

AE



AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

Metodología integral para la reducción de costes energéticos y emisiones de CO₂

Aplicación a industrias y plantas de cogeneración

En este artículo se expone la necesidad de metodologías integrales de reducción de costes energéticos en instalaciones industriales que capten todas las oportunidades de ahorro existentes y las interacciones entre ellas. Se describe una metodología que analiza sistemáticamente las mejoras en equipos, recuperación energética del proceso y la simulación de plantas de cogeneración y redes de servicios energéticos. Se presentan resultados de la aplicación de esta metodología de análisis en diversas industrias.



D. Velázquez Alonso
DVA Global Energy
Services, S.L.

**R. González,
L. Pérez Lombard**
Escuela Superior
de Ingenieros.
Universidad Sevilla

EN EL CONTEXTO ENERGÉTICO y medioambiental existente a nivel mundial, en el que es aceptado por prestigiosos organismos internacionales que ya se ha alcanzado el pico de producción de petróleo convencional y se prevé una escasez de recursos fósiles en un horizonte temporal no lejano [1], unido a la problemática medioambiental originada principalmente por las elevadas tasas de emisiones de CO₂ como consecuencia de la actividad humana [2], el uso de energías renovables y la eficiencia energética se han revelado como las principales herramientas para contribuir a una disminución efectiva de las emisiones de CO₂ [3].

En la figura 1 se observa cómo el pico del petróleo convencional se produce, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), en el entorno del año 2008. También se observa el acusado descenso que se prevé, así como la esperanza en la incorporación de nuevos yacimientos y la discutida aportación del petróleo no convencional.

Coincidente con esta situación, se prevé un aumento de la demanda energética mundial del 36% hasta el año 2035 (Fig. 2), y se considera que los precios de los hidrocarburos líquidos y gaseosos seguirán una tendencia ascendente, afirmándose taxativamente que *“la época del petróleo barato ha terminado”* [1].

La eficiencia energética es considerada por la Agencia Internacional de la Energía en su escenario azul [3], en el que las emisiones de CO₂ se reducirán en 2050 a la mitad de los niveles de 2005, como la principal herramienta contra el cambio climático, representando un potencial del 43% de la reducción de emisiones de GEI fijados en ese escenario para el año 2050 (Fig. 3).

1. Eficiencia energética industrial y reducción de emisiones de GEI

En el año 2008, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de la industria eran 12 GtCO₂ equivalentes al año. La industria era responsable del 38% del consumo de energía primaria a nivel mundial (2005) y contribuía con un 38% a las emisiones de CO₂ (10.2 GtCO₂) procedentes de uso energético, siendo las emisiones asociadas al consumo de energía la responsable del 83% de las emisiones GEI de

Figura 1
Previsiones de producción de petróleo y pico del convencional
 (Agencia Internacional de la Energía, World Energy Outlook 2010)

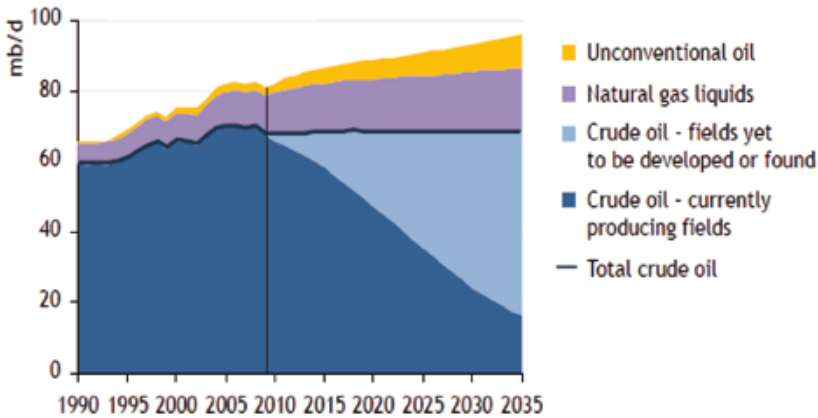


Figura 2
Previsiones de crecimiento del consumo energía primaria a nivel mundial según diversas fuentes
 (López Cardenete, JL, Unión Fenosa Redes. Junio 2007)

