

## TECEM, Desarrollo de nuevas tecnologías para el análisis y la optimización energética y medioambiental del proceso de fabricación de baldosas cerámicas

A. Lluna<sup>1</sup>, A. Rubio<sup>1</sup>, C. Herrero<sup>1</sup>, R. Gero<sup>1</sup> y V.Fuster<sup>1,2</sup>

1 Instituto Tecnológico de la Energía (ITE), Avda. Juan de la Cierva, 24, Paterna, Valencia. 46980. [observatorio@ite.es](mailto:observatorio@ite.es)

2 ITE, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia. 46002.

**Resumen:** La iniciativa *Industria Conectada 4.0* del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad identifica un reto de la industria la “sostenibilidad de los procesos”, destacando así el aspecto energético y medioambiental como factor clave del incremento de la competitividad de las empresas. En este sentido, con el fin de orientar a las empresas hacia una industria conectada, eficiente y sostenible, el proyecto de I+D “TECEM, Desarrollo de nuevas tecnologías para el análisis y la optimización energética y medioambiental del proceso de fabricación de baldosas cerámicas” cofinanciado por IVACE, Instituto Valenciano de la Competitividad Empresarial y fondos Europeos de Desarrollo Regional FEDER, tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta digital de gestión energética y medioambiental para el sector azulejero que dé soporte al diagnóstico inteligente de su producción respecto a la demanda energética y a las posibilidades de aplicar soluciones de generación renovable y reaprovechamiento energético, con el fin de disminuir costes energéticos y emisiones indirectas. Además promueve la disminución de emisiones directas de gases contaminantes, en concreto el CO<sub>2</sub>, trabajando en el desarrollo de membranas poliméricas a nivel laboratorio para ser integradas en un diseño posterior de filtración de gases. Siendo este sector uno de los industriales afectado por la normativa europea de comercio de emisiones (EU-ETS, Directiva 2009/29/CE) por lo que la disminución y captura de CO<sub>2</sub> en los gases de chimenea emitidos es de gran importancia.

**Áreas clave:** Energía, eficiencia y cambio climático

**Palabras clave:** industria; eficiencia energética; energías renovables, digitalización energética; membranas poliméricas.

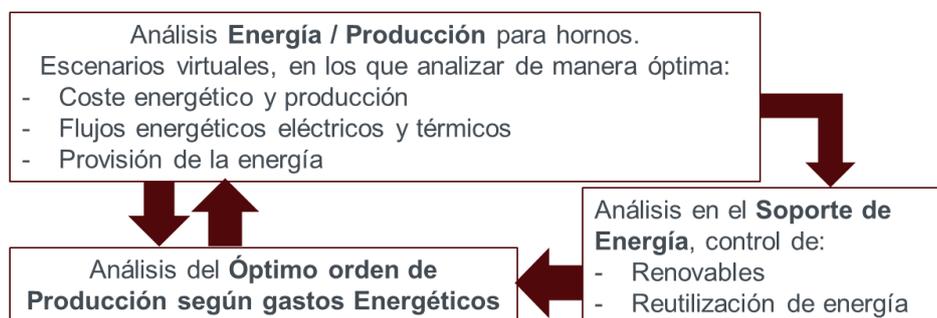
### 1. Introducción a proyecto TECEM

El Instituto Tecnológico de la Energía (ITE) lleva a cabo el proyecto “TECEM, Desarrollo de nuevas tecnologías para el análisis y la optimización energética y medioambiental del proceso de fabricación de baldosas cerámicas” cofinanciado por IVACE, Instituto Valenciano de la Competitividad Empresarial y fondos Europeos de Desarrollo Regional FEDER. Dicho proyecto tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta digital de gestión energética y medioambiental para el sector azulejero capaz de dar soporte al diagnóstico inteligente de su producción respecto a la demanda energética y a las posibilidades de aplicar soluciones de generación renovable y reaprovechamiento energético, con el fin de disminuir costes energéticos y emisiones indirectas. Además promueve la disminución de emisiones directas de gases contaminantes, en concreto el

CO<sub>2</sub>, trabajando en el desarrollo de membranas poliméricas a nivel laboratorio para ser integradas en un diseño posterior de filtración de gases. Siendo este sector uno de los industriales afectado por la normativa europea de comercio de emisiones (EU-ETS, Directiva 2009/29/CE) por lo que la disminución y captura de CO<sub>2</sub> en los gases de chimenea emitidos es de gran importancia. Así esta iniciativa se encuentra en total consonancia con la propuesta de mejora integral de la Industria Conectada 4.0 sobre digitalización, eficiencia y sostenibilidad [1].

En uno de sus resultados, la herramienta que se desarrolla proporcionará a las empresas, que utilicen hornos industriales en sus procesos productivos, un sistema digital capaz de analizar las variables energéticas, su coste y su relación con la producción. Este sistema de control de planta y negocio se basa en una arquitectura integral desde planta a nivel de información que captura y trata datos, caracteriza el comportamiento energético del proceso e infiere y sugiere a los gestores la planificación ideal productiva según su coste energético, a la vez que analiza el impacto de integrar soluciones de energías renovables y de reaprovechamiento térmico en estos escenarios.

