación de la planta de lixiviados

4.1.1. Deficiencias detectadas en la operación y razón de la propuesta de mejora

El análisis que se ha llevado a cabo en base al indicador energético considerado, desarrollado en el apartado 3.3.1.1, ha puesto de manifiesto que el sistema de control de la planta permite que se opere la misma en condiciones de eficiencia energética muy desfavorables, llegándose a tener casos en los que se produce el efecto contrario a la evaporación del lixiviado en la planta. A lo largo del periodo de operación de la planta en 2016, del que se tienen datos completos, el consumo de energía que se ha registrado podría haberse reducido en casi un 50% si la operación de la planta se hubiese restringido a los periodos en los que el indicador energético no hubiese superado los 25 kWh/m³; además se habrían evitado los valores negativos observados en algunos periodos, es decir, la planta de lixiviados no hubiese operado en condiciones en los que se estaba deshumidificando el aire ambiente y añadiendo esta agua al total de lixiviados.

Por ello se hace obvio que modificar los criterios de operación de la planta e implementarlos de forma eficaz conseguiría realizar el ahorro energético identificado en el apartado 3.3.1.1.

4.1.2. Descripción de las oportunidades de mejora de eficiencia propuestas

Como ya se ha mencionado anteriormente, la organización ha puesto como objetivo para la operación de la planta un coste de la evaporación de 3€/m³, considerado como el coste de la energía para evaporar un metro cúbico de lixiviado. Ya que hemos considerado que el precio medio del kWh para la planta de lixiviados en el periodo de operación de la misma, es de 0,117 €/kWh, de acuerdo con los datos facilitados por la organización, obtenemos un límite de la energía que se puede emplear para evaporar un metro cúbico de lixiviado de 25 kWh/m³, para que la operación de la planta sea viable según la organización.

Nuestra mejora de eficiencia se basa en desarrollar un sistema de monitorización que permita implementar este límite del indicador energético, que calculamos con nuestro modelo de evaporación y el consumo energético que medimos de los analizadores de red de la planta de lixiviados. Esto conseguirá que la planta cumpla el objetivo de coste de operación de la organización y que no se opere cuando la eficiencia energética sea muy mala o se tengan condiciones ambientales que hagan imposible la evaporación de lixiviado.

El sistema desarrollado para este fin, lee los datos relativos a la operación de la planta y las condiciones atmosféricas medidas por la estación meteorológica y calcula en cada instante y en

tiempo real la capacidad de evaporar lixiviado y calcula el indicador energético kWh/m³ para darle al operario la información necesaria para aplicar el criterio de parar la planta cuando este sube por encima de 25 kWh/m³.

En el apartado 4.3 se ha descrito en detalle cómo se ha realizado la implementación y las características técnicas, así como una descripción de la aplicación web desarrollada que permite la monitorización desde cualquier equipo conectado a la red informática del complejo Ecocentral Granada a través de un navegador web.

En el capítulo 3.3.1.1 se ha analizado el ahorro energético que conlleva la implantación del límite del indicador energético a 25 kWh/m³ en base a los datos recopilados durante la operación de la planta en 2016. Se tiene que el ahorro energético de implementar esta medida es de un 47% respecto al consumo energético observado en 2016, es decir, se dejarían de consumir un total de 162.407,5 kWh de energía. Por contrapartida, la reducción en la evaporación de lixiviado que se tendría si se hubiese implementado esta medida, por el menor tiempo total de operación de la planta, es de un 20,5%.

4.1.3. Beneficios relativos a la eficiencia no energética

Resulta obvio que el aumento de la eficiencia realizado con esta medida implicará un beneficio económico por el menor consumo de energía. Hemos estimado un precio medio del kWh para nuestra planta de acuerdo a los datos de facturas eléctricas que ha proporcionado la organización de 0,117 €/kWh. Teniendo en cuenta el dato de ahorro energético que hemos obtenido en el análisis de la implementación de nuestra mejora, podríamos haber conseguido un ahorro económico de 19.000€ en el año 2016.

Otros beneficios derivados de implementar esta medida podrían ser la facilidad de acceso a los datos de operación y la posibilidad de seguir desarrollando la aplicación de monitorización para incluir otros aspectos de la operación de la planta de lixiviados más allá de la eficiencia energética como datos de pérdida de carga de los medidores de presión diferencial, estado de las bombas y ventiladores, niveles de los depósitos, etc.

4.2. Medida de mejora de eficiencia mediante el aprovechamiento de calor residual

Durante la realización de la presente auditoría energética, la organización estaba llevando a cabo un proyecto mediante el cual se pretende aprovechar el biogás que se produce en la descomposición de la materia orgánica en el seno del vertedero de rechazos y que se va a extraer mediante una serie de pozos y canalizaciones.

Este biogás de vertedero, en su mayor parte metano, va a ser usado como combustible en un par de motores de combustión interna especialmente diseñados para esta aplicación.

De acuerdo a las especificaciones de estos motores térmicos, es posible aprovechar el calor de los gases de escape y del agua de las camisas de refrigeración como calor de proceso en régimen de cogeneración.

Esto nos lleva a pensar que sería posible utilizar este calor residual en el proceso de evaporación de lixiviados en la planta. El fabricante de la planta de evaporación, INCRO, cuenta en su catálogo con modelos de módulos de evaporación que ya permiten el aprovechamiento de calor residual de otros procesos en el de evaporación de aguas residuales. Existen dos modalidades, el calentamiento del aire de entrada o el calentamiento del líquido de entrada. La propia empresa INCRO fabricante de los módulos de evaporación oferta modelos diseñados para tal fin [9].

El caso en el que se calienta el líquido de entrada, la transferencia se hace en un intercambiador líquido-líquido y parece más viable y que proporciona un mayor aprovechamiento del calor residual.

Un análisis detallado de la implementación de esta medida podría conllevar la realización de otro proyecto con entidad de Proyecto de Fin de Carrera en sí mismo por el estudio necesario de la

disponibilidad de calor residual de los motores, los intercambiadores necesarios y una serie de cuestiones que no se van a desarrollar aquí.

Sin embargo, nuestro modelo de evaporación puede darnos una idea del incremento en la capacidad de evaporación debida al aumento de la temperatura, por lo que se ha analizado el efecto sobre la cantidad de evaporación de lixiviado que se conseguiría si este se calentase un 1°C en base a los datos meteorológicos del periodo de operación de 2016.

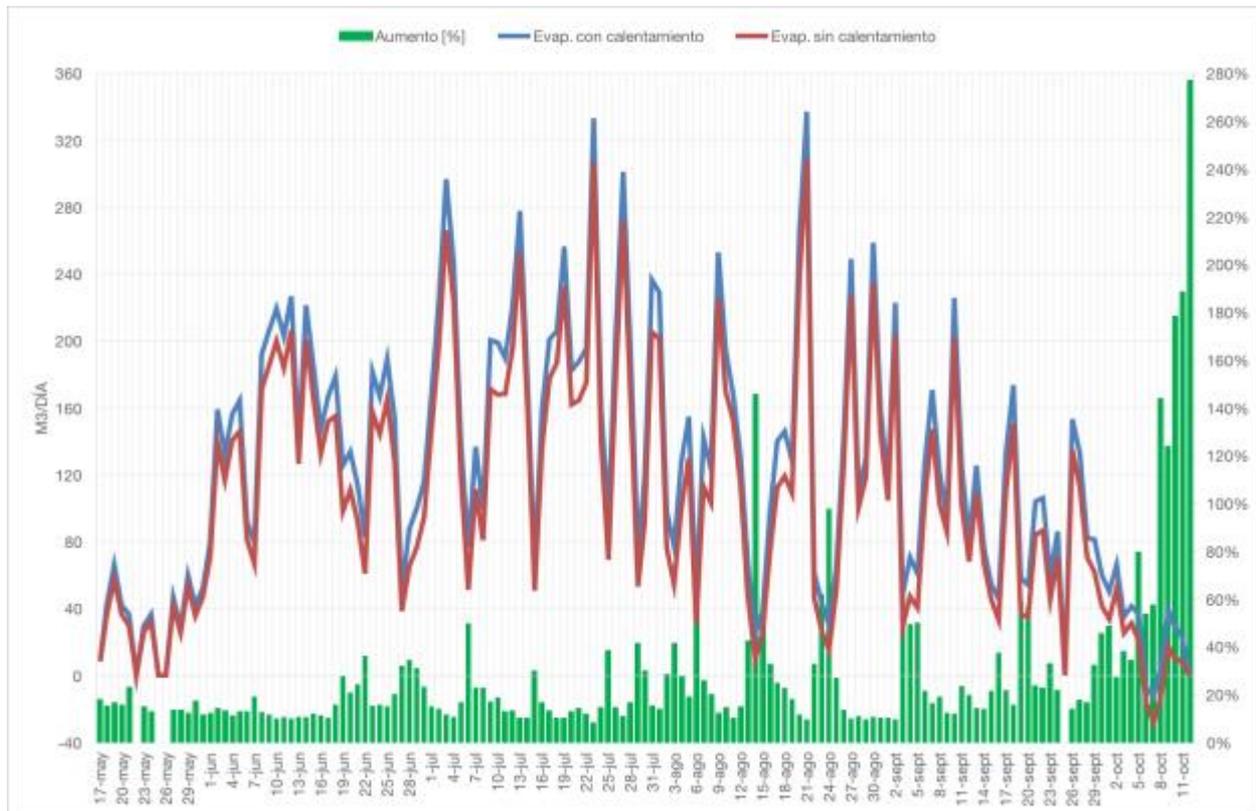


Figura 4-1: Aumento de la evaporación debido al aumento de 1°C de la temperatura del lixiviado