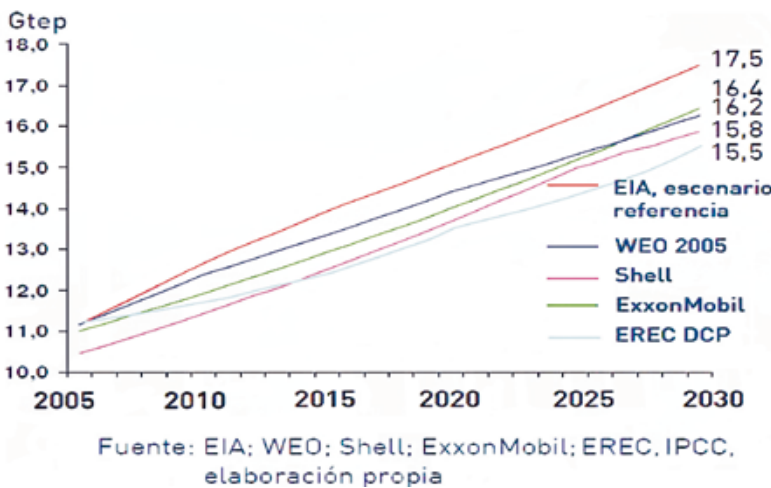
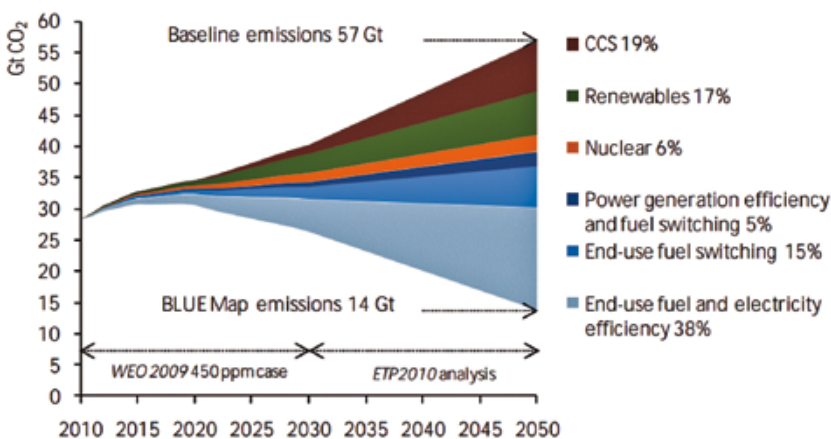


Figura 3
Perspectivas sobre tecnología energética. El papel de la eficiencia
 (AIE 2011)



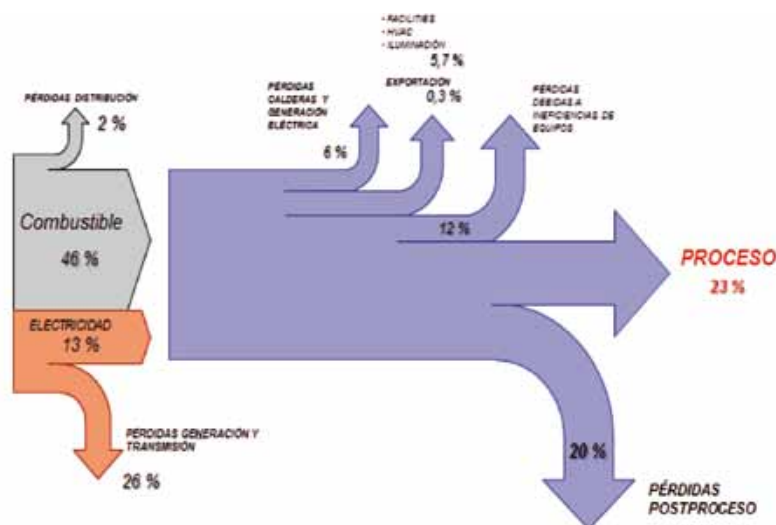
EN 2008 LAS EMISIONES DE GEI PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA ERAN 12 GtCO₂ EQUIVALENTES AL AÑO

este sector. Este consumo energético correspondía en un 49% a los países en vías de desarrollo, 40% a países desarrollados y 11% a países en transición [4].

Aunque la intensidad energética en el sector industrial ha disminuido de forma mantenida desde la crisis del petróleo de 1973 a un ratio medio anual del 1%, aún existen importantes posibilidades de reducción de aquella [4]. La AIE estima (2005) que *“la intensidad energética de la mayoría de los procesos industriales es un 50% superior al mínimo teórico”*, lo que significa una importante oportunidad para reducir el consumo energético y sus emisiones asociadas [5]. Otras fuentes consideran que existen *“potenciales de ahorro entre el 20 y 30%”*. *Entre el 50 y 60% de estos ahorros pueden ser económicamente atractivos, sin riesgos financieros”* [6].

De toda la energía primaria consumida por el sector industrial estadounidense, solamente entre el 22 y 25% es efecto útil sobre el proceso, es decir, sobre los productos fabricados. Si se considera la energía final de entrada en los recintos fabriles y no la energía primaria consumida, la eficiencia es del 30%. Es decir, las pérdidas energéticas en este caso representan el 70% de la energía de entrada (considerando unas pérdidas postproceso de igual magnitud de la útil al proceso). Estos valores demuestran el gran potencial de ahorro energético existente en el sector industrial, encontrándose las principales pérdidas asociadas a la recuperación energética del proceso, sistemas de generación térmica para calentamientos y enfriamientos de procesos (sistemas de combustión, generación de vapor, sistemas de refrigeración), cogeneración y mejoras en control de procesos [7]. En la figura 4 se expone el perfil de pérdidas de la industria estadounidense, que podría ser similar a la de otros países desarrollados.