El proyecto realizado por el Instituto Tecnológico de la Energía (ITE) y el Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) cuenta con la colaboración de diferentes empresas tecnológicas y energéticas y está previsto aplicar la solución en forma de piloto en empresas ceramistas y de templado de vidrio. Así es un proyecto de I+D que apoya a las empresas en su camino hacia la Industria 4.0 mediante el desarrollo de una herramienta de gestión energética que da soporte al análisis y gestión de la producción respecto al consumo energético, en este caso centrada en los hornos del sector azulejero, mediante la siguiente metodología integral:



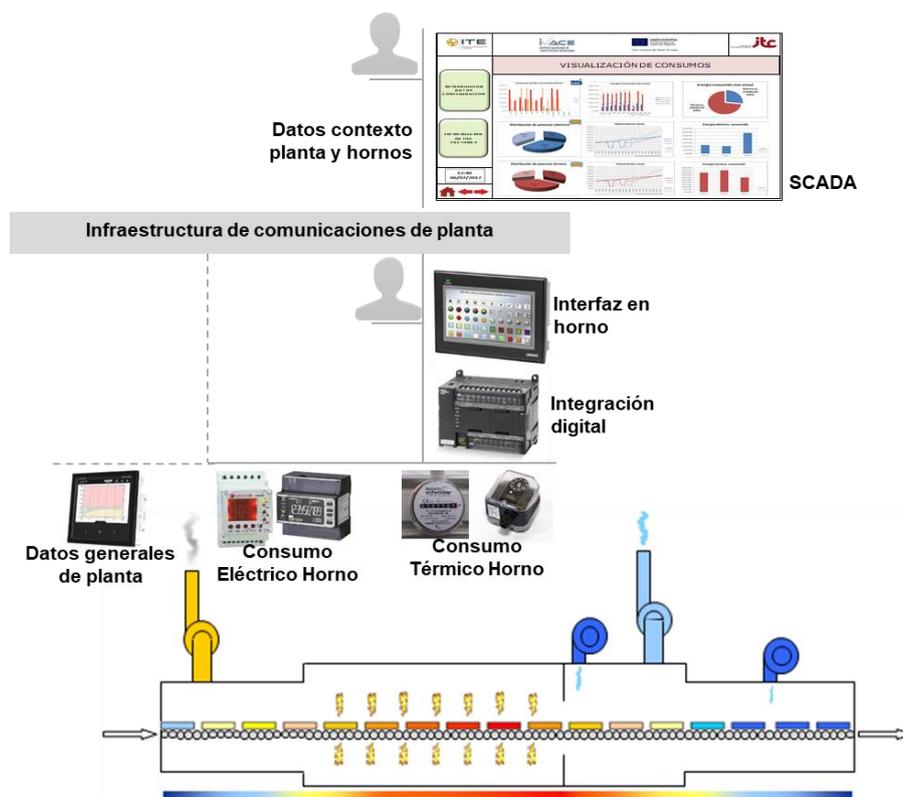
**Figura 1.** Metodología de gestión de la energía TECEM. Fuente ITE.

En este sentido, el análisis de los patrones de consumo y la producción asociada se destaca como uno de los procesos necesarios para la correcta implantación de medidas de eficiencia energética según una visión tradicional y normativo de análisis energético [19]. El proyecto sigue esa filosofía integrando esa metodología en sistemas de captación, digitalización y tratamiento avanzado de datos para asistencia a la toma de decisiones fundamentada.

## 2. Monitorización y planificación energético-productiva

Las primeras funciones ofrecidas por la herramienta que en este documento se exponen ven su desarrollo justificado en el alto consumo energético de las empresas pertenecientes al sector cerámico, con ratios productivos relativamente constantes de entre 25 y 30 kWh/m<sup>2</sup> de producto cocido [2]. El proceso de cocción, en la que se incluyen los hornos cerámicos, puede llegar a demandar hasta un 55 % del consumo térmico total y un consumo eléctrico que, aunque es notablemente menor al primero, no

deja de tener una importancia absoluta para nada despreciable. En este sentido, uno de los grandes pilares de TECEM se basa en la monitorización continua del consumo energético de los hornos en los que se implementa, obteniendo así tanto datos de consumo térmico como eléctrico con almacenamiento periódico en una base de datos. A partir de dichos datos, y mediante información de las facturas de planta introducidas por el usuario, la herramienta digital es capaz de efectuar un tratamiento del dato energético a distintos niveles. La arquitectura desarrollada se representa de manera esquemática en la siguiente figura:



**Figura 2.** Arquitectura herramienta digital TECEM. Fuente ITE.

Como se aprecia, el sistema abarca componentes físicos y software desde el nivel de Control de Planta hasta los niveles de Control de Negocio e Información. Por otro lado, la siguiente figura esquematiza el volumen de datos a tratar en función del nivel de agregación de éstos:

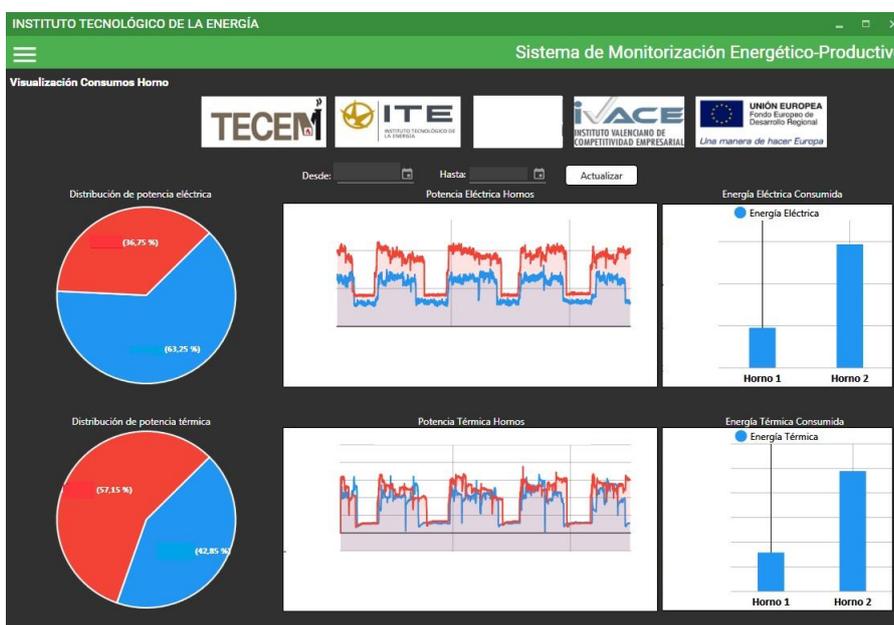


**Figura 3.** Cantidad y tipología de datos tratados por la herramienta. Fuente: ITE.

En síntesis, se pueden identificar las siguientes funcionalidades asociadas a la función de monitorización de hornos y recolección de datos:

