

METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR SUSTAINABLE STEEL PRODUCTION THROUGH AN INTELLIGENT CONTROL SYSTEM USE

Rodríguez Pérez, Fernando; Mesa Fernández, José Manuel;
Martínez Huerta, Gemma; Andrés Vizán, Sara María

Universidad de Oviedo. Area de Proyectos de Ingeniería

Steel production is involved in a continuous improvement forced by customers to enhance product quality as well as to reduce production costs. Joint with those requirements, both society and the regulators increase their pressure to reduce the environmental burdens so the decision process has necessarily to include the environmental perspective. This communication proposes the concept for an Intelligent Control System (ICS) to assist the optimization of the production process of steel in a holistic way, considering quality, economic and environmental parameters. Processes environmental evaluation are based on the definition of Key Performance Indicators (KPIs) susceptible to be managed online by the ICS and this communication is devoted to the development of a methodology for KPI selection. Then, the procedure is applied to a case study, the Hot Rolling Mill, and after its systematic application a collection of KPIs based on GHG emissions monitoring suitable to be managed automatically in real time is proposed.

Keywords: *Steel; Intelligent control system; Hot strip mill*

METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE INDICADORES DE DESEMPEÑO AMBIENTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE ACERO SOSTENIBLE MEDIANTE SISTEMAS DE CONTROL INTELIGENTE

La producción de acero se encuentra inmersa en un proceso de mejora continua forzado por sus clientes a optimizar la calidad del producto al mismo tiempo que se reducen los costes de producción. A los requerimientos previamente señalados, se le añade la presión ejercida por la sociedad y los legisladores para reducir los impactos sobre el medio, por lo que la componente medioambiental debe ser introducida necesariamente en el proceso de toma de decisiones. Esta comunicación propone el concepto de un Sistema de Control Inteligente (SCI) para asistir a la optimización de la producción de acero desde una perspectiva integral, considerando parámetros de calidad, económicos y ambientales. La evaluación ambiental del sistema se fundamenta en la definición de Indicadores de Desempeño Ambiental (KPIs) susceptibles de ser procesados en tiempo real por el SCI, estando esta comunicación centrada en el desarrollo de una metodología para su selección. Posteriormente el procedimiento es aplicado a un caso de uso, el Tren de Bandas en Caliente, y tras su recorrido sistemático se propone una colección de indicadores basados en la monitorización de emisiones de gases de efecto invernadero susceptibles de ser evaluados automáticamente en tiempo real.

Palabras clave: *Acero; Sistema de control inteligente; Tren de bandas en caliente*

1. Introducción

Actualmente, la producción de acero se ve sujeta a una creciente presión para mejorar la calidad del producto al mismo tiempo que debe reducir los costes de producción. Esto fuerza que las desviaciones en la calidad del producto deben ser detectadas lo antes posible, y por lo tanto los productores de acero deben observar y clasificar el producto a lo largo de toda la cadena de producción y tomar decisiones concernientes al uso futuro más adecuado de dicho producto, y por lo tanto a los tratamientos que el material intermedio debe seguir para alcanzarlo. Hasta la fecha, los **Sistemas de Ayuda a la Decisión (SAD)** desarrollados para la industria del acero están dirigidos a asistir a los operadores en la resolución de problemas de planificación de la producción. En (Fedáková and Marek, 2003) un SAD llamado OKO es presentado para asistir a la toma de decisiones comerciales en una planta de producción de acero basado en el sistema estadístico SAS. Otras publicaciones describen aplicaciones utilizadas en procesos específicos como (Cowling, 2003) que muestra un SAD para la planificación del Tren de Banda en Caliente o (Zhang et al. 2011) que optimiza el coste de la mezcla de mineral de hierro para el Horno Alto.

La componente ambiental es un aspecto en general ausente en los actuales SAD desarrollados para la industria del acero. Por el momento, los aspectos ambientales son tenidos en cuenta en niveles más altos de la jerarquía de decisión y se traducen en políticas de empresa destinadas a cumplir con la legislación vigente o como mucho, a establecer iniciativas de benchmarking entre distintas plantas, sin que tengan influencia en la producción de cada producto concreto. El único SAD encontrado en la literatura es el descrito en (Spengler et al. 1998), donde una combinación de modelos son aplicados en un análisis multicriterio para evaluar y clasificar las distintas alternativas para el reciclaje de polvos y lodos. Sin embargo, la producción de acero se ve cada vez más presionada para tener en cuenta los aspectos ambientales en su toma de decisiones. Por ejemplo, los certificados de emisión de CO₂ o el consumo energético unitario son en parte responsables del aumento de los precios de los productos y es previsible que en el medio plazo las decisiones tomadas durante la producción tengan que tener en cuenta dichos aspectos para producir productos de acero a un precio competitivo y con un impacto ambiental aceptable.

