

IMPROVEMENT OF THE ENERGETIC EFFICIENCY OF STEELMAKING PLANTS BY THE DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED ENERGY INFORMATION SYSTEM

Rodríguez, Fernando ¹; Ortega Fernández, Francisco ¹; Gonzalez, Juan Antonio ²;
Vigil Berrocal, Miguel Ángel ¹

¹ Universidad de Oviedo, ² ArcelorMittal

The reduction of energy consumption is today of extremely large interest for the steel production. To identify possibilities of energy efficiency improvement, the availability of suitable energy consumption data is essential. Usually, these data are only available as time series without relation to products or process conditions.

This work presents progress made for the improvement of the energy balance of the factory by means of the development of an integrated energy information system that offers unprecedented prospects for the analysis of energy consumption in the steel manufacturing process.

In order to achieve this ambitious goal, it has been created an energy information database at which the energy consumption is directly assigned to the different intermediate or final products, and to connect it with the production conditions, which are stored in the quality and process databases. Based on this information, automatic procedures for different evaluation purposes have been implemented taking into account both environmental and technical aspects.

Keywords: *Sustainability; Energy efficiency; Steelmaking; Information system*

MEJORA DE LA EFICIENCIA ENÉRGICA DE INSTALACIONES SIDERÚRGICAS MEDIANTE EL DESARROLLO DE UN SISTEMA INTEGRADO DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA

La reducción en el consumo de energía es hoy en día un aspecto de vital importancia en la industria. Para identificar posibilidades de mejora de la eficiencia energética de los distintos procesos resulta esencial disponer de datos adecuados referentes al consumo de energía. Normalmente, estos datos solo están disponibles como series temporales sin relación con los productos ni las condiciones de proceso.

En este trabajo se presenta un nuevo enfoque para la mejora del balance energético de una instalación mediante el desarrollo de un sistema integrado de información energética que ofrece perspectivas sin precedentes para el análisis del consumo de energía en el proceso de fabricación de acero.

Para lograr este ambicioso objetivo se ha procedido a la creación de una base de datos con información sobre la energía, donde los consumos están directamente asociados con los diferentes productos intermedios y finales, y a correlacionarla con la información referente a las condiciones de proceso que se encuentra almacenada en las bases de datos de proceso y calidad. A partir de toda esta información se han desarrollado procesos automáticos con diferentes propósitos de evaluación teniendo en cuenta aspectos tanto técnicos como medioambientales.

El trabajo se desarrolla dentro del marco de un proyecto europeo.

Palabras clave: *Sostenibilidad; Eficiencia energética; Siderurgia; Sistemas de información*

Correspondencia: ETSIMO. c/Independencia 13. C.P. 33004. Oviedo (Asturias)

1. Introducción

Las actividades industriales están fuertemente condicionadas por las cargas energéticas. Considerando los elevados costes energéticos españoles las industrias que desarrollan actividades primarias están fuertemente condicionadas por los consumos energéticos, factor que puede mantenerlas o no dentro de la rentabilidad. Desafortunadamente si bien los consumos energéticos globales son conocidos, no es habitual en las empresas conocer, en procesos continuos, los costes energéticos reales por cada uno de los productos. Este es el caso de la industria siderúrgica donde, si bien los productos se venden por bobinas, chapas o estructuras, los procesos son masivos e incluyen varias salidas. El horno alto o las acerías son un buen ejemplo; procesos que tratan cientos de toneladas de forma conjunta mientras que al cliente se venden productos de 2 ó 3 toneladas. Pero no sólo es ese efecto de reparto de carga energética entre cada uno de los productos de salida sino que la propia dificultad del proceso repercute nuevamente en el consumo energético. Así, los productos que conllevan un mayor nivel de rechazo requieren para su producción una carga adicional por tonelada final producida. A todo esto se añade la necesidad de incluir de forma razonada en los costes los consumos energéticos de los servicios generales como alumbrado, oficinas, etc. que no están directamente ligados a la producción pero son imprescindibles para que el proceso productivo pueda realizarse.

Resulta por tanto evidente que el hecho de conocer los valores energéticos por producto en vez de por proceso sería crítico a la hora de poder realizar asignaciones de coste para los clientes y, también, para realizar valoraciones de la demanda energética por tramos horarios. Esto último es fundamental dadas las importantes variaciones que se producen en los precios de la electricidad entre los distintos periodos temporales.