- Representación del consumo térmico, eléctrico y total, tanto individual de hornos como global de planta. Distintos horizontes de representación en la visualización del consumo, desde datos instantáneos obtenidos cada período de 15 minutos hasta datos de consumo mensual correspondientes al año en curso y anterior.
- Estimación de la facturación eléctrica de los hornos, asumiendo escenarios de tarifas de discriminación horaria típicamente dados en escenarios industriales que permitan comparar con la facturación real introducida por el usuario. Estimación de facturación térmica de los hornos en base a información de facturas
- Estimación del coste de consumo del kWh tanto térmico como eléctrico, junto con el correspondiente desglose en los distintos términos de los que se componen según la tarificación tradicional.
- Introducción de datos productivos y cálculo de la línea base energética referida al indicador que relaciona la energía total consumida por unidad productiva, tanto del año en curso como del precedente (kWh/m<sup>2</sup>)
- Cálculo de indicadores particulares de horno, tanto energético como medioambiental.

La siguiente captura de pantalla muestra un ejemplo de tratamiento y filtrado avanzado de datos para dos hornos reales en el prototipo desarrollado, como una de las funcionalidades descritas previamente.



**Figura 4.** Interfaz de monitorización, caso del consumo individual por horno. Fuente: ITE.

Por otro lado, como ya se ha comentado, el gasto eléctrico en hornos y secaderos no es para nada despreciable en el sector cerámico [2]. Además, éste repercute en un gasto monetario mayor o menor dependiendo de la hora en que se produzca por los diferentes modelos de tarificación existentes, ya sea con discriminación horaria o con precios indexados a mercado. Es por ello que puede resultar de gran ayuda una planificación energético-productiva con el objetivo final de disminuir la factura eléctrica de la fábrica.

En este sentido, el proyecto TECEM apuesta por la integración de sistemas de gestión de procesos basados en la optimización de la planificación productiva teniendo en cuenta los consumos energéticos de los procesos, así como la variabilidad temporal de los costes energéticos. Así, la funcionalidad desarrollada está enfocada al estudio y desarrollo de un mecanismo de análisis de una planificación energético-productiva de los hornos, planteando una secuencia óptima de los trabajos planificados. Los objetivos concretos de esta herramienta son:

- Realización de una caracterización del proceso productivo presente, definiendo consumos de cada uno de los trabajos a realizar así como características productivas de cada uno de los artículos planificados.
- Simular el funcionamiento de este proceso, aplicando diferentes secuencias de producción, mostrando al usuario predicciones de consumo y ahorro energético.
- Utilización de un algoritmo de optimización que define la planificación y secuencia de trabajos óptima, con el objetivo de minimizar los costes energéticos.
- Presentación de los resultados en forma de plan de producción óptimo con alto nivel de detalle, así como de diferentes indicadores del ahorro potencial que se consiguen mediante la utilización de la herramienta.

El proceso productivo estudiado como ejemplo en el proyecto se engloba dentro de un horno cerámico con consumos tanto eléctricos como térmicos. Cada lote de producción se identifica con un número, el cual está relacionado con un producto en concreto, y se divide en boxes, conjuntos de baldosas que entran en el horno secuencialmente. En cada horno caben 3 boxes del mismo, o diferentes, productos a la vez, y la velocidad de avance de las baldosas es continua, por lo que cada box siempre tarda lo mismo entre la entrada al horno y la salida, 2 horas.

Cada lote es identificado con un consumo (potencia) medio del horno mediante la caracterización de los lotes de producción y el consumo real en el periodo de estudio. Los lotes se planifican mediante el número de boxes a realizar en el periodo, pudiendo elegir entre manufacturar todo el lote de un mismo producto seguido o poder dividirlos en boxes para mejorar la adecuación de la producción a la tarifa eléctrica.

El caso de optimización ideal buscado se consigue con un algoritmo de optimización para encontrar la secuenciación que logra el coste de facturación eléctrica mínimo. El algoritmo está integrado en una Herramienta de Planificación Productiva [4][6], la cual ha sido modificada para adecuarse a las características del problema descrito, permitiendo una amplia variedad de restricciones y modificaciones, como la agrupación de boxes en lotes seguidos o la identificación de relaciones de precedencia entre lotes, así como la determinación de fechas límite y de disponibilidad diferentes para cada lote.

El algoritmo de la Herramienta de Planificación Productiva [5][7] está implementado en Matlab, y comunica con la base de datos para recoger las variables de entrada necesarias y devolver los resultados de optimización alcanzados. Este proceso se realiza con la herramienta YALMIP [8], que permite definir las restricciones del problema de forma clara y concisa, a la vez que permite la utilización de una amplia variedad de solvers y opciones de optimización como: objetivo de error, número de iteraciones, otros. En cuanto a la técnica algorítmica de optimización empleada, al tratarse de un problema del tipo "Mixed Integer Lineal Programming", el método utilizado es el "Branch-and-Bound", ampliamente implementado en este tipo de problemas de optimización entera lineal.