En la Figura 4-1 se compara la evaporación estimada sin calentamiento con la evaporación que se estima con un lixiviado calentado un 1°C y se muestra en el gráfico de barras verde el tanto por ciento de incremento de la evaporación que se podría conseguir cada día.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos tras el análisis de mejora de la evaporación con calentamiento del lixiviado para los datos meteorológicos de 2016.

No se ha tenido en cuenta para el cálculo del ahorro potencial de esta medida el límite de 25kWh/m³ del indicador energético para la operación de la planta que se ha descrito en la anterior medida de eficiencia energética.

Tabla 4-1: Mejora de la evaporación al calentar 1°C el lixiviado

Aumento de la evaporación	2707,18 m³
% Aumento medio de la evaporación	17,28 %
kWh/m³ medio estimado en 2016 sin calentamiento	22,1 kWh/m³
kWh/m³ medio estimado en 2016 calentando 1°C el lixiviado	18,8 kWh/m³

Se constata que calentando el lixiviado con el calor residual de la combustión del biogás del vertedero se conseguiría una mejora de la eficiencia energética considerable. De hecho, el efecto de calentar el lixiviado permitiría ampliar el periodo de operación de la planta ya que se estaría por debajo del límite del indicador energético de 25 kWh/m³ para un mayor rango de condiciones meteorológicas a lo largo del año, lo que permitiría evaporar aún más lixiviado. El efecto de calentar el lixiviado sería progresivamente mejor cuanto más se consiga subir la temperatura, por lo que ya se ha explicado.

Los valores de mejora de la evaporación que están muy por encima de la media se explican porque son días en los que las condiciones de evaporación no fueron muy favorables y se evaporó poca cantidad de lixiviado. En estos casos, el efecto del calentamiento del lixiviado es mucho mayor, aunque se está evaporando relativamente poca cantidad de lixiviado.

Si se combina la medida de eficiencia energética de limitación de la operación de la planta cuando el indicador supera los 25 kWh/m³ con el calentamiento del lixiviado a la evaporar 1°C con calor residual de la combustión es obvio que se pueden conseguir resultados positivos en cuanto a la evaporación y el consumo de energía respecto a lo estimado según los datos de 2016.

En la siguiente tabla se presentan los resultados del análisis llevado a cabo y se comparan los cuatro escenarios tenidos en cuenta.

Tabla 4-2: Análisis de resultados de combinar el límite de operación de la planta y calentamiento de lixiviado en 1°C

	Consumo energético estimado en 2016 (kWh)	ahorro energético mejoras en %	Lixiviado evaporado estimado en 2016 (m³)	Variación de evaporación por mejoras en %
Situación original	355.248,24	--	15.670,24	--
Con limitación de la operación	183.208,19	47,0%	12.455,91	-20,5%
Con calentamiento	355.248,24	--	18.377,43	17,28%
Combinación de calentamiento y limitación de la operación	215.179,22	39,4%	15.373,24	-1,9%

Las medidas combinadas de limitación de la operación cuando el indicador está por encima de 25 kWh/m³ y calentamiento de 1°C del lixiviado conseguirían un ahorro del 39,43% de energía consumida con un descenso de la evaporación total estimada de solo el 1,9% según los datos del periodo de funcionamiento de 2016.

En definitiva, el calentamiento del lixiviado con calor residual de otro proceso, por ejemplo la combustión de biogás de vertedero, se trata de una medida de mejora de eficiencia energética muy interesante por la posibilidad de usar una energía que, en caso contrario, se estaría liberando al ambiente, pese a los obvios problemas que se presentarían a la hora de implementar un sistema con intercambiadores de calor por las características del lixiviado y las características del biogás de vertedero.

4.3. Implementación de las medidas de eficiencia energética

4.3.1. Introducción

Dentro de las medidas de mejora para la operación de la planta de evaporación de lixiviados se ha realizado una aplicación de ayuda a la operación, que corre sobre un micro ordenador de muy bajo coste denominado Raspberry Pi y utiliza programas de uso libre, precargados en el micro ordenador, tales como Node-Red y Python, bajo el sistema operativo Raspbian (Linux) [15, 16].

Se ha elegido esta opción dado que no se dispone de información ni del código fuente de la aplicación SCADA utilizada en la planta de evaporación de lixiviados, además de por su bajo coste y posibilidades de futuros desarrollos en base a código abierto.

La aplicación lee datos del PLC de la planta de lixiviados y de la estación meteorológica y calcula las variables psicrométricas del aire, así como el parámetro de eficiencia de la planta en kWh/m³. Estas variables pueden ser accedidas mediante un navegador Web y permitirán al operador estimar si las condiciones ambientales son propicias para evaporar los lixiviados con una eficiencia predefinida.

Una vez depurada la aplicación y analizados los datos obtenidos, se activará un control sobre el PLC de la planta de lixiviados para parar la planta cuando las condiciones ambientales no sean propicias y volver a arrancarla cuando vuelvan a una condición de eficiencia aceptable.