Figura 4
Perfil de pérdidas en la industria estadounidense (DOE, 2004)



2. La cadena de transferencia energética en las industrias

El consumo energético en la industria se puede entender como una cadena de suministro claramente diferenciada en generación, distribución, transformación y transferencia al propio proceso, en la que es posible identificar las causas de las pérdidas en cada eslabón de esta cadena y las causas de ineficiencia energética.

Esta cadena se inicia con la entrada de combustibles fósiles y energía eléctrica al recinto industrial, donde previamente ya se cuantifican unas importantes pérdidas (transmisión en redes eléctricas y transformación, transporte de combustibles) que no entran en el ámbito de la eficiencia en la propia industria, salvo que la empresa opte por cogenerar, disminuyéndolas ostensiblemente. En algunas industrias se generan combustibles residuales en el propio proceso que son reutilizados para la generación térmica (licor negro en la industria papera, gases combustibles en el refinado de petróleo, etc.) y/o eléctrica. Los combustibles son utilizados en las centrales de generación térmica y/o de cogeneración, o bien se emplean directamente en las unidades del proceso, mientras la energía eléctrica generada puede ser consumida o exportada a la red. Los combustibles, energía eléctrica o fluidos caloportadores generados (vapor, aceite térmico, agua sobrecalentada, etc.) son utilizados para impulsar y transportar los fluidos de proceso y realizar las transforma-

ciones requeridas de las materias primas en los productos finales. Las pérdidas energéticas se producen en toda la cadena de transferencia: generación, distribución, conversión y las asociadas al uso posterior de energía en el propio proceso (gases a la atmósfera, vapor de baja calidad, enfriamiento de fluido de proceso), siendo éstas últimas las más cuantiosas.

En las instalaciones industriales existe una interdependencia entre los equipos generadores (térmicos, de potencia eléctrica), las redes de distribución de fluidos térmicos, la transferencia térmica en equipos de proceso (cambiadores, reactores, columnas de destilación) y el propio proceso. De esta forma, cualquier medida encaminada a reducir el consumo energético en un proceso ha de considerar esta situación y actuar de forma sistemática sobre cada una de las partes, valorando el impacto de las medidas aisladas en el conjunto del sistema energético de la fábrica. Si la metodología empleada no actuara de forma integral

sobre el ahorro energético, podría fácilmente ocurrir que las aparentes mejoras energéticas en una parte del proceso estén produciendo un impacto negativo en otras, y con ello, que el ahorro energético esperado realmente no se produzca. Esto es especialmente común en industrias con complejas redes de servicios energéticos (vapor y condensados, turbocompresores, turbinas de potencia), donde ahorros de vapor conseguidos en el proceso con repercusión en determinado nivel de presión pueden estar generando pérdidas económicas en el conjunto y no ser identificadas como tal al no disponer de herramientas que permitan captar las interacciones que se producen.

De esta forma, el rendimiento energético global de la industria se puede entender como el producto de los rendimientos de generación, transporte y transferencia, siendo aquél inferior a cualquiera de ellos:

$$\eta_{Global} = \eta_{generación} \cdot \eta_{distribución} \cdot \eta_{transferencia} < 1$$

Así, para conseguir ahorros energéticos, es necesario actuar de forma sistemática sobre los distintos puntos de la cadena de transferencia energética y disponer de una visión integral de las interacciones entre las partes (generación, distribución, transformación y transferencia), asegurando siempre la compatibilidad de proyectos, sus ahorros integrados y que los mismos garanticen la invariabilidad de las condiciones del proceso.

3. Metodología integral de ahorro energético y reducción de emisiones de CO₂

Para intentar dar una respuesta a lo anteriormente expuesto, cualquier metodología de reducción de costes energéticos y emisiones de CO₂ ha de adoptar una visión integral que valore las oportunidades de ahorro en las distintas fases de la cadena de transferencia e identifique las interacciones existentes.

La siguiente expresión expone de forma simplificada el hecho de que el consumo energético industrial se puede entender determinado por la demanda del proceso, dependiente de la tecnología y la configuración del mismo, y el rendimiento

EL PERFIL DE PÉRDIDAS DE LA INDUSTRIA ESTADOUNIDENSE ES SIMILAR A LA DE OTROS PAÍSES DESARROLLADOS

con que la energía es suministrada y transformada. De esta manera, para disminuir el consumo energético, hay que disminuir la demanda y simultáneamente incrementar el rendimiento, adaptando la oferta a la demanda:

$$C = \frac{\text{Demanda}}{\eta}$$

Se expone a continuación una metodología que ha demostrado su éxito en su aplicación a distintos sectores industriales. Esta consta de tres fases, en las que sistemáticamente se abordan mejoras en equipos grandes consumidores (mejoras de rendimiento en equipos), recuperación energética del proceso mediante *pinch point* (disminución de la demanda energética) y oportunidades ligadas a los sistemas de (co)generación y redes de servicios energéticos (adecuación de oferta y demanda e interacciones en el sistema).