Los datos de entrada al algoritmo de optimización de la planificación productiva son los referentes al coste eléctrico (tarifa), al consumo de los artículos, y a la identificación de los artículos y el número de boxes a producir de cada uno de ellos, así como la fecha de comienzo de la planificación. Para que la solución sea factible se debe cumplir la siguiente condición:

Dónde:

$$\sum_{t \in T} x_t^i = q_i$$

- $x_t^i$ : cantidad de unidades fabricadas del ítem  $i$  durante el periodo de tiempo  $t$ .
- $q_i$ : cantidad total a fabricar del pedido  $q$  asociado al ítem  $i$ .

La variable de decisión utilizada para la optimización del proceso será el coste energético total de la producción (CE), el cual se calculará con la siguiente ecuación:

$$CE = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} x_t^i * p_e^t * t_p^i * P_e^i$$

Dónde:

- $p_e^t$ : precio de la electricidad (€/kWh) durante el periodo de tiempo  $t$ .
- $t_p^i$ : tiempo de producción del artículo  $i$ .
- $P_e^i$ : potencia consumida (kW) por el artículo  $i$  en ese intervalo temporal.

Como salida de la función se generan dos escenarios opuestos, uno para maximizar el coste (pesimista) y otro para minimizarlo, para así poder evaluar el potencial de ahorro del algoritmo de optimización en términos energéticos. La salida del algoritmo se compondrá de una planificación detallada que relacione las referencias de cada artículo con el instante en que se está produciendo en el horno, generando una lista ordenada de los lotes que pasan por el horno. Además, se devolverá el coste energético total para cada escenario, generando indicadores de ahorro porcentual entre estos dos escenarios y la planificación actual.

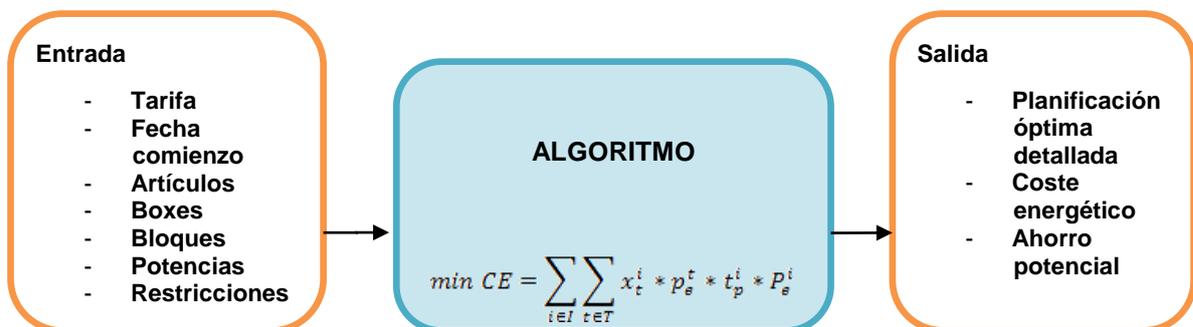


Figura 5. Esquema de la arquitectura del planificador. Fuente ITE.