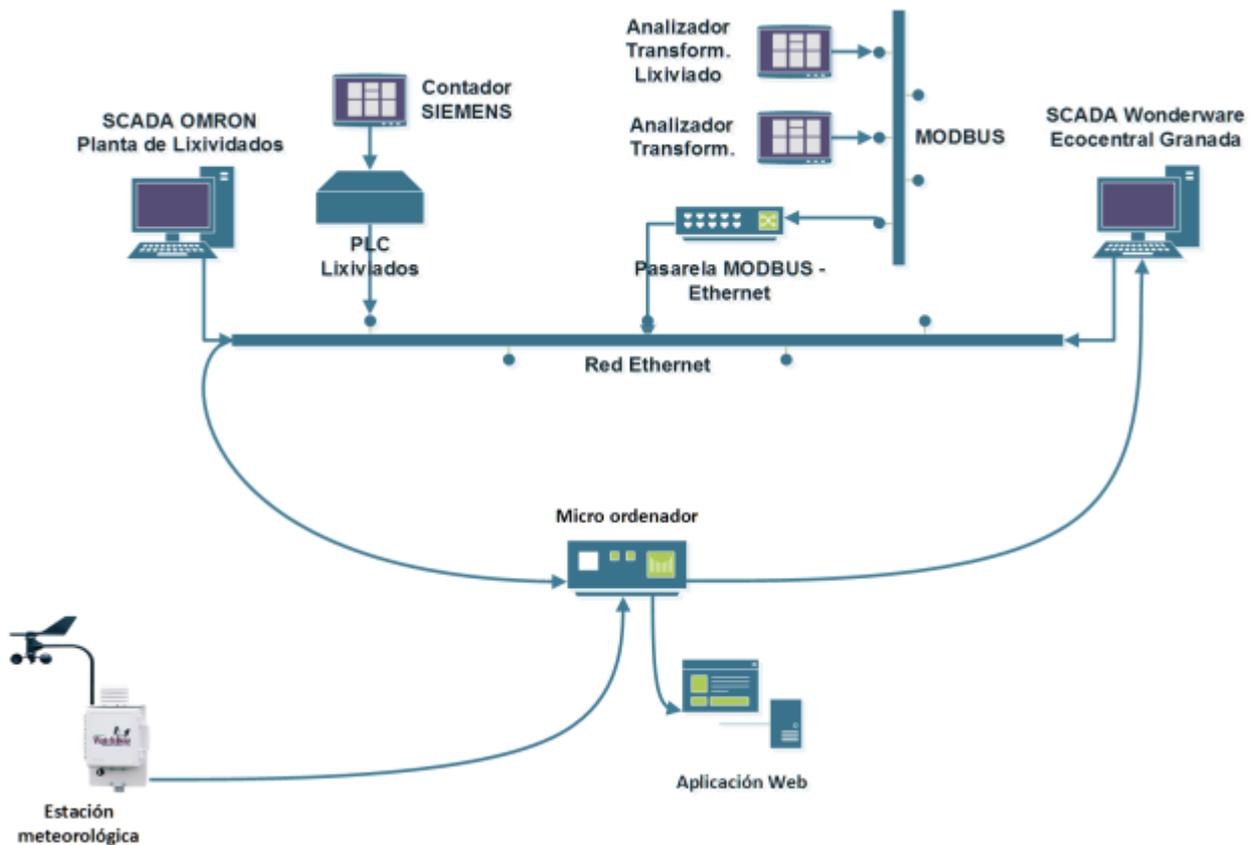


Figura 4-2: Esquema de conexiones del sistema de monitorización de la planta implementado

4.3.2. Descripción del equipo

Se ha elegido esta solución por el bajo coste de la misma, inferior a 100 €, así como por la sencillez y robustez de la misma.

Los materiales empleados han sido los siguientes:

1. Tarjeta micro computador Raspberry Pi 3 Modelo B: 40 €
2. Caja para micro Computador: 10 €
3. Memoria micro SD de 32 Gb: 15 €
4. Fuente de alimentación 5 V, 2,5A: 12 €
5. Latiguillo 1,5m para conexión a la red Ethernet: 2 €

Importe total: 79 €

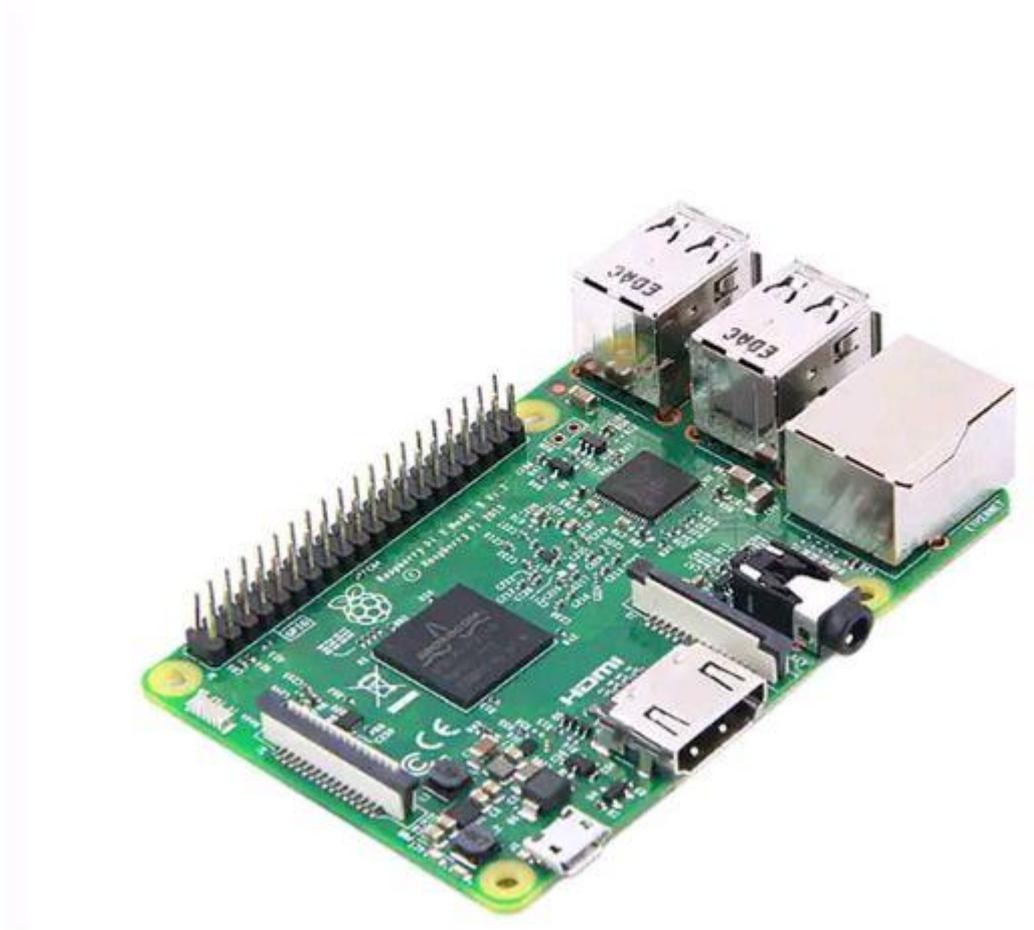


Figura 4-3: Micro ordenador de código abierto Raspberry Pi [15]

Todo el sistema operativo y las aplicaciones están grabadas en la tarjeta de memoria micro SD, lo que le confiere al sistema una robustez importante y en el caso de una avería de la tarjeta solo habría que intercambiar la tarjeta de memoria. La fundación Raspberry Pi dispone de una página Web desde donde se puede descargar la imagen de la memoria para grabar en la tarjeta micro SD.

El micro ordenador se ha colocado en el rack de comunicaciones de la instalación y se ha conectado a uno de los conmutadores (switch) disponibles, desde el cual se puede acceder al PLC de la planta de lixiviados y a la estación meteorológica.

4.3.3. Descripción de la aplicación

Para realizar esta aplicación se ha utilizado una herramienta denominada Node-Red [16], integrada en la distribución gratuita del sistema operativo del micro computador. Esta herramienta ha sido desarrollada por IBM y permite conectar los equipos con el Internet de las Cosas (IoT).

Esta herramienta permite realizar aplicaciones de visualización de código abierto desde una interfaz basada en un navegador Web lo que nos permite crear flujos de eventos y nodos interconectados. También permite la visualización de datos en un entorno Web, lo que nos permite poder acceder a la información desde cualquier punto de la red de la instalación.

La herramienta dispone de una librería de nodos extensísima lo que da una gran flexibilidad a la hora de realizar la aplicación.

4.3.4. Lectura de datos

Dado que tenemos dos fuentes de datos tendremos que configurar la herramienta para la lectura de dichos datos.

4.3.4.1. Lectura de la estación meteorológica

La estación meteorológica, que está situada a unos 100 m. de la planta de evaporación, dispone de un puerto de comunicación por protocolo ModBus y para ello configuraremos un nodo de lectura en Node-Red ModBus, para leer las variables de dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura y humedad del aire, temperatura de rocío y precipitación, cada 1 minuto.

Una vez leídas estas variables las representamos en una pantalla tanto en modo de indicador, como de registro histórico que actualizaremos con el valor medio de cada 15 minutos.