En los equipos se evalúa la eficiencia energética de los grandes

ES POSIBLE IDENTIFICAR LAS CAUSAS DE LAS PÉRDIDAS EN CADA ESLABÓN DE LA CADENA INDUSTRIAL Y LAS CAUSAS DE INEFICIENCIA ENERGÉTICA

generadores y consumidores térmicos y eléctricos (calderas, hornos, secaderos, motores eléctricos, compresores, plantas frigoríficas, torres de refrigeración) para valorar las fuentes de sus ineficiencias y proponer proyectos de ahorro que mitiguen dicha situación. Estos proyectos son valorados en términos energéticos y económicos, facilitando al cliente industrial las especificaciones básicas de los equipos que puedan estar involucrados en los mismos.

En la segunda fase se optimiza la recuperación energética mediante las técnicas de *pinch point*, que evalúan de forma sistemática cuáles son las principales oportunidades de mejorar la recuperación energética del proceso con la mayor rentabilidad. Estas técnicas analizan en primera instancia el potencial de ahorro energético existente en una industria mediante recuperación energética, para posteriormente concretarlo en una serie de proyectos que, mediante nuevos cambiadores de calor, adición de área a los existentes o retrasado de tuberías para realizar transferencia entre líneas que no lo hacen, materializar los ahorros potenciales. [7]. De esta manera, el análisis *pinch* consigue minimizar el consumo de energía de un proceso y disminuir las emisiones contaminantes, eliminando cuellos de botella de origen energético mediante diseño o rediseño de las redes de intercambiadores de la industria, maximizando la recuperación energética dentro del propio proceso [8].