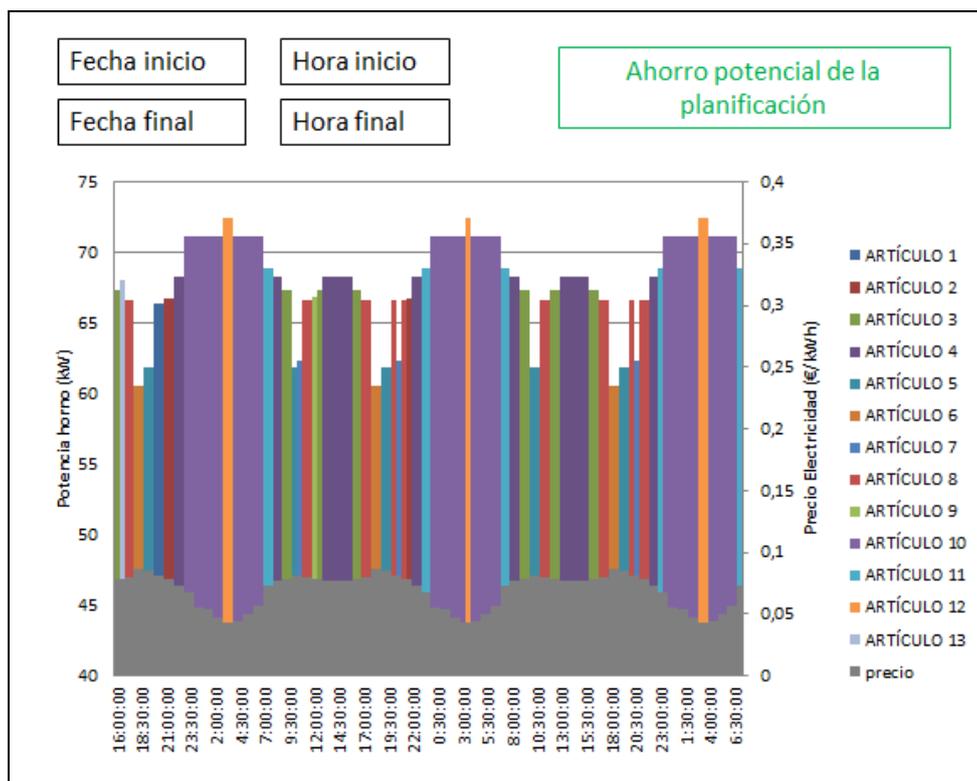
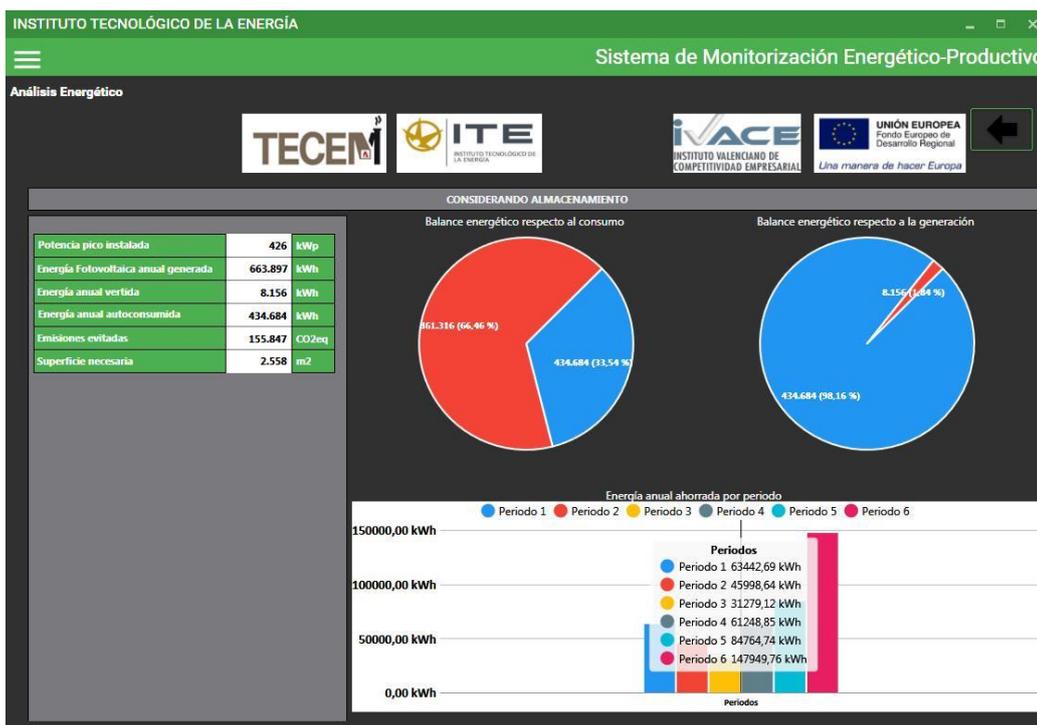


Figura 6. Ejemplo de representación de la planificación óptima. Fuente ITE.

### 3. Diagnóstico de integración de renovables en proceso productivo

En el contexto global actual, la integración sistemas distribuidos de generación renovable se impone como solución de peso a medio plazo. Ello, unido a la preocupación de la industria por mantener un alto nivel de competitividad, obliga a valorar nuevas estrategias de optimización de la factura de energía, de gran peso en industrias de consumo intensivo, con un consecuente impacto medioambiental positivo. Para dar respuesta a ello, la herramienta TECEM ofrece funciones de diagnóstico continuo y asesoramiento en la toma de decisiones de instalación de sistemas de generación renovable. Por la tipología de procesos típicamente asociados a los hornos, se han seleccionado las tecnologías más convenientes por sus posibilidades de integración en éstos.

Por un lado, se lleva a cabo un estudio de las posibilidades de integración de una instalación solar fotovoltaica según los datos obtenidos de los analizadores desplegados. Para ello, a partir de una cantidad limitada de datos referentes a las características técnicas esperables del sistema, al potencial solar del emplazamiento y a las limitaciones de espacio, el software es capaz de proponer un sistema de generación solar que se adapte a las necesidades del usuario para lograr compensar la energía eléctrica demandada por los hornos monitorizados. En este sentido el desarrollo implementado parte de dos casos de estudio; con y sin apoyo de baterías. De esta manera, el usuario tiene una retroalimentación constante acerca de las posibilidades de integrar esta tecnología en su planta, planteando para ello un análisis energético como el que se muestra en la siguiente captura de pantalla del prototipo desarrollado:

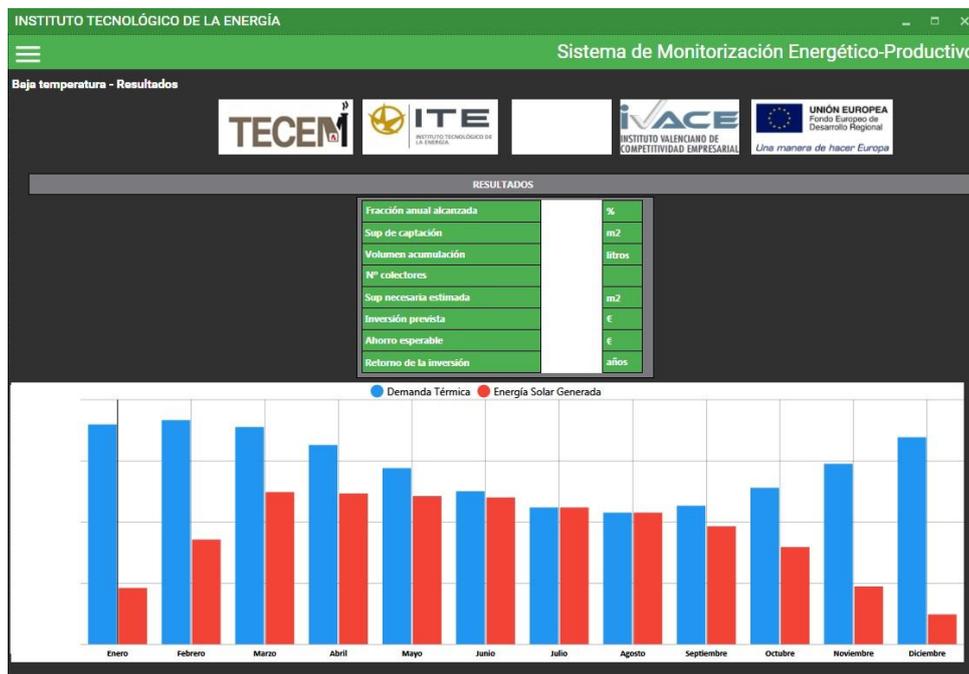


**Figura 7.** Interfaz de la función de integración fotovoltaica. Fuente ITE.

A partir de dicho análisis se estima la rentabilidad económica esperable según tres escenarios económicos posibles, planteados con el fin de contemplar posibles variaciones en la legislación referente al autoconsumo fotovoltaico. Con dichos datos el usuario puede conocer de manera orientativa la inversión, los beneficios y los costes asociados a un hipotético sistema de generación renovable, pudiendo así tomar decisiones fundamentadas en datos reales de funcionamiento de los hornos, quedando como siguiente paso la realización de un estudio en detalle para su integración.

La segunda de las funciones de integración renovable está asociada a la energía solar térmica. En industrias de ciertos sectores como el cerámico, el consumo de energía calorífica en los hornos alcanza con frecuencia porcentajes muy altos respecto consumo energético total de la planta, con el consecuente impacto económico que ello conlleva. En este sentido, el aprovechamiento del alto potencial solar en la práctica totalidad del territorio español no tiene por qué limitarse al estudio de sistemas solares fotovoltaicos, siendo pertinente también efectuar un análisis del posible impacto de instalar tecnologías de generación solar térmica. Este tipo sistemas, largamente inexplorados en la generación de calor para proceso industrial cuentan, no obstante, con muy distintas tecnologías disponibles según rangos de temperatura requeridos y otros condicionantes. En este sentido, en TECEM se propone un análisis de doble vertiente; de sistemas de baja y de media temperatura.

En consecuencia, por un lado se analiza el posible impacto de instalar un sistema de generación de agua caliente a baja temperatura (típicamente menor a 100°C) a partir de datos del usuario mediante la implementación del algoritmo f-chart para sistemas centralizados de generación solar de agua caliente sanitaria. La siguiente captura de pantalla muestra parte de la interfaz desarrollada asociada al motor de cálculo integrado en el prototipo basado en el algoritmo previamente descrito:



**Figura 8.** Interfaz de integración solar térmica de baja temperatura. Fuente ITE.

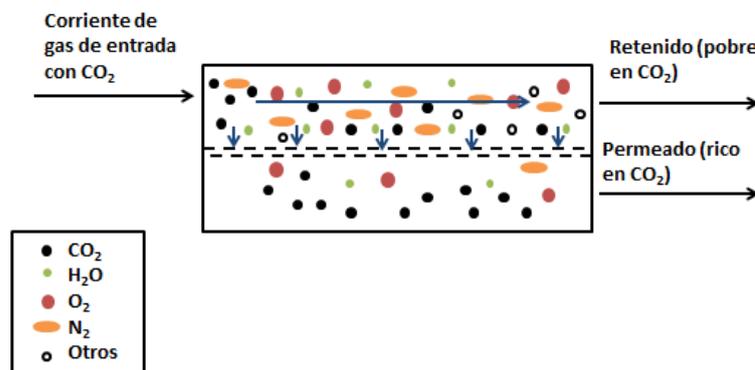
Por otro lado, se explora el potencial orientativo de instalación de un sistema de concentración solar que permite alcanzar temperaturas mayores y más cercanas a las de proceso, en la horquilla de 200-250°C, considerando para ello la posible implementación de concentradores cilindro-parabólicos a partir de una serie de datos técnicos a definir por el usuario.

#### 4. Membranas poliméricas

Dentro de los diferentes alternativas desarrolladas destinadas a abordar el problema del exceso de emisiones de gases de efecto invernadero, la tecnología de membranas destaca como una tecnología prometedora para la separación de CO<sub>2</sub>, debido, entre otras razones, a las ventajas que presenta frente a las tecnologías convencionales como la eficiencia de captura, la compactación del sistema y el respeto al medio ambiente [9], [10].

La captura de CO<sub>2</sub> mediante la tecnología de membranas se encuadra dentro del grupo de las tecnologías de post-combustión, empleadas para separación de CO<sub>2</sub> de los gases resultantes de la combustión de combustibles fósiles y biomasa. Las diferentes tecnologías empleadas en post combustión incluyen técnicas tradicionales como absorción, adsorción o destilación criogénica, además de la ya mencionada separación mediante membranas [9].

En estos sistemas, las membranas actúan como barreras semipermeables que permiten separar distintas sustancias por permeación selectiva. Actúan, por tanto, como filtros que separan uno o varios gases de una corriente de alimentación obteniendo como resultado un permeado rico en un gas concreto, CO<sub>2</sub> en este caso.



**Figura 9.** Esquema del proceso de separación de CO<sub>2</sub> de una corriente de gas mediante una membrana. Fuente: ITE

El rendimiento de esta operación viene determinado por dos propiedades fundamentalmente, la permeabilidad y la selectividad. La primera se refiere al flujo del gas a separar que atraviesa la membrana, mientras que la segunda refleja la preferencia de la membrana al paso de una especie de gas respecto a la otra [9], [11], [12].