Desafortunadamente, este objetivo final está lejos de alcanzarse por cuanto es necesario previamente garantizar que se recoge toda la información para cada producto, se unifica y se asigna a cada producto de cada tipo en cada momento. Estos cambios requieren el diseño de un proyecto global y complejo que permita recopilar toda la información de las distintas fuentes y centralizarla en una base de datos unificada, aspecto complejo si tenemos en cuenta que las factorías siderúrgicas son complejos industriales con decenas de instalaciones de diferentes tecnologías, superficies de varios km² de extensión y consumos energéticos mensuales del orden de GWh con miles puntos de consumo e incluso generación interna de energía durante el proceso.

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es la reducción del consumo de energía a lo largo de toda la cadena de producción de acero mediante la construcción de una base de datos de energía que englobe toda la factoría, su conexión con una base de datos con las variables de proceso y calidad, el desarrollo de herramientas de evaluación con interfaces de fácil manejo para consultar, analizar y proporcionar posibles soluciones con el fin de mejorar la eficiencia energética global. Para ello se plantean los siguientes sub-objetivos:

- Construcción de una base de datos de energía para toda la fábrica tomando como referencia los productos intermedios y finales.
- Desarrollo de soluciones/modelos para la asignación correcta del consumo de energía a cada uno de dichos productos intermedios y finales.
- Conexión de esta nueva base de datos de energía de los productos existentes con las bases de datos de proceso y calidad.

3. Estado del arte

No se han encontrado referencias sobre estudios similares enfocados a analizar la energía necesaria para la producción de los productos individuales en sectores de la industria primaria como la siderurgia. Existen algunos proyectos desarrollados por consorcios siderúrgicos europeos y financiados dentro del programa RFCS de la Unión Europea de los que puede extraerse información que ha servido de punto de partida para los trabajos que se presentan en esta comunicación.

Por ejemplo, el proyecto ENCOP (Comisión Europea 2009) se refiere al desarrollo del llamado "registro de energía" cuyo objetivo principal es la introducción y evaluación sistemática de todos los flujos de energía pertinentes (electricidad, calor, calor residual, energía de refrigeración, los combustibles fósiles, gases de proceso, etc.) en un registro único de energía. Esta información permitirá la identificación de los puntos potenciales de ahorro energético y de las instalaciones más adecuadas para la explotación del calor residual del proceso. Por tanto, el proyecto se centra en objetivos sustancialmente diferentes a los aquí propuestos, porque sólo se analizan flujos energéticos entre plantas, pero no el consumo de energía específico de determinados productos. Existen además otros proyectos europeos finalizados o en desarrollo que se centran en investigar el consumo específico de energía en las acerías, donde se pretende mejorar el control de proceso para reducir los insumos de energía.

El proyecto de investigación más importante en la actualidad dentro del sector siderúrgico europeo, denominado ULCOS (Comisión Europea 2011), se ocupa principalmente de nuevos métodos más eficientes desde diversos puntos de vista para la producción de hierro y acero. Sin embargo no aborda la monitorización en continuo de la energía y el análisis dinámico de esa información

Sí existen algunos enfoques referentes a las comparativas de los valores energéticos por producto una vez obtenidos en base al cálculo de los llamados "indicadores de ecoeficiencia". Estos indicadores se definen como cifras de impacto ambiental en relación con una categoría de impacto definida, dividido por la cantidad de producto fabricada (por ejemplo, el acero líquido). Una categoría de impacto puede ser el consumo de energía (Van Caneghem et al. 2010). Sin embargo, estos indicadores de eco-eficiencia se calculan también en un plano global sin tener en cuenta a los productos individuales.

Actualmente, la práctica más habitual para la monitorización de energía en el entorno siderúrgico es la aplicación de Sistemas de Gestión de la Energía (EMS), como por ejemplo, el EMS Siemens VAI-Simetal. Los sistemas EMS posibilitan capturar el consumo de energía de las unidades de proceso y permiten a los operadores poder controlar la energía utilizada (Hundrieser 2009). Además estos sistemas incluyen a menudo rutinas de predicción u optimización que permiten la mejora continua en el uso de la energía. Si tenemos en cuenta las tendencias en materia de normativa y legislación, el uso de estos sistemas será obligatorio en el futuro cercano. De nuevo en todos los enfoques observados los valores se refieren siempre a proceso y se restringen a los usos por separado de cada uno de ellos sin considerar los valores de pérdidas, etc., fundamentalmente por la dificultad de asignación de valores antes mencionada dadas las distintas fuentes y frecuencias de adquisición.

Otro de los instrumentos técnicos existentes para la supervisión de la energía son las auditorías energéticas. Estas auditorías incluyen la inspección y el análisis de los flujos de energía, informes del nivel de la gestión de la energía, la energía utilizada en las instalaciones y durante la producción, así como las emisiones contaminantes y las condiciones financieras. Los estudios publicados sobre este tema (Stratton 2007 y Holmes 2008) describen los diferentes aspectos y métodos de medición de energía y las acciones encaminadas al ahorro de energía. Sin embargo, las auditorías proporcionan únicamente una instantánea sobre la situación energética actual de una unidad o planta en particular, no

siendo útiles para proporcionar información continua referente al consumo de energía y, menos aún, relacionar esos consumos con los productos individuales.