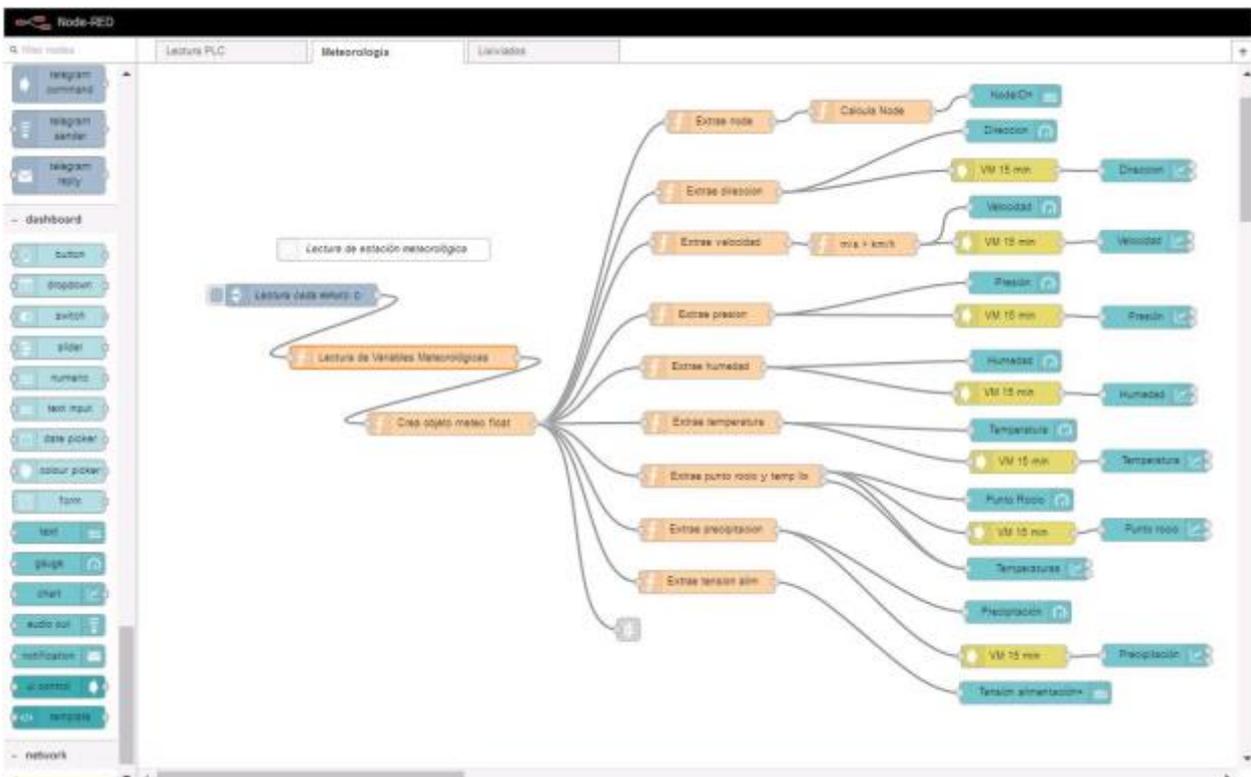


Figura 4-4: Programa de lectura de datos de la estación de meteorología

Con las variables de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica calculamos la humedad específica y la densidad del aire, que también representaremos y que utilizaremos para calcular la cantidad de agua que podemos evaporar con esas condiciones ambientales.

4.3.4.2. Lectura PLC Planta de lixiviados

El PLC de la planta de lixiviados es marca OMRON y dispone de un puerto de comunicación Ethernet con protocolo FINS y dado que la herramienta Node-Red no dispone de un nodo de comunicaciones para ese protocolo, nos hemos tenido que auxiliar de un programa escrito en lenguaje Python que hemos encontrado en Internet y que hemos adaptado a nuestro caso.

Las variables que leemos del PLC son la temperatura y humedad del aire, temperatura de lixiviado, energía total consumida, volumen total evaporado y número de módulos en funcionamiento.

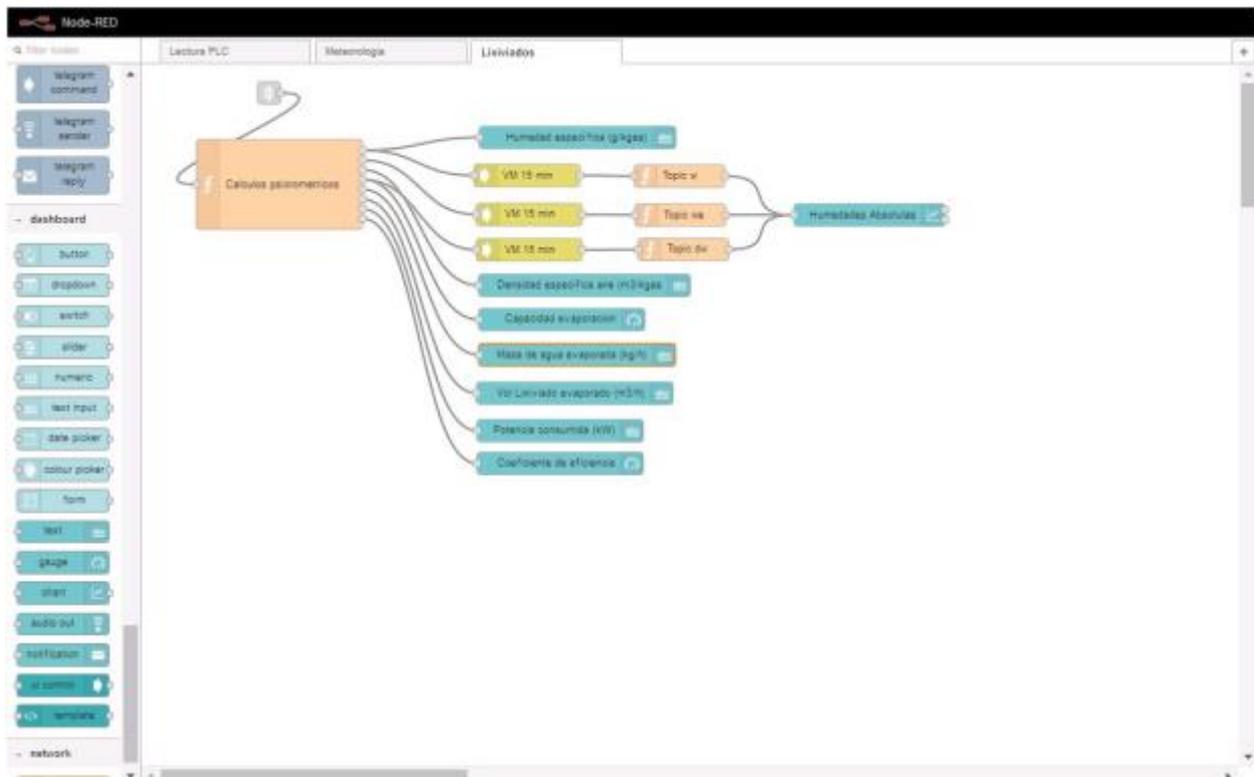


Figura 4-5: Programa de lectura de datos del PLC de la planta de lixiviados

Como las variables de temperatura y humedad del aire ya las hemos recogido de la estación meteorológica, solo utilizaremos la temperatura de lixiviado para el cálculo de la humedad específica del aire saturado de salida. Con el dato del número de módulos en marcha, estimaremos la potencia consumida.

Con los datos leídos del PLC y de la estación meteorológica calcularemos la capacidad de evaporación estimada en g/kgas, la masa de agua estimada a evaporar kgag/h, el volumen de lixiviado estimado a evaporar en m3/h y el indicador energético de evaporación en kWh/m3 con la ecuación (5) tomando como eficiencia del evaporador la eficiencia media calculada en el apartado 3.3.1.1.

Estos resultados se visualizarán en el navegador en una aplicación web que leerá los datos periódicamente y los mostrará de forma gráfica.

La herramienta Node-Red dispone de un nodo de función programable en el lenguaje JavaScript y que en el caso del cálculo de datos de evaporación hemos denominado “Cálculos psicrometricos”. Se adjunta a continuación el código utilizado para el cálculo de los datos anteriormente referidos:

```

var valor = context.global.meteo;

var valorLix = context.global.lixiv

var valorCaudal = context.global.modulos;

var tablix =valorLix.tempLix + 273.15 // temperatura absoluta lixiviado, en K

var tabs = valor.temp + 273.15; // temperatura absoluta del aire de entrada, en K

var hr = valor.humr; // humedad relativa del aire de entrada en %

var pre = valor.pres * 100; // presión atmosférica en pascales

var we = 0.0 ;// humedad específica del aire de entrada, en g/kgas

var wes = 0.0;// humedad específica del aire de salida

var pv =0.0 ; // presión de vapor del aire de entrada, en Pa

var pva = 0.0; // presión de vapor del aire saturado a la temperatura del lixiviado, en Pa

var ve = 0.0 // volumen específico del aire seco a las condiciones de entrada, en m3/kgas

var deltaW =0.0;

var caudal =valorCaudal.caudal; //caudal de aire en m3/h

var efi = 0.38; //eficiencia de la evaporación

var volAgua =0.95; //contenido en agua de los lixiviados en %

var mas=0.0;

var lixEva=0.0;

var potencia=0.0

var kpi =0.0;

// Calcula la presion de vapor de saturación del agua a la presión atmosférica, en kilopascales, en función de la
// temperatura absoluta, en K

function pvs(temp){

    pvap = (Math.exp(-5800.2206 / temp + 1.3914993 - 0.048640239 * temp + (4.1764768 * Math.pow(10, -5)) *
(Math.pow(temp, 2)) - (1.4452093 * Math.pow(10, -8)) * (Math.pow(temp, 3)) + (6.5459673 * Math.log(temp))))/1000;

    return pvap; }

pv = pvs(tabs) * hr * 10;

pva = pvs(tablix) * 100 * 10;

we = 0.621945 * (pv / (pre - pv))*1000;

wes = 0.621945 * (pva / (pre - pva))*1000;

ve = 287.055 * tabs / (pre - pv);

deltaW =wes-we;

mas = (caudal*delta W*efi)/(1000*ve); // kg/h de agua evaporado

```

$lixEva = mas/volAgua/1000$; //m3/h de lixiviado evaporados

$potencia = valorCaudal.modulos * 37.96 * 0.9291 / ve$; //Potencia de la planta en kW según el número de módulos y corrección por densidad del aire

$kpi = potencia / lixEva$;

```
return [{topic: "w", payload: we},{topic: "ws", payload: wes}, {topic: "ve", payload: ve},{topic: "dw", payload: deltaW},{topic:"MAG", payload:mas},{topic:"lixEva", payload:lixEva},{topic:"potencia", payload:potencia},{topic:"kpi", payload:kpi}];
```

4.3.5. Visualización de datos

Se han creado dos pantallas para la visualización de datos, una con los datos meteorológicos y otra con los datos relativos a la evaporación de los lixiviados que se pueden apreciar en la figura.