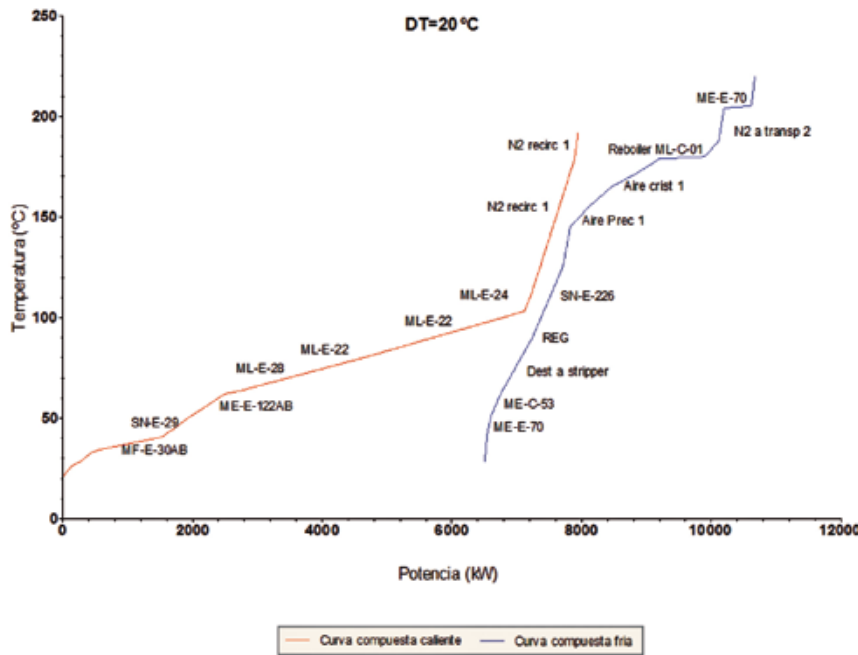
O estás al día, o no estás

Boletines electrónicos de
INGENIERÍA QUÍMICA

suscríbese en: iq.sus@rbi.es



Figura 5
Curvas compuestas optimizadas en un proceso petroquímico

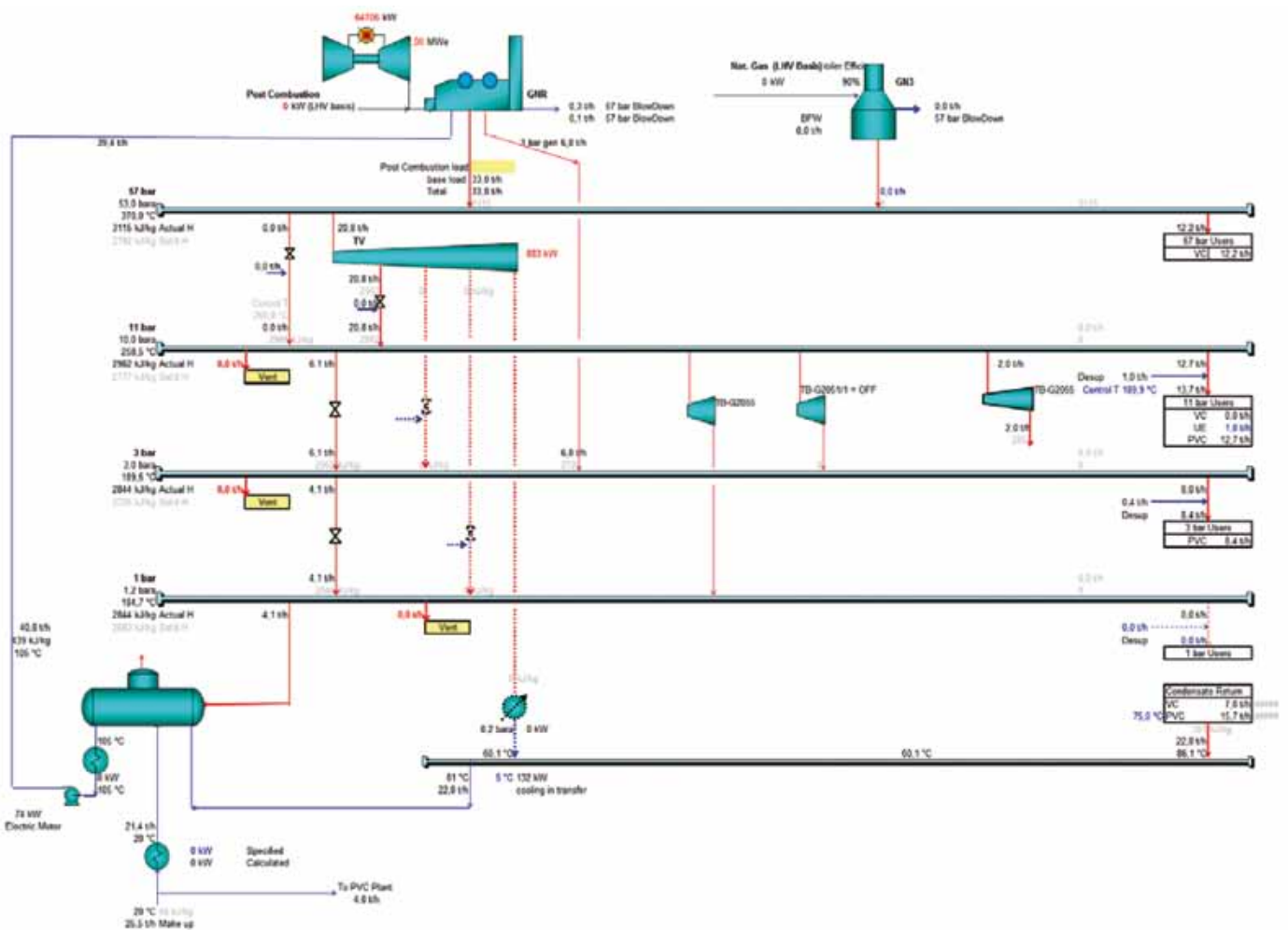


En la figura 5 se muestran las curvas compuestas optimizadas de una industria petroquímica, mostrando la recuperación energética optimizada entre las corrientes frías y calientes del proceso y el potencial de mejora de la integración energética mediante nuevos cambiadores de calor. En esta planta se detectaron ahorros por valor del 10% de la factura energética con periodos de amortización simple inferiores a un año.

El ahorro energético conseguido mediante la aplicación de estas técnicas de integración energética oscila normalmente entre el 10 y 20% de la factura energética, con periodos de amortización simple que mayoritariamente son inferiores a un año.

En la tercera fase se simulan los sistemas de (co)generación y redes de vapor y condensados para valorar de forma rigurosa el costes energético de la forma de operación existente, identificando proyectos de

Figura 6
Modelo de cogeneración y red de servicios energéticos en industria química



mejora operacional (presión en desgasificadores, maximización del retorno de condensados y su temperatura, excesiva laminación entre colectores de vapor, utilización de turbobombas en función de precios, etc), integrando los proyectos de otras áreas, lo cual aporta la visión global necesaria para valorar correctamente las medidas de ahorro propuestas. En la figura 6 se muestra un modelo desarrollado para una industria química.

4. Resultados obtenidos en industrias y plantas de cogeneración

Los estudios de eficiencia energética integral identifican, valoran y especifican normalmente entre 25 y 35 proyectos, dependiendo de eficiencia de partida de la industria. El potencial de ahorro que normalmente identifican y la rentabilidad de los proyectos se suelen encontrar entre el 10 y 25% de la factura energética de la fábrica. Este ahorro se suele materializar en proyectos de mejoras operacionales (del 3 al 5% del ahorro detectado), es decir, sin costes de inversión. Un 35% del ahorro suele corresponder a proyectos con periodos de amortización inferiores a un año y otro 30% a proyectos con *paybacks* inferiores a dos años.