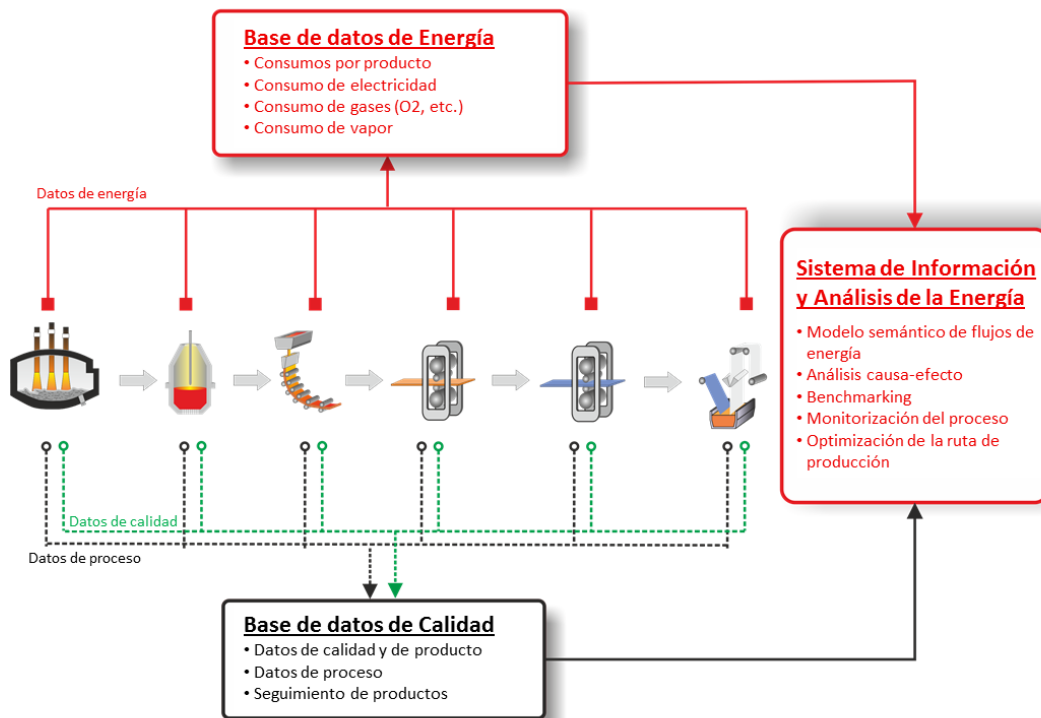
4. Metodología

El primer paso consiste en fijar los requisitos iniciales para transformar los datos medidos de consumo de energía en un formato adecuado a los propósitos del proyecto. Para ello se ha desarrollado un procedimiento general para asignar los datos de consumo de energía a los respectivos productos intermedios y finales.

El concepto desarrollado hubo de ser adaptado a las diferentes etapas del proceso siderúrgico para permitir el desarrollo de modelos que sean capaces de asignar los datos globales sobre energía medida a un único producto (por ejemplo, desbastes dentro de un horno). Dentro del marco definido en este trabajo se está desarrollando una plataforma software basada en este concepto general que podrá ser sucesivamente ampliada y ajustada para incorporar nuevas mediciones, integrar nuevos modelos de recogida de datos y refinar los datos energéticos almacenados.

Un aspecto clave para la correcta asignación de la energía es la sincronización exacta de las diferentes señales (por ejemplo, para la asignación correcta de la energía en un horno ha de conocerse el tiempo exacto que cada desbaste pasa dentro de dicho horno). Por ello se utilizaron métodos de acumulación y de interpolación de datos para lograr una correcta sincronización y una asignación individualizada de los datos de energía. Como primer enfoque se ha establecido la realización de la recopilación de datos para una ruta de producción específica para probar la aplicabilidad de los conceptos y métodos elegidos. Una vez alcanzado este objetivo, la base de datos de energía se irá ampliando gradualmente para cubrir la cadena de producción al completo.

Figura 1. Esquema general del Sistema de Información de Energía



La Figura 1 muestra el concepto general del sistema de información de energía. La primera parte es la base de datos de energía que contiene las asignaciones por producto de cualquier tipo de datos sobre el consumo energético. El sistema de información energética se basará en esta nueva base de datos de energía, aspecto básico del desarrollo que se unirá a la base de datos central de calidad que contiene todos los datos relevantes sobre productos y calidades, los datos medidos y los parámetros de proceso así como el seguimiento (tracking) de toda la información de cada material.