Para la visualización de los datos podemos utilizar el navegador web de cualquier ordenador conectado a la red de la instalación y tal como se puede apreciar en la figura, podemos seleccionar dos pantallas, una con los datos meteorológicos y otra con los datos de los lixiviados.



Figura 4-6: Menú de selección de pantallas del programa de monitorización en Node-Red



Figura 4-7: Pantalla de datos meteorológicos de la aplicación de monitorización en Node-Red

La pantalla más importante de la aplicación es la relativa a los datos de los lixiviados, que es la que recoge la información más relevante para la operación.

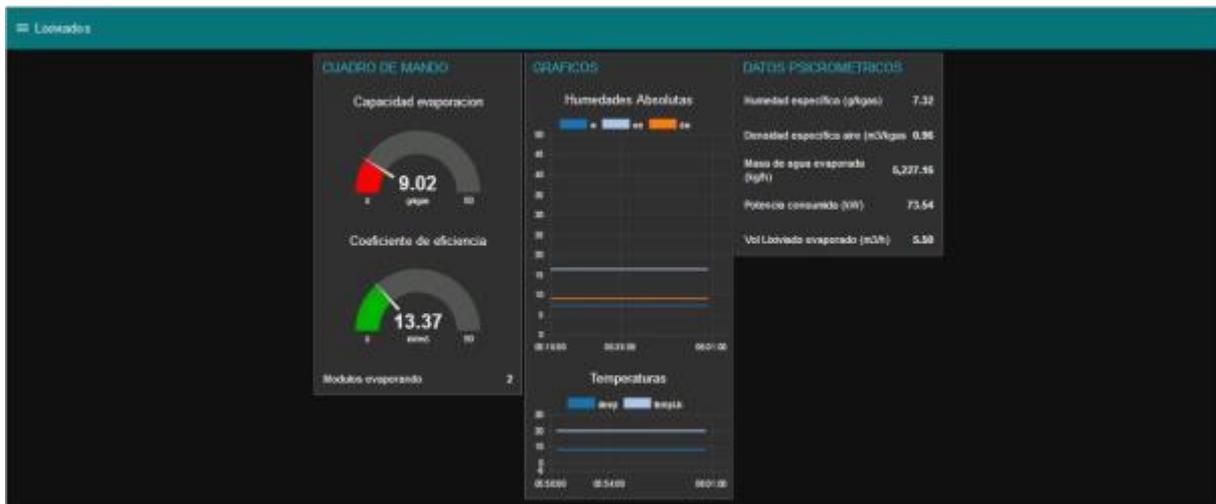


Figura 4-8: Pantalla del cuadro de mando de lixiviados de la aplicación en Node-Red

5. Manual de buenas prácticas

La elaboración de esta auditoría energética ha permitido conocer a fondo la operación de la planta de lixiviados y las características del proceso y los equipos necesarios para llevarlo a cabo.

Gracias a esto se han identificado una serie de medidas que se recogen en este manual de buenas prácticas que pueden beneficiar a la viabilidad y eficiencia del proceso

5.1. Filtros atrapa sólidos en las conducciones de lixiviado

Las conducciones que transportan el lixiviado en la planta cuentan con una serie de filtros (F-001/ /003) antes de la entrada del mismo a las bombas diseñados para atrapar sólidos suspendidos en la corriente de lixiviados tal y como se puede ver en el anexo 8.1 del esquema de la planta.

Estos filtros cuentan con sensores de presión diferencial que pueden dar una idea de su ensuciamiento y consecuente aumento de potencia requerida por las bombas para mantener el caudal de lixiviado.

Es importante prestar atención al estado de los filtros a través de los valores de presión diferencial que se registran en el SCADA local de la planta, ya que una de las características del lixiviado es que contiene una gran cantidad de sólidos en suspensión y sedimentables que con el tiempo tenderán a obturar los filtros.

5.2. Ensuciamiento del relleno de las celdas de evaporación

De igual manera y como ya se ha visto cuando se analizó el efecto de la pérdida de carga del aire a través de las celdas de evaporación en el apartado 3.3.1.3, el efecto de ensuciamiento de los panales reticulares de las celdas de evaporación puede tener un efecto muy negativo sobre el caudal de aire seco que es posible poner en contacto con el lixiviado y que tendrá un efecto proporcional sobre la capacidad de evaporación.

Por lo tanto, el lavado de los panales de forma que se mantenga la mínima pérdida de carga del aire a través de los mismos será crucial para mantener la eficiencia energética del proceso.

El lavado automático que realiza el sistema de control de la planta tras una serie de evacuaciones de concentrado se tendría que hacer de forma conjunta con lavados manuales periódicos con

máquinas que permitan un lavado en profundidad y que retire todos los atascos de material sedimentado sobre los panales.

El depósito de agua bruta para el lavado tiene una capacidad útil de 25 m³ y con cada lavado una cantidad de agua será recirculada sobre los panales y se acumulará en el depósito de control de la planta y tendrá que ser evaporada en la operación normal de la planta tras cada proceso de lavado. Se debe tener en cuenta el coste energético de evaporar el agua con cada lavado y llegar a un compromiso.

Como buena práctica, es crucial el seguimiento y vigilancia de los valores de pérdida de carga medidos por los sensores de presión diferencial en cada módulo de evaporación para evitar el efecto negativo en el proceso.

6. Conclusiones

El trabajo llevado a cabo en la elaboración de esta auditoria energética ha cumplido los objetivos establecidos por el Real Decreto 56-2016 que establece la necesidad de realizar las auditorías energéticas como la que nos ocupa. Se ha seguido una metodología de acuerdo a la norma UNE 16247, detallando los objetivos de la organización y las interacciones del auditor con la misma. Se ha detallado el consumo energético de los equipos de la planta y del proceso a partir de los datos recopilados en un periodo de tiempo que se ha considerado adecuado y que se han analizado en profundidad en base a una serie de aspectos relevantes al proceso. Los datos recopilados se han validado y se ha considerado la precisión y características de los equipos de medida. Se ha desarrollado un modelo para la estimación de la evaporación en función de las condiciones ambientales en cada momento, basado en las relaciones psicrométricas del aire y el agua, y se ha establecido un indicador del rendimiento energético del proceso que ha permitido establecer y comparar la eficiencia del proceso en diferentes condiciones de operación.

Se ha propuesto una mejora de eficiencia energética sobre la operación que habría conseguido una reducción del consumo de energía del 47% en el periodo analizado (2016), y que además permite cumplir el objetivo de la organización en cuanto al coste económico de la evaporación (inferior a 3 €/m³ de lixiviado evaporado), y se ha desarrollado su implementación a través de un equipo de muy bajo coste, código abierto y alta accesibilidad, y que tiene un gran potencial para aumentar el alcance del sistema para seguir mejorando la operación de la planta.

Se ha identificado otra mejora de eficiencia energética relativa al aprovechamiento de calor residual de otro proceso en cogeneración y se ha estimado un potencial de mejora del proceso de evaporación notable de esta medida por si misma y además en conjunción con la anterior.