TABLA 1
AHORROS CONSEGUIDOS EN PROYECTOS RECIENTES

	Nº Proyectos propuestos	Ahorro (€/Año)	% Ahorro/Factura Combustible
Cogeneración 1	4	1.245.505	7%
Cogeneración 2	4	3.310.500	11%
Cogeneración 3	5	811.000	6%
Química Básica	19	1.950.000	13%
Industria del papel	13	740.000	4%
Biocombustible biodiesel	5	228.000	19%
Petroquímica	8	392.000	9%
Agroalimentaria 1	16	392.000	27%
Agroalimentaria 2	23	262.926	17%

En la Tabla 1 se muestran ahorros correspondientes a proyectos recientemente realizados, en los que únicamente figuran los proyectos finalmente considerados viables por el cliente.

LOS AHORROS ENCONTRADOS APLICANDO ESTA METODOLOGÍA OSCILAN ENTRE EL 10 Y 25% DE LA FACTURA ENERGÉTICA

El conjunto de proyectos valorados son presentados al cliente en un horizonte temporal de 4 o 5 años, donde se consideran las decisiones estratégicas de la compañía que impacten el consumo energético (ampliación de planta, nuevas cogeneraciones, etc.) así como la interacción entre los proyectos considerados. En la tabla 2 se observan los proyectos aceptados en una industria azucarera con producción de etanol y la combinación más interesante de ellos, que arrojan ahorros anuales entre 1,5 y 2,3 millones de euros anuales. Los *paybacks* de proyectos individuales oscilan entre 0,8 y 2 años, y los combinados, entre 2 y 3,5 años.

TABLA 2
ESTRATEGIA TEMPORAL DE INVERSIONES EN UNA PLANTA DE AZÚCAR CON PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Energy Saving Project Idea	Base Case (2011 Operation)	2012 Basis: Heat Filter Juice to 118°C	Project 1: Convert Mill Drivers to Motors	Project 6: Achieve 60 Brix Thick Juice by Improving Cooking Pan Controls	Project 2: Vegetal Condensate heats Cogen Plant Water Streams	Project 5: Maximise Vegetal Condensate Juice Heating	Project 3: Atmospheric Tank Flash heats Vegetal Condensate	Project 4: Heat TG4 Condensate using Boiler Blow Down	Project 7: Achieve 10°C delta T in all Juice Vapour Heaters	Project 8: Save 1.56 MW of V1 in Alcohol Plant
Bagasse to Boiler, t/h	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00	150,00
Boiler Steam Prodn, t/h	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5	319,5
Steam to TG1 & TG2, t/h	282,0	278,8	282,8	277,4	269,3	261,3	259,2	257,7	252,1	250,2
Steam to TG4, t/h	37,5	40,6	36,7	42,1	50,2	58,2	60,2	61,8	67,3	69,3
2 bar Steam Prodn, t/h	291,2	288,0	282,8	277,4	269,3	261,3	259,2	257,7	252,1	250,2
TG1 & TG2 Power Gen, MW	37,33	36,68	48,56	47,47	45,85	44,25	43,84	43,53	42,43	42,04
TG4 Power Gen, MW	9,25	10,19	9,02	10,62	13,00	15,35	15,95	16,41	18,04	18,61
Total Power Gen, MW	46,58	46,86	57,58	58,09	58,85	59,61	59,80	59,95	60,46	60,65
Power Export, MW	36,08	36,36	38,77	39,28	40,05	40,80	40,99	41,14	41,66	41,84
Operating Cost, Mill Rs/yr	-28,81	-29,05	-30,99	-31,41	-32,02	-32,64	-32,79	-32,92	-33,34	-33,49
Cost Saving, Mill Rs/yr	0,000	0,233	1,943	0,416	0,615	0,614	0,156	0,127	0,424	0,151
Investment, k Rs				320	854	947	363	239	1055	510
Simple Payback, years				0,8	1,4	1,5	2,3	1,9	2,5	3,4
Cum Cost Saving, Mill Rs/yr	0,000	0,233	2,176	2,592	3,207	3,821	3,977	4,103	4,527	4,678

5. La gestión energética, vía para el mantenimiento de los ahorros en el tiempo

Si el estudio de optimización energética integral ha de ser el primer paso para detectar el mayor número posible de proyectos de ahorro energético, la gestión energética ha de ser su natural consecuencia y la única forma de conseguir mantener en el tiempo los ahorros energéticos detectados y descubrir con el tiempo otros nuevos que mejoren la eficiencia energética de la industria. Estos ahorros aparecen con frecuencia ligados a mejoras de las condiciones de operación y mantenimiento preventivo, y por ello con costes de inversión reducidos.

En la figura 7 se muestra la posible concatenación de estudios de mejora energética con sucesivas extinciones de los ahorros conseguidos con los proyectos implantados como consecuencia de la falta de un sistema de seguimiento, y en la de la derecha se expone la tendencia que experimentaría el consumo energético en base a la implantación de un sistema de gestión energética.