Dentro del sistema de información energética estos diferentes tipos de datos se han combinado para crear un conocimiento aprovechable sobre el consumo real de energía durante el proceso de fabricación del acero. De esta manera será posible ampliar una base común de conocimientos con el objetivo de definir un estándar de referencia para el consumo de energía que podrá ser mejorada paso a paso. El modelo de datos representa un marco general para el consumo de energía y la evaluación de impacto ambiental que podrá ser personalizado para cada proceso. Los resultados de los casos industriales son analizados y discutidos con expertos de producción para encontrar caminos y medios de mejora de la producción que permitan optimizar el proceso desde el punto de vista energético y medioambiental.

5. Desarrollo

Como se ha comentado anteriormente, en la actualidad la información sobre la energía se analiza principalmente desde un punto de vista temporal. Los informes se generan para analizar los consumos de energía en un período de tiempo determinado (generalmente mensual) y sólo valores medios por toneladas producidas pueden ser proporcionados. Dada los distintos niveles de automatización, no toda la información se graba con la misma frecuencia en función de los dispositivos de medición. Por lo tanto, en este momento, es imposible determinar exactamente la cantidad de energía utilizada en la fabricación de un producto final específico. En general se puede decir que:

- La información de caudales de gases y consumos energéticos es capturada por el nivel 1 de automatización básica con alta periodicidad, generalmente 0,2 segundos, pero bajo nivel de almacenamiento.
- La información global de cada instalación es almacenada en bases de datos con información de energía integrada generalmente a nivel de pieza producida en el nivel 2, si bien sólo integra datos de proceso.
- La información de los servicios auxiliares, consumos globales, etc. se gestiona desde sistemas de bases de datos corporativos o de nivel 3, mayoritariamente integrada en informes mensuales.

Dadas las distintas dinámicas resulta muy difícil realizar la asignación exacta con estas características por lo que es preciso crear nuevos sistemas. Para ello se ha desarrollado un nuevo sistema de adquisición y tratamiento unificado que integra los datos de todas ellas cruzando la información y asignándola a cada producto final.

Esta nueva aplicación, con motor *MySQL* y desarrollado totalmente en *Visual C#*, se desarrolló de acuerdo a los siguientes requisitos:

- El sistema debe ser modular y escalable para permitir ampliar sus funcionalidades a través de iteraciones futuras.
- Debe estar diseñado para integrarse y coexistir con los sistemas previamente existentes en la planta.

- La información debe ser accesible desde diferentes niveles del sistema de automatización (niveles 2 y 3).
- La base de datos debería tener una estructura de datos normalizada optimizada para la explotación (el diseño de la base de datos se crea normalizado y luego se llevan a cabo sucesiva desnormalizaciones con el fin de mejorar el rendimiento).
- El sistema final debe tener requisitos mínimos de mantenimiento.
- Las interfaces deben ser fáciles de utilizar. De esta manera, los usuarios finales no debería requerir un entrenamiento intensivo.
- El sistema debe ser tolerante a fallo, por lo tanto se requiere un cierto grado de robustez.
- La información que se incluirá en la nueva base de datos debe ser coherente. Se ha preferido tener pocos pero fiables antes que disponer de una enorme cantidad de datos inconsistentes
- El nuevo sistema debe cumplir con los estándares actuales de seguridad (control de los usuarios, políticas de copia de seguridad, etc.)

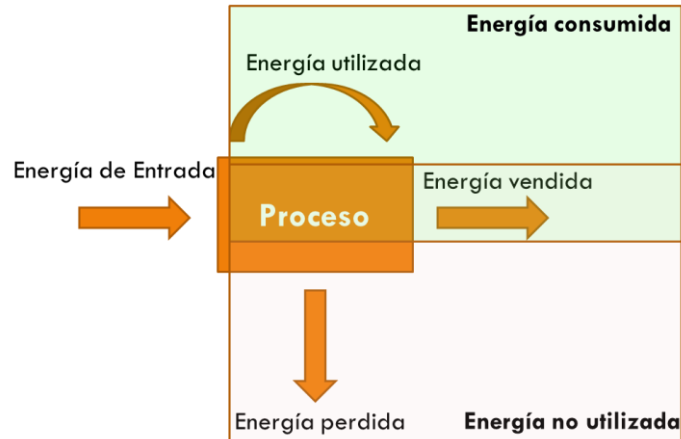
A lo largo del proceso siderúrgico se utilizan varias fuentes de energía diferentes. La Tabla 1 resume esas fuentes de energía así como las principales instalaciones donde se consumen.