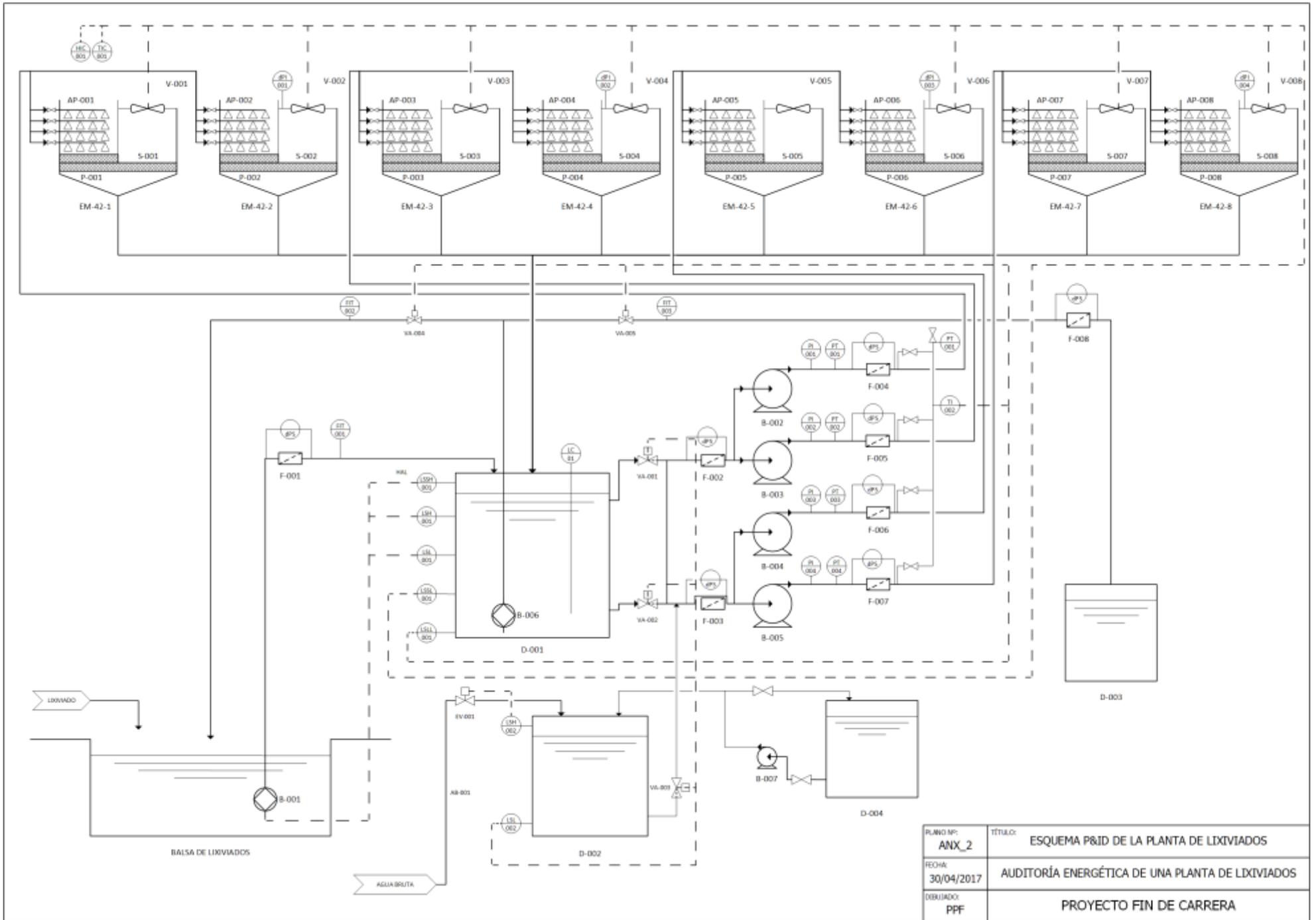
Se han expuesto una serie de buenas prácticas que el auditor ha identificado y cuya aplicación puede conseguir, en la medida de lo posible, una operación de la planta de lixiviados más eficiente y fiable.

7. Bibliografía

- [1] G. Tchobanoglous, *Gestión Integral de Residuos Sólidos*, Aravaca: McGraw-Hill, 1994.
- [2] J. P. Piñeiro, "Vertederos Controlados. Problemática de los lixiviados," *Cuadernos de ICE*, vol. 1, no. 11, pp. 49-65, 1994.
- [3] M. Alía, J. Pastor, A. Urcelay and A. Gil Criado, "Estudio de la toxicidad de los lixiviados procedentes de un vertedero clausurado en un municipio de la sierra de Madrid," in *V Encontro Galego-Portuges de Química*, La Coruña, 1991.
- [4] T. Christensen, P. Kjeldsen, P. Bjerg, D. Jensen and J. Christensen, "Biochemistry of landfill leachate plumes," in *Applied Geochemistry 16*, Lyngby, Technical University of Denmark, 2001, pp. 659-718.
- [5] J. L. Bueno, H. Sastre and A. Lavin, *Contaminación e Ingeniería Ambiental IV. Degradación del Suelo y Tratamiento de Residuos.*, Oviedo: FICYT, 1997.
- [6] P. Poveda Gómez and L. Fontanet Sallán, *Gestión de Residuos Urbanos: Manual Técnico y de Régimen Jurídico*, Madrid: Exlibris Ediciones, 1999.
- [7] C. A. Romero Batallán, "Aprovechamiento integral de lixiviados," Universidad de Salamanca, Salamanca, 2010.
- [8] Diputación de Granada, "Ecocentral Granada," Diputación Granada, [Online]. Available: <http://www.resurgranada.es>. [Accessed 7 Julio 2017].
- [9] Incro, S.A., "Incro Water," [Online]. Available: http://www.incro-water.com/es/?lang_switch=true. [Accessed 7 Julio 2017].
- [10] Incro S.A., "Libro de Ingeniería PAM.P12006," 2012.
- [11] R. Treybal, *Operaciones de Transferencia de Masa*, 2ª edición ed., Mexico: McGraw-Hill, 1997.
- [12] ASHRAE, "Chapter 6: Psychrometrics," in *ASHRAE Handbook Fundamentals*, ASHRAE, 2009, pp. 50-62.
- [13] J. M. Pinazo and A. García, *DTIE 3.01: Psicrometría*, Madrid: Atecyr, 2009.
- [14] J. M. Pinazo, *Manual de Climatización, Tomo I: Transformaciones psicrométricas*, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 1995.
- [15] Raspberry Pi Foundation, "Sitio web oficial Raspberri Pi," [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org>. [Accessed 7 Julio 2017].
- [16] JS Foundation, "Node-RED: Documentation," 2017. [Online]. Available: <https://nodered.org/docs/>. [Accessed 7 Julio 2017].

8. Anexos

8.1. Esquema de control P&ID de la planta de lixiviados



PLANO Nº:	ANX_2	TÍTULO:	ESQUEMA P&ID DE LA PLANTA DE LIXIVIADOS
FECHA:	30/04/2017		AUDITORÍA ENERGÉTICA DE UNA PLANTA DE LIXIVIADOS
DEBIDADO:	PPF		PROYECTO FIN DE CARRERA

8.2. Diagrama Unifilar del complejo Ecocentral Granada

20 kV

Denominación de Analizadores de red:

X = Núm. de pasarela

X = 1, Pasarela CBGT 1

X = 2, Pasarela CBGT 2

X = 3, Pasarela CCM1

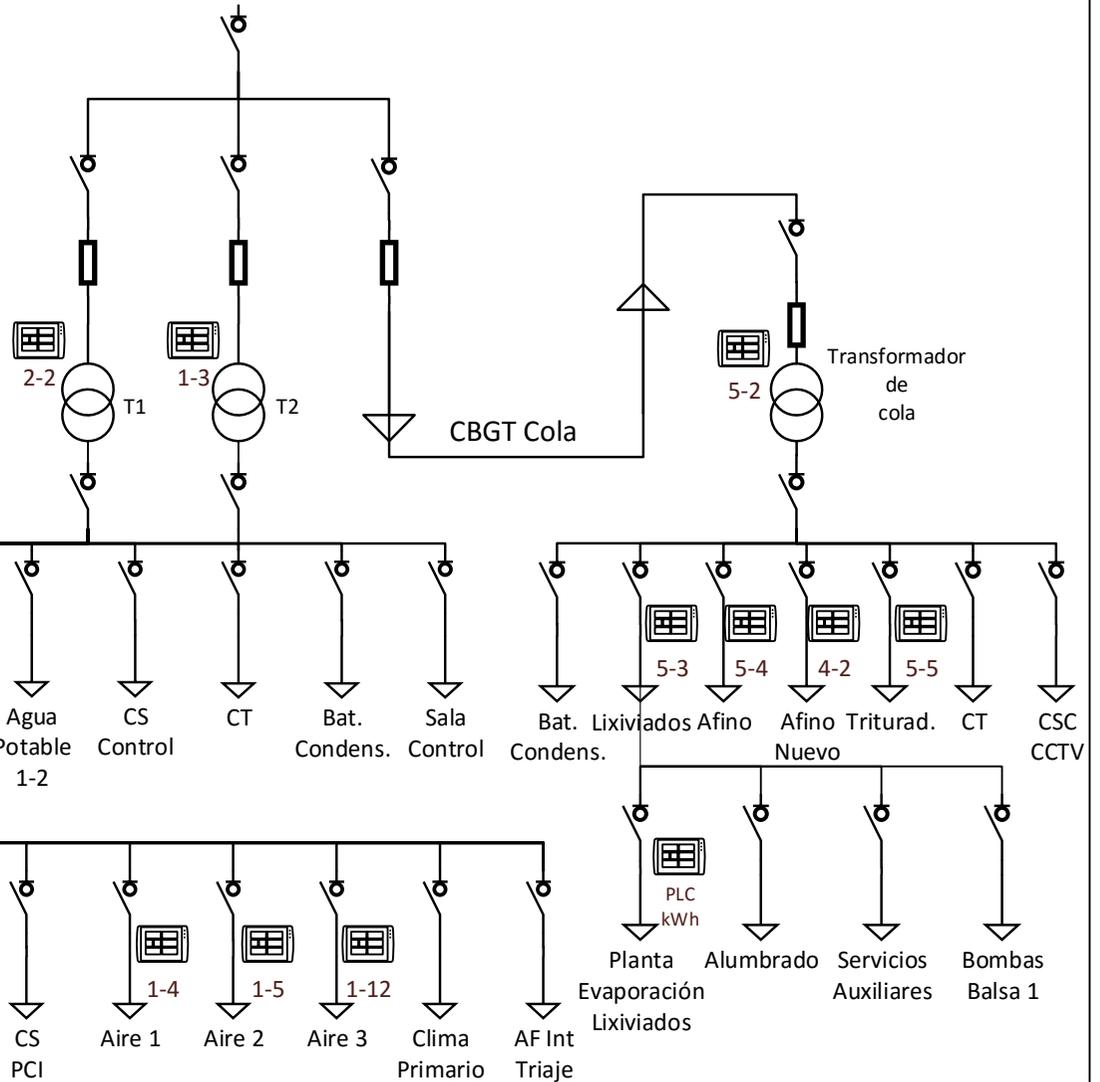
X = 4, Pasarela CCM Afino nuevo

X = 5, Pasarela CBGT Cola



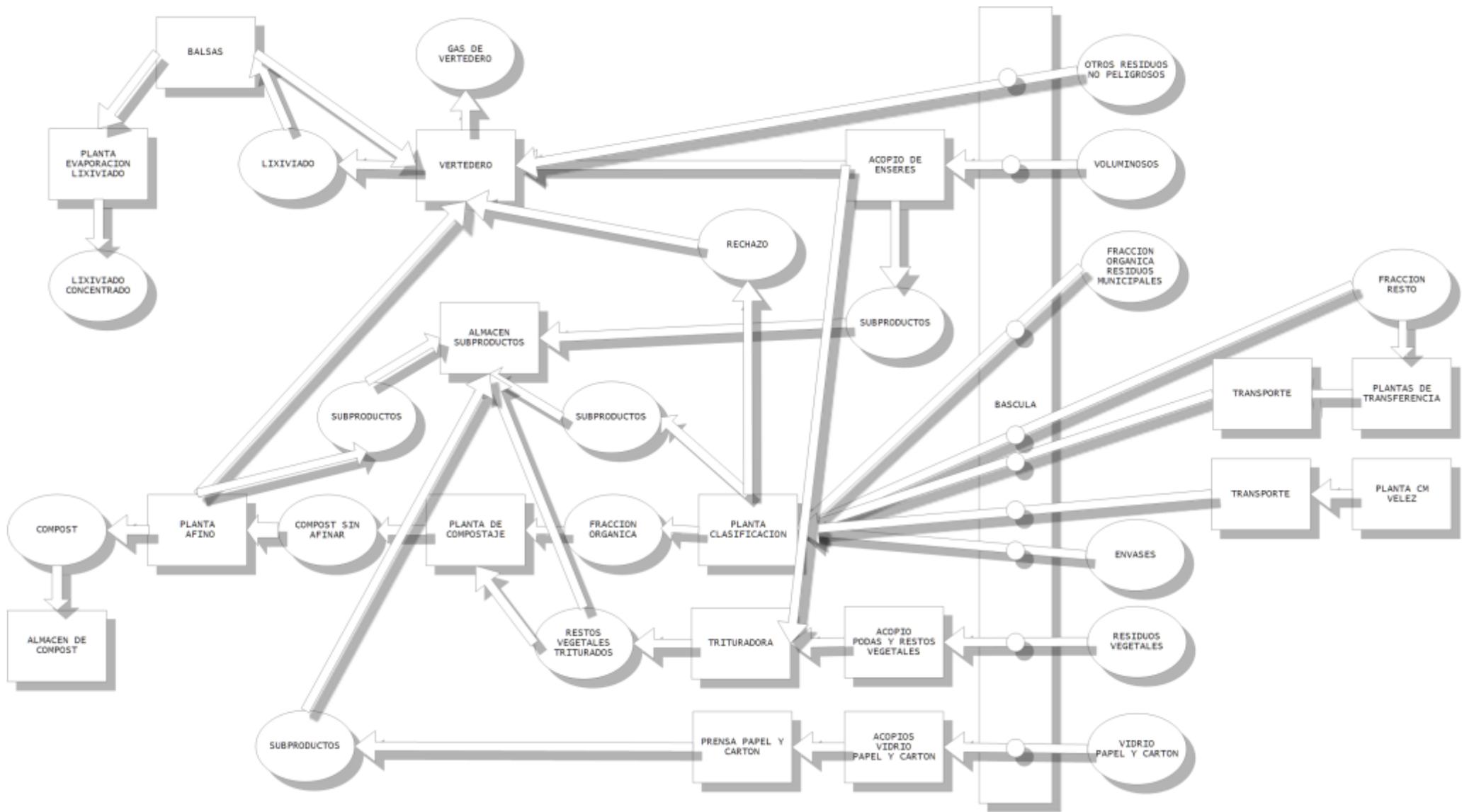
X-Y

Y = Dirección MODBUS



PLANO Nº: ANX_1	TÍTULO: ESQUEMA UNIFILAR ECOCENTRAL GRANADA
FECHA: 25/04/2017	AUDITORÍA ENERGÉTICA DE UNA PLANTA DE LIXIVIADOS
DIBUJADO: PPF	PROYECTO FIN DE CARRERA