La técnica de separación mediante tecnología de membranas es atractiva y competitiva. Es, como ya se ha indicado, una alternativa a los métodos de separación convencionales que posee una elevada eficiencia energética, es fácil de escalar y tiene un elevado ratio área- volumen. Es, además, una técnica de bajo coste.

En la actualidad, las membranas empleadas para separación de CO<sub>2</sub> pueden estar fabricadas con distintos materiales que pueden ser tanto orgánicos (polímeros) como inorgánicos (carbón, zeolitas, cerámicas o metálicas). Sin embargo, aunque estas últimas presentan mayor resistencia tanto química como térmica, presentan mayores dificultades de escalado con el consecuente aumento de precio, razón por la cual las membranas poliméricas están más extendidas comercialmente [9].

Es imprescindible, por tanto, conocer los requisitos exigidos para el empleo de estas membranas en procesos industriales con la finalidad de obtener los resultados esperados y asegurar la durabilidad de las membranas a largo plazo. La elevada permeabilidad y selectividad al CO<sub>2</sub>, la resistencia térmica y química o la resistencia a la plastificación y al envejecimiento son algunas de ellas.

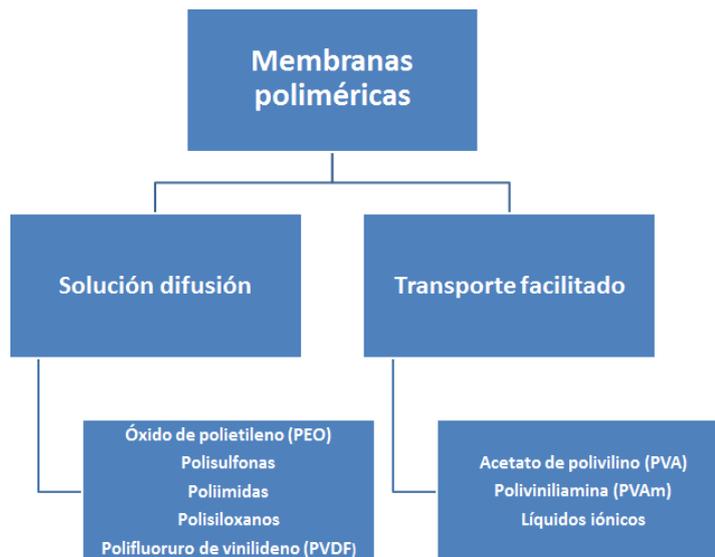
En la actualidad, los esfuerzos invertidos en la investigación y desarrollo de membranas para la captura de CO<sub>2</sub> están centrados principalmente en el diseño del material de las membranas y en la ingeniería de los sistemas en los cuales se integran.

Mientras que el objetivo principal del diseño del material de las membranas es sintetizar membranas con una permeancia y selectividad deseadas a la vez que se tienen estructuras físicamente estables, con la ingeniería de sistemas de membranas se persigue desarrollar procesos de captura por membranas con configuraciones óptimas para alcanzar de este modo los objetivos de separación con mínimo capital y costes operativos [11], [12], [13], [14], [15].

El proyecto TECEM centra sus investigaciones en el desarrollo de membranas poliméricas para la separación de CO<sub>2</sub>, ya que con este tipo de membranas es posible ajustar tanto su permeabilidad como su selectividad a través de la preparación del

polímero y la composición química mediante la adición de distintos aditivos que otorguen las propiedades finales seleccionadas como porosidad o resistencia mecánica [16].

Además, tomando como base las membranas poliméricas porosas desarrolladas es posible también fabricar membranas líquidas soportadas. En este caso, las membranas incorporan un disolvente dentro de su estructura porosa capaz de reaccionar con el CO<sub>2</sub> facilitando de este modo su eliminación de la corriente gaseosa. Al tener lugar esta reacción química mejora la selectividad de la membrana y como consecuencia de ello su efectividad de separación. Por ello, estas membranas también son conocidas como membranas facilitadoras de transporte [17].



**Figura 10.** Tipos de membranas poliméricas y mecanismos de transporte. Fuente ITE.

## 5. Conclusiones

Se estima que la transformación digital podría tener un impacto de 120.000 millones de euros para el año 2025 incrementando así sustancialmente el Valor Añadido Bruto en diferentes sectores [18]. Pese a este impacto previsto, la propia visión de asimilación de estas tecnologías por parte de las empresas es de manera general baja; así tan sólo un 38% de las empresas tiene definida una estrategia digital global, siendo este porcentaje sólo de un 10% en empresas del tipo industrial manufacturero.

En este sentido el proyecto TECEM tiene el potencial necesario para facilitar a su usuario información relativa a una serie de soluciones tecnológicas de aplicación directa a su planta industrial. Éstas abarcan el análisis de integración de sistemas de generación energética renovable, el estudio de posibilidades de recuperación de calor de proceso y minimización de pérdidas térmicas, el uso de sistemas de optimización en la gestión energética-productiva o el posible empleo de membranas poliméricas para la captación de CO<sub>2</sub>. La función de monitorización, basada en la digitalización de la información recogida y el tratamiento avanzado de dichos datos, asiste al resto de funciones al permitir conocer de manera continua el comportamiento energético de los hornos y compararlo con datos relativos a toda la planta, pudiendo así verificar los ahorros conseguidos en el caso de implantar alguna de las soluciones propuestas.

El ahorro potencial de las soluciones de monitorización e integración de soluciones de generación renovable y recuperación de calor es difícil de cuantificar, aunque en muchos de los casos la propia herramienta aporta datos calculados orientativos de inversión, ahorro y emisiones evitables. Además, la monitorización permite en sí misma que el usuario sea consciente de su consumo, lo pueda contextualizar y conozca en tiempo real el rendimiento y posible margen de mejora en la optimización energética que se plantea.