Tabla 1. Principales fuentes de energía y procesos en los que se consumen

Fuente de energía	Unidades	Principales consumidores
Carbón coquizable	Tonelada	Baterías de coque
Carbón pulverizado	Tonelada	Horno alto
		Laminación en caliente
Electricidad	MWh	Laminación en frío
		Acería
		Equipos auxiliares
Gas natural	Km ³ N	Laminación en caliente
		Línea de galvanizado
Vapor	Tonelada	Baterías de coque
		Línea de decapado
		Recocido en continuo
		Horno alto
Oxígeno	Km ³ N	Convertidores
		Otros consumos internos
Propano	kg	Colada continua
		Horno alto
Argón	km ³ N	Metalurgia secundaria
Nitrógeno	km ³ N	Metalurgia secundaria
Gas de baterías de cok	Km ³ N	Baterías de coque
		Hornos de recalentamiento

Con el fin de generar toda la información se ha realizado un recorrido sobre todas las entradas y salidas de energía, de acuerdo al esquema que se muestra en la figura 2.

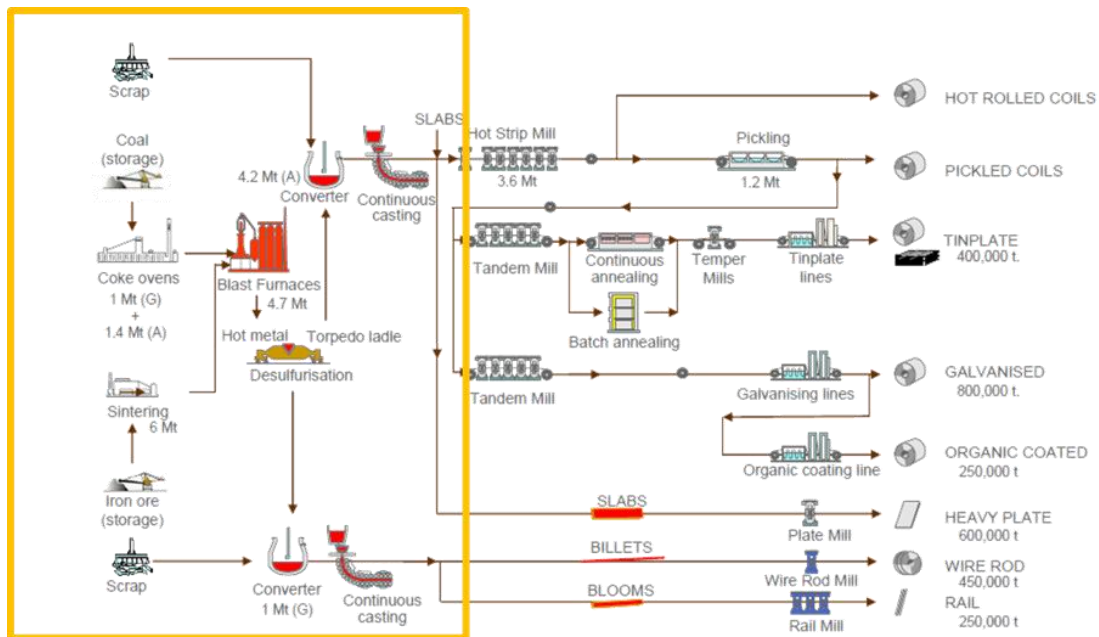
Figura 2. Balance energético de un proceso



Donde se entiende por:

- Energía de entrada: toda la energía que entra en la instalación
- Energía perdida: la energía que no se puede aprovechar para producción
- Energía utilizada: la energía que se utiliza realmente para en la instalación para producir.
- Energía vendida: La energía excedente que se vende a otras instalaciones externas.
- Energía consumida: La energía aportada menos la energía perdida, es decir, la que consumen la instalación y sus clientes.
- Energía no utilizada: La energía vendida más la energía perdida, es decir, la que no utiliza directamente la instalación.