8.3. Diagrama de flujo de materiales en el complejo Ecocentral Granada



8.4. Código Visual Basic implementado en hojas de Calculo

```
Function Tabs(t As Double) As Double
```

```
' Calcula la temperatura absoluta en K
```

```
    Tabs = 273.15 + t
```

```
End Function
```

```
Function pvs(Ts As Double) As Double
```

```
' Esta función calcula la presión de vapor saturado en kPa
```

```
' la temperatura Tabs es absoluta y viene dada en K
```

```
    pvs = (Exp(-5800.2206 / Ts + 1.3914993 - 0.048640239 * Ts + (4.1764768 * 10 ^ -5) * (Ts ^ 2) - (1.4452093 * 10 ^ -8) * (Ts ^ 3) + (6.5459673 * Log(Ts)))) / 1000
```

```
End Function
```

```
Function ETH(Tas As Double, Hr As Double, z As Double) As Double
```

```
Dim pv, pas, W, ve, Ws, mas, MAG, tabb As Double
```

```
' Calcula la entalpia del aire seco
```

```
' Calculamos la presion de vapor en pascales, que llama a la función pvs y tabs
```

```
    tabb = Tabs(Tas)
```

```
    pv = pvs(tabb) * Hr * 10
```

```
' Calculamos la presión debida a la altura en Pascales
```

```
    pas = 101325 * (1 - 2.25577 * z * (10 ^ -5)) ^ 5.2559
```

```
' Calculamos la humedad específica en kg/kgas
```

```
    W = 0.621945 * (pv / (pas - pv))
```

```
' Calculamos la entalpía
```

```
    ETH = 1.006 * Tas + W * (2501 + 1.86 * Tas)
```

```
End Function
```

```
Function EFI(Tas As Double, Hr As Double, z As Double, Tag As Double, Qt As Double, MAG As Double) As Double
```

```
Dim pv, pas, W, ve, Ws, mas, tabb As Double
```

```
' Función para calcular la eficiencia del sistema en función del lixiviado apaortado.
```

```
' Tas = Temperatura del aire seco en °C
```

```
' Hr = Humedad relativa en %
```

```
' z= Altura sobre el nivel del mar en m
```

```
' Tag= Temperatura del agua en °C
```

```
' Qt= Caudal de aire inyectado en m3/h
```

```
' Mag = kg de agua evaporada en el ciclo. Suponemos que todo el lixiviado es agua y en caso contrario habría que calcularlo en función de las densidades
```

```
' Calculamos la presión de vapor de saturación en kiloPascales
```

```
    pvs = (Exp(-5800.2206 / Tabs + 1.3914993 - 0.048640239 * Tabs + (4.1764768 * 10 ^ -5) * (Tabs ^ 2) - (1.4452093 * 10 ^ -8) * (Tabs ^ 3) + (6.5459673 * Log(Tabs)))) / 1000
```

```
' Calculamos la presion de vapor en el aire de entrada, en pascales, que llama a la función pvs y tabs
```

```
    tabb = Tabs(Tas)
```

```
    pv = pvs(tabb) * Hr * 10
```

```
' Calculamos la presión debida a la altura en Pascales
```

```
    pas = 101325 * (1 - 2.25577 * z * (10 ^ -5)) ^ 5.2559
```

```
' Calculamos la humedad específica en kg/kgas
```

```
    W = 0.621945 * (pv / (pas - pv))
```

```
' Calculamos el volumen específico del aire de entrada
```

```
    ve = 287.055 * Tabs(Tas) / (pas - pv)
```

```
' Calculamos la presión de vapor del aire saturado a la temperatura del agua
```

```
    tabb = Tabs(Tag)
```

```
    pv = pvs(tabb) * 100 * 10
```

```
' Calculamos la humedad absoluta del aire saturado calculada con la temperatura humeda igual a la temperatura del agua y en saturación en kg/kgas
```

```
    Ws = 0.621945 * (pv / (pas - pv))
```

```
' Calculamos el caudal másico del aire de entrada en kg/h
```

```
    mas = Qt / ve
```

```
' Calculo de la eficiencia
```

```
    EFI = MAG / (mas * (Ws - W))
```

```
End Function
```

Function MAG(Tas As Double, Hr As Double, z As Double, Tag As Double, Qt As Double) As Double

Dim pv, pas, W, ve, Ws, mas, tabb As Double

' Función para calcular la cantidad de agua máxima a evaporar, suponiendo una eficiencia del 100%.

' Tas = Temperatura del aire seco en °C

' Hr = Humedad relativa en %

' z= Altura sobre el nivel del mar en m

' Tag= Temperatura del agua en °C

' Qt= Caudal de de aire inyectado en m3/h

' Calculamos la presión de vapor del aire de entrada, en pascales, que llama a la función pvs y tabs

tabb = Tabs(Tas)

pv = pvs(tabb) * Hr * 10

' Calculamos la presión atmosférica a la altura z, en Pascales

pas = 101325 * (1 - 2.25577 * z * (10 ^ -5)) ^ 5.2559

' Calculamos la humedad específica en kg/kgas

W = 0.621945 * (pv / (pas - pv))

' Calculamos la densidad específica del aire de entrada

ve = 287.055 * Tabs(Tas) / (pas - pv)

' Calculamos la presión de vapor del aire saturado a la temperatura del agua

tabb = Tabs(Tag)

pv = pvs(tabb) * 100 * 10

' Calculamos la humedad específica del aire saturado calculada con la temperatura húmeda igual a la temperatura del agua y en saturación en kg/kgas

Ws = 0.621945 * (pv / (pas - pv))

' Calculamos el caudal másico del aire de entrada

mas = Qt / ve

' Calculo de la cantidad de agua evaporada, en función de una eficiencia dada

MAG = mas * 1 * (Ws - W)

End Function

Function WES(Tas As Double, Hr As Double, z As Double) As Double

Dim pv, pas, W, ve, Ws, mas, tabb As Double

' Función para calcular la humedad específica del aie seco.

' Tas = Temperatura del aire seco en °C

' Hr = Humedad relativa en %

' z= Altura sobre el nivel del mar en m

' Calculamos la presión de vapor en pascales, que llama a la función pvs y tabs

tabb = Tabs(Tas)

pv = pvs(tabb) * Hr * 10

' Calculamos la presión atmosférica a la altura z, en Pascales

pas = 101325 * (1 - 2.25577 * z * (10 ^ -5)) ^ 5.2559

' Calculamos la humedad específica en g/kgas

WES = 0.621945 * (pv / (pas - pv)) * 1000

End Function

Function WESAT(Tas As Double, z As Double) As Double

Dim pv, pas, W, ve, Ws, mas, tabb As Double

' Función para calcular la humedad específica del aire saturado.

' Tas = Temperatura del aire seco en °C

' z= Altura sobre el nivel del mar en m

' Calculamos la presión de vapor saturado a la temperatura del lixiviado, en pascales, que llama a la función pvs y tabs

tabb = Tabs(Tas)

pv = pvs(tabb) * 100 * 10

' Calculamos la presión atmosférica a la altura z, en Pascales

pas = 101325 * (1 - 2.25577 * z * (10 ^ -5)) ^ 5.2559

' Calculamos la humedad específica del aire saturado a la temperatura del lixiviado, en g/kgas

WESAT = 0.621945 * (pv / (pas - pv)) * 1000

End Function

Sub Macro1()

' Macro1 Macro

' Macro grabada el 18/09/2014 por jofedo00

' Macro para interpolar datos en columnas

Columna = ActiveCell.Column 'Calculamos el índice de la columna activa

Fila = ActiveCell.Row ' Calculamos el índice de la fila activa

NumeroCel = Selection.Count ' Contamos el número de celdas de la selección. ¡Ojo! hay que seleccionar en una sola columna

ValorIni = ActiveCell.Rows ' Leemos el valor del extremo inicial

ValorFin = ActiveCell.Offset(NumeroCel - 1, 0).Value ' Calculamos el extremo final

```
Coeficiente = (ValorFin - ValorIni) / (NumeroCel - 1) ' Calculamos el coeficiente de interpolación  
' Realizamos un lazo para rellenar los valores interpolados y los marcamos en rojo
```

```
For i = 1 To NumeroCel - 2  
    Cells(i + Fila, Columna).Value = ValorIni + i * Coeficiente  
    Cells(i + Fila, Columna).Interior.ColorIndex = 3  
    Cells(i + Fila, Columna).Interior.Pattern = xlSolid  
Next
```

```
End Sub
```

```
Function DEN(Tas As Double, Hr As Double, z As Double) As Double  
Dim pv, pas, tabb As Double
```

```
' Calculamos la presión de vapor de saturación en kiloPascuales  
' pvs = (Exp(-5800.2206 / Tabs + 1.3914993 - 0.048640239 * Tabs + (4.1764768 * 10 ^ -5) * (Tabs ^ 2) - (1.4452093 * 10 ^ -8) *  
(Tabs ^ 3) + (6.5459673 * Log(Tabs)))) / 1000  
' Calculamos la presión de vapor del aire de entrada, en pascuales, que llama a la función pvs y tabs  
    tabb = Tabs(Tas)  
    pv = pvs(tabb) * Hr * 10  
' Calculamos la presión atmosférica a la altura Z, en Pascales  
    pas = 101325 * (1 - 2.25577 * z * (10 ^ -5)) ^ 5.2559  
' Calculamos el volumen específico del aire seco en m3/kgas  
    DEN = 287.055 * Tabs(Tas) / (pas - pv)
```

```
End Function
```

```
'Temperatura del lixiviado estimada para el año 2016
```

```
Function Tlix(fecha As Date)  
Dim mes(12) As Variant  
mes(5) = 15  
mes(6) = 17.7  
mes(7) = 20  
mes(8) = 19.4  
mes(9) = 15  
mes(10) = 13.5  
numeromes = Month(fecha)  
Tlix = mes(numeromes)  
End Function
```