Por otro lado, el potencial de ahorro de la función de planificación de la herramienta puede conseguir ahorros en materia de costes de facturación, suponiendo un beneficio económico importante teniendo en cuenta los grandes consumos eléctricos que se producen en estas fábricas. Para el escenario planteado de producción de horno de cocción de azulejos se podrían obtener ahorros de entre un 2 y un 4%, dependiendo de la variabilidad de los consumos de los artículos y de la volatilidad del precio del mercado eléctrico. En este sentido, en próximas acciones, y para hacer operativo en tiempo real este tipo de herramientas de analítica inteligente del dato, se plantean objetivos de interconexión de la herramienta planteada con los sistemas de Control de Negocio de planificación y gestión productiva y la predicción robusta a tiempo futuro del precio de mercado.

Las membranas poliméricas desarrolladas, por su parte, permiten hacer frente al problema causado por las elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y beneficiarse de las ventajas aportadas por esta tecnología como la elevada eficiencia de operación. Para ello, se desarrollan membranas buscando un equilibrio entre las diferentes propiedades fundamentales como elevada permeabilidad y selectividad para permitir la retención de CO<sub>2</sub>, además de la durabilidad a largo plazo. Únicamente de este modo será posible emplear las membranas en un entorno de operación real.

Actualmente el proyecto se encuentra en ejecución finalizando en la fase de desarrollo y testeo, para seguir con la puesta en marcha de pilotos en entornos de laboratorio e industriales. Posteriormente se tiene como objetivo llevar el concepto a otros sectores, desarrollando nuevos módulos de análisis verticales a medida de diferentes tipologías de empresas con el fin de adaptar la herramienta a las necesidades de cada una de ellas.

## 6. Agradecimientos

El proyecto “Desarrollo de nuevas tecnologías para el análisis y la optimización energética y medioambiental del proceso de fabricación de baldosas cerámicas”, TECEM, ha sido cofinanciado por el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), dentro del Programa Operativo de la Comunitat Valenciana 2014-2020. Participando los Institutos Tecnológicos ITE, Instituto Tecnológico de la Energía, e ITC, Instituto de Tecnología Cerámica.

## 7. Referencias

- [1] MINECO (2017): “Industria Conectada 4.0”. Disponible en <http://www.industriaconectada40.gob.es>. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Gobierno de España.
- [2] Monfort, E., Mezquita, A., Vaquer, E., Mallol, G., & Gabaldón Estevan, D. (2014). La evolución energética del sector español de baldosas cerámicas. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2014, vol. 53, num. 3, p. 111-120.

- [3] Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE), «Datos Energéticos de la Comunidad Valenciana,» 2013.
- [4] A. Tamayo García y I. Urquiola García, «Concepción de un procedimiento para la planificación y control de la producción haciendo uso de herramientas matemáticas,» Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, nº 18, pp. 130 - 145, Diciembre 2014.
- [5] M. I. Pinedo, Scheduling: Theory, Algorithms and Systems (4th Edition), Springer, 2012.
- [6] L. Soriano, «Modelos de Programación Lineal para dos problemas de secuenciación con varios conjuntos de trabajos,» Escuela Técnica Superior de Ingeniería (Universidad de Sevilla), Sevilla, 2014.
- [7] Victor M. Becerra, "Solving Optimal Control Problems With State Constraints Using Nonlinear Programming and Simulation Tools", IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 47, NO. 3, AUGUST 2004
- [8] J. Löfberg, "YALMIP : A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB", In Proceedings of the CACSD Conference, 2004
- [9] Norahim, N., Yaisanga, P., Faungnawakij, K., Charinpanitkul, T., Klaysom, C. (2018) Recent Membrane Developments for CO<sub>2</sub> Separation and Capture. Chemical Engineering and Technology, 41(2), 211-223
- [10] Tong, Z., Winston Ho, W. S. (2016) Facilitated Transport Membranes for CO<sub>2</sub> Separation and Capture. Separation Science and Technology.
- [11] Leung, D. Y. C., Caramanna, G., Maroto- Valer, M. M. (2014) An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 39, 426-443
- [12] Olajire, A. A. (2010) CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end- of- pipe applications- A review. Energy, 35, 2610- 2628.
- [13] Wang, S. et al. (2016) Advances in high permeability polymer- based membrane materials for CO<sub>2</sub> separations. Energy and Environmental Science, 9, 1863-1890.
- [14] Brunetti, A., Scura, F., Barbieri, G., Drioli, E. (2010) Membrane technologies for CO<sub>2</sub> separation. Journal of Membrane Science 359, 115-125.
- [15] Belaissaoui, B., Favre, E. (2014) Membrane Separation Processes for Post-Combustion Carbon Dioxide Capture: State of the Art and Critical Overview. Oil & Gas Science and Technology- Rev. IFP Energies nouvelles, 69- 1005-1020
- [16] Khalilpour, R. et al. (2015) Membrane- based carbon capture from flue gas: a review. Journal of Cleaner Production 103, 286-300
- [17] Al Marzouqi, M. H., Abdulkarim, M. A., Marzouk, S. A., El-Naas, M. H., Hasanain, H. M. (2005) Facilitated Transport of CO<sub>2</sub> through Immobilized Liquid Membrane. Industrial and Engineering Chemistry Research 44 (24), 9277-9278.
- [18] Berger, R. (2016). España 4.0. El reto de la transformación digital de la economía.
- [19] Carrero A. y García. J. (2015): "Gestión de la eficiencia energética: cálculo de consumo, indicadores y mejora". AENOR.