Figura 3. Diagrama del proceso siderúrgico integral



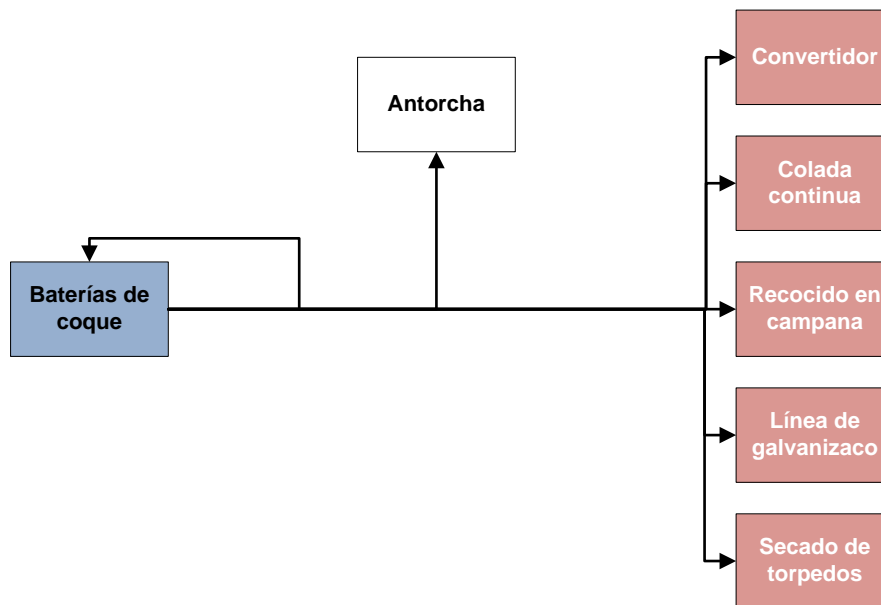
Este recorrido por las fuentes y consumos se realiza por instalación, de modo que, considerando sólo el caso del acero líquido y de acuerdo con el diagrama de proceso mostrado en la figura 3, es necesario estudiar los procesos de carga, sinter, horno alto, baterías de coque, acería y metalurgia secundaria, además de todos los procesos complementarios a estos.

De cada uno de las instalaciones se ha realizado un primer análisis global y posteriormente un análisis local, identificando las variables directas de control almacenadas o recogidas por los tres diferentes niveles de automatización.

Se debe tener en cuenta además el hecho antes comentado de que el proceso siderúrgico es uno de los pocos que plantea además la problemática de ser tanto consumidor como generador de energía. Durante el proceso se generan gases siderúrgicos de alto contenido energético en algunas instalaciones (horno alto, baterías de coque y acería) y también una gran cantidad de vapor.

La figura 4 muestra el ejemplo del gas de baterías de coque. Una parte del gas que se genera es consumida en las propias baterías, mientras que el excedente se distribuye por otras instalaciones. Finalmente, el gas sobrante una vez cubiertas todas las demandas es quemado en una antorcha.

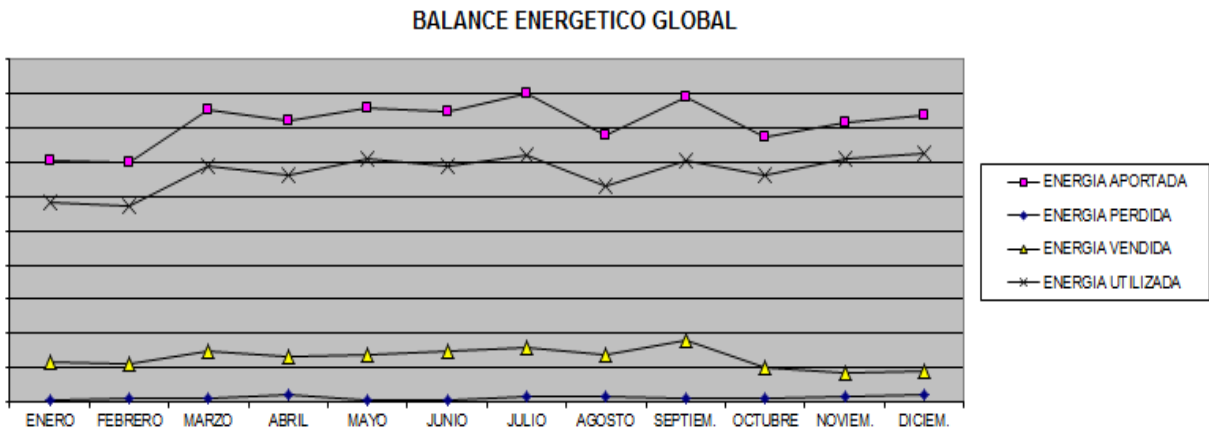
Figura 4. Flujo de gas de baterías de coque a lo largo de la instalación



Una primera implementación de este modelo de base de datos permite realizar las primeras aproximaciones a la información global de energía pero descubre una problemática existente en la simple captura de datos que es la derivada de las pérdidas energéticas y diferentes rendimientos. La figura 5 muestra los valores mensuales de las energías aportadas, perdidas, vendidas y utilizadas.