La implantación de un sistema de gestión energética tiene como pieza esencial la definición de indicadores de eficiencia energética a diferentes niveles (fábrica, plantas, grandes consumidores, etc.) y las variables de influencia clave que permitan a los operadores modificar variables operacionales con impacto en el consu-

LOS AHORROS APARECEN LIGADOS A MEJORAS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CON COSTES DE PRODUCCIÓN

mo. En este sistema es indispensable contar con referencias que sirvan de comparación a los indicadores de eficiencia y permitan comparar la situación actual de la planta con la que debería/podría tener. En el *software* que se muestra a continuación, las referencias son las de la misma planta, modeladas sobre la mejor operación pasada de la misma utilizando las técnicas de *data mining* y evitando las "injusticias" de los *benchmarking* entre plantas de distinta tecnología y obsolescencia.

En la figura 8 se muestra un *software* desarrollado por DVA Energy.

6. Conclusiones

1. La eficiencia energética es considerada por la Agencia Internacional de la Energía en su escenario azul, en el que las emisiones de

CO₂ se reducirán en 2050 a la mitad de los niveles de 2005, como la principal herramienta contra el cambio climático, representando un potencial del 43% de la reducción de emisiones de GEI fijados en ese escenario para el año 2050. La industria es responsable del 38% aproximadamente del consumo de energía primaria a nivel mundial y contribuye en un 37% a las emisiones de GEI, siendo las emisiones asociadas al consumo de energía la responsable del 83% de estas emisiones.

2. Se ha mostrado la necesidad de metodologías de ahorro energético integrales que sistemáticamente analicen todos los puntos de posibles pérdidas energéticas y que simultáneamente capten y valoren adecuadamente las interacciones entre proyectos de ahorro energético. Se ha descrito una metodología que aborda sucesivamente las mejoras en equipos, recuperación energética en el proceso y los servicios energéticos, incluyendo en la propuesta al cliente los proyectos independientemente implantados y sus ahorros acumulativos considerando las interacciones entre ellos.
3. Los ahorros encontrados aplicando esta metodología oscilan entre el 10 y 25% de la factura energética, con proyectos de alta rentabilidad y periodos de amortización simple inferiores a un año en un porcentaje elevado.

Figura 7

Evolución de los costes energéticos tras la implantación de un sistema de gestión energética