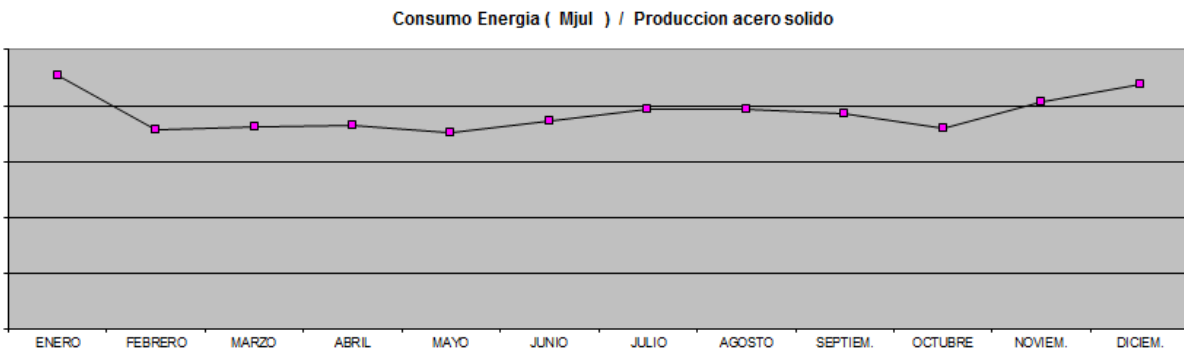
A la vista de la gráfica, si bien se observa que la energía aportada y la utilizada son en general proporcionales se aprecia que este hecho no es real si se analizan los diferentes valores de energía vendida, siempre considerando que el objetivo es minimizar la energía usada, evitando los otros usos.

Figura 5. Variación mensual de los distintos tipos de energía



Por otro lado, resulta interesante también analizar la variación del consumo de energía específico (figura 6).

Figura 6. Variación mensual del consumo de energía específico



La figura muestra claramente como hay diferentes niveles de consumo específico de energía en diferentes momentos debido fundamentalmente a dos factores: las diferentes productividades y rendimientos de los distintos grados y formatos de acero y las diferencias de coste energético en función de la carga de las instalaciones.

De hecho si se suman los valores energéticos de las instalaciones y se comparan con los valores globales de energía consumida se observa la existencia de un saco de energía de más de un 20% no directamente imputable al producto.

Por tanto, no es posible una translación directa de proceso a producto sino que fue preciso realizar diversas transformaciones, para tener en cuenta los siguientes factores:

- La energía de los servicios auxiliares
- Las pérdidas materiales y por reprocesamiento.
- Los rechazos por calidad
- Las reasignaciones de productos
- Las diferentes materias primas (por ejemplo, diferentes minerales)..
- La eficiencia de los procesos

- Los efectos de planificación y programación de la producción

Considerando todo estos factores se ha llegado a una ecuación del cálculo de la energía individual del tipo:

$$E_T = \left(\sum_n E_n + E_a(1 + \alpha_i) \right) (1 + \beta_i) + \frac{E_m}{\frac{M}{m}} \quad (1)$$

Donde:

- E_T es el consumo total de energía
- E_n es el consumo de energía en los procesos anteriores
- E_a es la energía utilizada en el proceso actual
- α_i es la pérdida de eficiencia en el proceso actual
- β_i son las pérdidas de eficiencia globales
- E_m es la energía auxiliar
- M es la producción global
- m es la producción específica

Los datos así obtenidos han sido validados con fuentes internacionales fiables, entre las que destacan los inventarios con información cuantitativa relevante dirigida a realizar evaluaciones de impacto ambiental.

Las bases de datos estándar de inventarios de ciclo de vida que han sido consultadas son:

- *EcolInvent*, desarrollado por el Centro Suizo de Inventarios de Ciclo de Vida. Los consumos de energía recogidos en esta base de datos se calculan principalmente a partir de los datos contenidos en los informes del IPCC (Prevención y Control Integrados de la Contaminación).
- *World Steel*, cuyos datos de origen se obtienen de la información aportada por las principales empresas siderúrgicas, todas ellas miembros de World Steel.
- Base de datos *GaBi*, compilada por PE International, que complementa las bases de datos anteriores con los inventarios regionales.
- Base de datos *ELCD*, elaborada por la Plataforma Europea sobre el Análisis del Ciclo de Vida, que engloba información procedente de una amplia gama de fuentes.

Por otro lado, se ha recopilado también información adicional procedente de los *BREF* (documentos de referencia sobre las *mejores técnicas disponibles*) y de estudios teóricos sobre energías mínimas necesarias para fabricar acero (U.S. Department of Energy 2000).

De esta forma es posible realizar el benchmarking entre la instalación y productos que se están analizando con respecto a los valores mínimos teóricos, prácticos, los valores medios de la industria o los valores de otras plantas.

6. Resultados

El conocimiento del consumo de energía por producto a lo largo de toda la cadena de producción es un aspecto clave para la comprensión de los procesos. El trabajo presentado en esta comunicación supone un nuevo paso en la correcta asignación de todos los consumos energéticos a los productos finales. El uso de esta información proporciona los siguientes beneficios:

- Mejora en la planificación de la producción (porque se pueden tener en cuenta aspectos energéticos).
- Mejora en la asignación de costes a cada producto individual (porque se dispone de información más detallada que los valores medios utilizados tradicionalmente)
- Mejora en el mantenimiento de la planta (porque se dispone de predicciones más fiables del consumo de energía basadas en la planificación mejorada de la producción).

La combinación de estos nuevos datos energéticos con los datos de proceso/calidad proporciona beneficios adicionales tales como:

- La información obtenida se puede utilizar para la evaluación comparativa (benchmarking) entre diferentes fábricas y/o instalaciones, proporcionando valores estándar que podrán ser utilizados para determinar la eficiencia de cada producto específico.
- La optimización energética producirá una disminución de la demanda de energía que conllevará una reducción de las emisiones de CO₂, reduciéndose también los costes asociados a los derechos de emisión.
- La optimización de los procesos con respecto al consumo de energía conducirá lógicamente a la reducción de los costes de producción.

Existen estimaciones dentro del sector siderúrgico que indican la existencia de desviaciones de un +/- 25% en el consumo de energía para la fabricación de un mismo producto. Con la información existente hasta la actualidad (consumo de energía global en el tiempo y sin conexión con la base de datos de proceso existente) resultaba imposible encontrar las causas que provocan estos comportamientos. Si se consiguen reducir estas desviaciones de manera significativa mediante las soluciones propuestas, las reducciones del consumo de energía y de los costes asociados serán de capital importancia.

Por otro lado, la asignación de la energía a los productos finales va en la línea de los requisitos que la legislación ambiental, tanto nacional como europea, está imponiendo en todos los ámbitos industriales.

7. Conclusiones

La mayoría de los enfoques publicados o utilizados hasta el momento analizan los flujos de energía y calculan el consumo de energía a nivel general, por ejemplo, dividiendo la cantidad de energía utilizada por la cantidad de los productos producidos en este momento.

No existen sin embargo referencias sobre información continua del consumo de energía relacionada con cada producto en particular. Por otro lado, el enfoque individualizado que plantea el presente trabajo, para cada producto y su demanda de energía, constituye un requisito previo fundamental para el análisis exhaustivo del consumo de energía y resulta indispensable para la identificación de las causas de diferencias en los consumos de energía durante la producción.

El sistema planteado basado en la demanda individual de energía del producto y la aplicación de metodologías de gran alcance para resolver las tareas relacionadas con la optimización y análisis causa-efecto resulta innovador y totalmente novedoso dentro del sector siderúrgico y es extrapolable a otros sectores de la actividad primaria con problemáticas similares.

Con la aproximación realizada se consigue una integración total de los datos tanto de nivel 1 como 2 y 3 y su incorporación para imputación a nivel de producto a lo largo de toda la factoría, habiéndose desarrollado para el caso del acero líquido.

Este sistema será la base de posibles mecanismos de mejora como los benchmarking de diferentes instalaciones, la fijación de nuevas categorías de precios que evolucionen incluso con los costes energéticos o las dificultades de producción y las mejoras de la eficiencia energética en general.

8. Referencias

- Comisión Europea (2009). Development of tools for reduction of energy demand and CO₂-emissions within the iron and steel industry based on energy register, CO₂-monitoring and waste heat power generation. (RFSR-CT-2009-00032). Proyecto europeo ENCOP.
- Comisión Europea (2011) Ultra-Low CO₂ steelmaking (FP6-NMP NMP-2003-3.4.5.1). Proyecto europeo ULCOS. <http://ulcos.org>
- Holmes, M.; Stafford, P. (2008). Reduction in total energy consumption at Corus Engineering Steels - a success story utilising value added technical support. *9th European Electric Steelmaking Conference, EEC 2008*, Krakow, PL.
- Hundrieser, J.; Seifert, O. (2009). Energiemonitoring als Prozess unterstützt Kosteneinsparung. *Stahl und Eisen*, 7, 18-23
- Stratton, P. (2007). An energy audit for carburizing, *Industrial Heating*, 74, nº 7, 51-54.
- U.S. Department of Energy (2000). Theoretical minimum energies to produce steel for selected conditions.
- Van Caneghema, J. et al. C. (2010). Improving eco-efficiency in the steel industry: The ArcelorMittal Gent case, *Journal of Cleaner Production*, 18, nº8, 807-814.