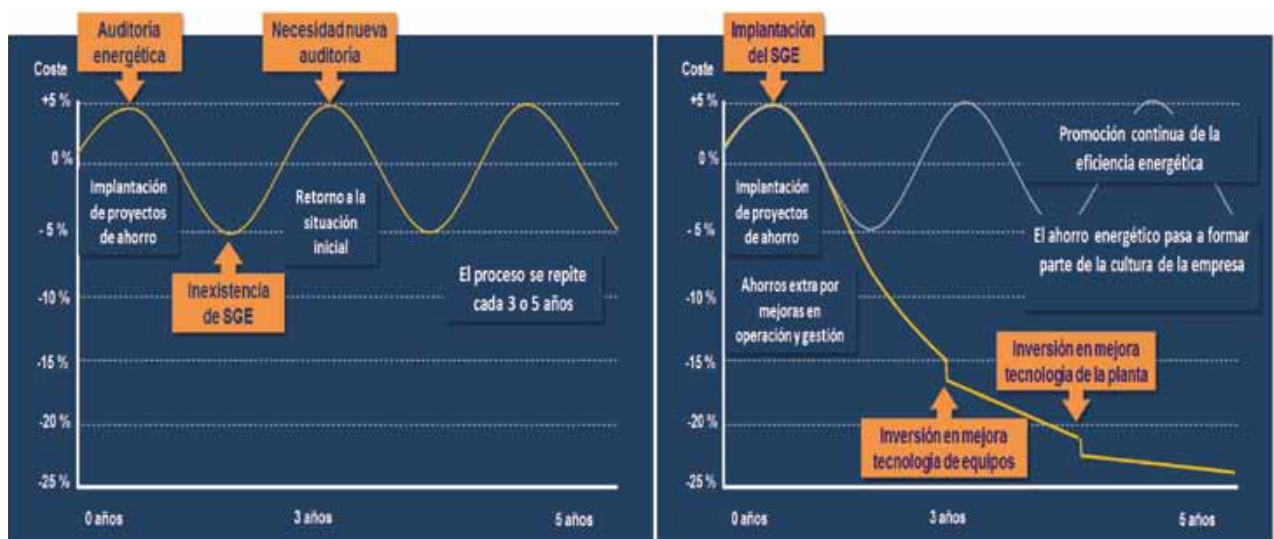
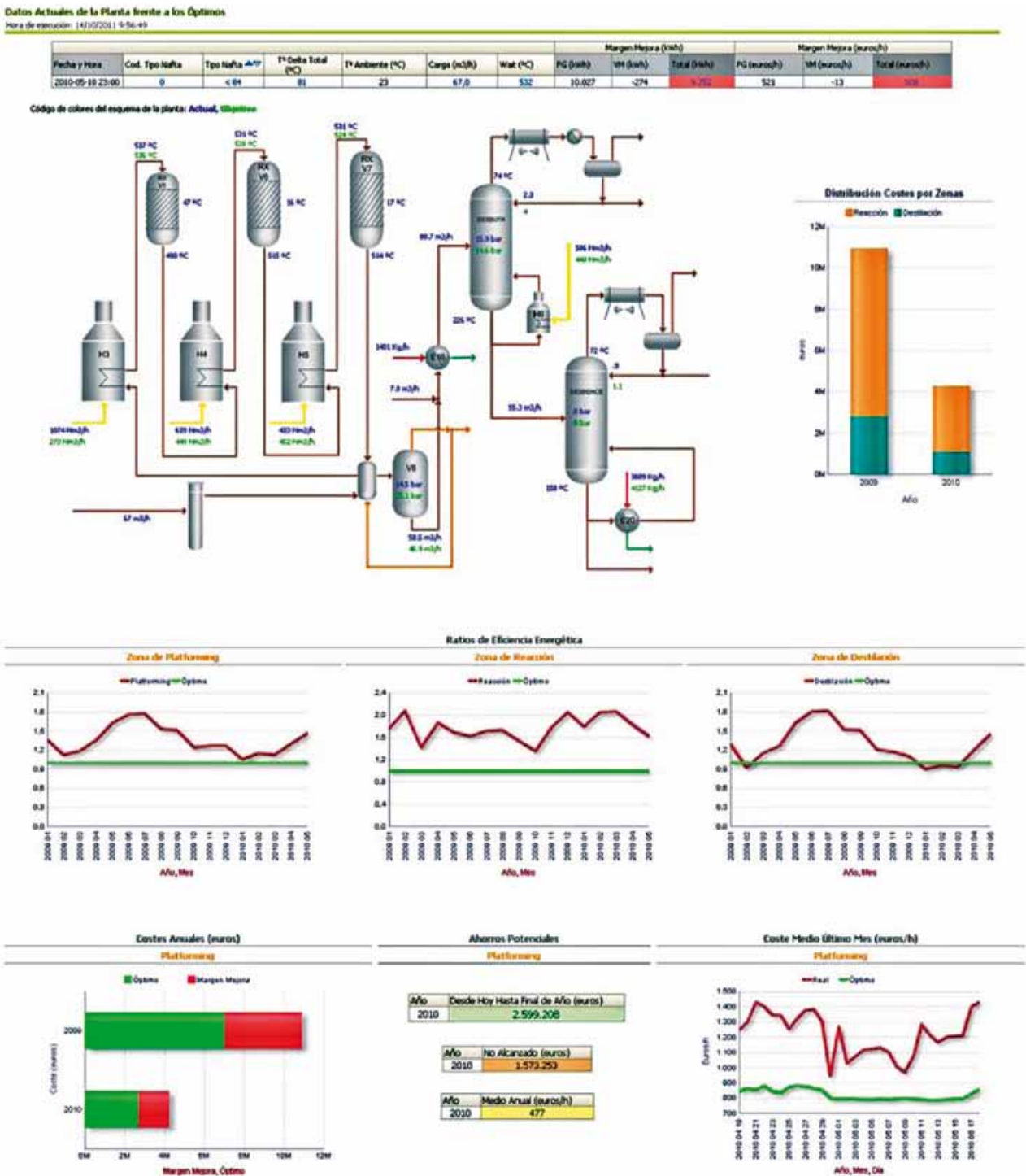


Figura 8
Software para la gestión energética industrial aplicada al reformado de naftas



4. Se ha resaltado que estos estudios integrales de reducción de costes y emisiones de CO₂ han de desembocar de forma natural en un sistema de gestión energética, que permita al industrial realizar un seguimiento diario de la eficiencia energética, actuando ante desviaciones en los indicadores de eficiencia energética de la planta.

Referencias

[1] Agencia Internacional de la Energía, World Energy Outlook 2010, Noviembre 2009.
 [2] Princiotta, F. (2007). Mitigating global climate change through power-generating technology. US Environmental Protection Agency. Chemical Engineering Progress. Noviembre 2007.
 [3] International Energy agency (2011). Energy technology perspectives: Blue map scenario. Goals, targets and assumption.
 [4] Worrell, E. Bernstein, L., Roy, J., Price, L., Harnisch, J. (2008). Industrial energy efficiency and climate change mitigation. Energy Efficiency. Nov. 2008.

[5] Agencia Internacional de la Energía, World Energy Outlook 2005.
 [6] Hydrocarbon processing. Febrero 2001.
 [7] Energy use, loss and opportunities analysis: US manufacturing and mining. US Department of energy. Energy efficiency and renewable energy industrial technology program. November 2004.
 [8] Shenoy, Uday V. (1995). Heat exchanger network optimisation by Energy and resource analysis. Gulf publishing company.
 [9] Linnhoff, B. y Vredveveld, D. R. (1984). Pinch technology has come of age. Chemical Engineering Progress 80, p. 33-40.