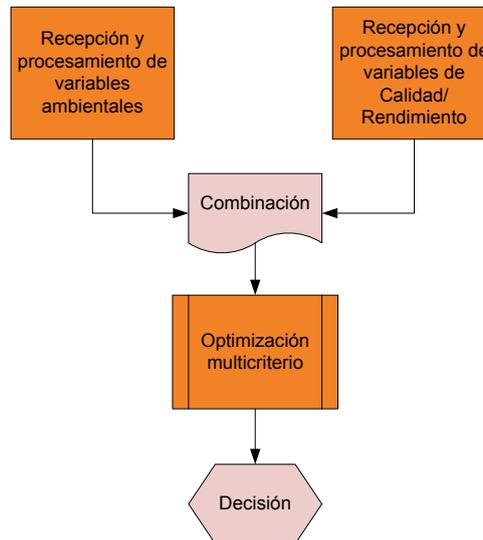
Un modo de optimizar los procesos industriales es la utilización de Sistemas de Ayuda a la Decisión de segunda generación, conocidos como **Sistemas de Control Inteligente (SCI)**, que reciben información de numerosas variables de producción en tiempo real, que automáticamente procesan y valoran de una manera integrada siguiendo reglas de decisión y/o otros sistemas de ayuda, y sirven para ajustar automáticamente la fabricación o para proporcionar al operador de planta las directrices a seguir para conseguir optimizar la producción en base a un conjunto de criterios prefijados.

Esta comunicación pretende desarrollar una metodología de selección de **Indicadores de Desempeño Ambiental** que servirían de base para la evaluación ambiental de procesos siderúrgicos, con objeto de ser integrada en un SCI para asistir en la toma de decisiones de la producción del acero conjuntamente con criterios técnicos y de mercado como la calidad del producto final y el coste de producción, al mismo tiempo que considera el impacto ambiental de la producción para tratar de minimizarlo en tiempo real.

Para contextualizar la metodología de evaluación ambiental de proceso se muestra a continuación el concepto general de un SCI que cumpliría los objetivos anteriormente propuestos (

Figura 1), para posteriormente pasar al desarrollo de ésta:

Figura 1: Concepto general del Sistema de Control Inteligente



El Sistema de Control Inteligente consta de dos módulos. Uno que valora la calidad y la productividad en base a mediciones físicas y químicas de los productos finales e intermedios analizados y que, en base a modelos predictivos establece si dicho input es adecuado para el producto final preestablecido o si por el contrario se desvía tanto por exceso como por defecto de las condiciones adecuadas. Paralelamente, el módulo ambiental evalúa el impacto que tendrá el producto final en base a una serie de datos procedentes de las variables de proceso que le llegan de forma continua.

Los resultados arrojados por ambos módulos son combinados posteriormente siguiendo una estrategia de optimización multicriterio que cumpliendo un conjunto de reglas preestablecidas decidirá si dicho input debe seguir la ruta de producción prevista, o si por el contrario debe ser reasignado a otro producto final o en el caso extremo de no llegar a unos mínimos de calidad, ser desechado. A su vez, salvo en el último caso, el SCI proporcionará al operador indicaciones de los tratamientos a seguir, así como del modo óptimo de realizarlos para que el producto llegue con la calidad requerida y con el óptimo coste e impacto ambiental.

2. Evaluación Ambiental de procesos siderúrgicos desde un Sistema de Control Inteligente

Los datos a utilizar por el Sistema de Control Inteligente para el análisis ambiental no sólo deben reflejar el estado ambiental del proceso, sino que además deben estar en un formato que permita su tratamiento automatizado, por lo que deben ser objetivos y cuantificables.

Los impactos ambientales de los sistemas son calculados por parte del SCI siguiendo la **metodología input/output**. Esta metodología es extensamente utilizada en la evaluación de impacto ambiental y está actualmente ganando mayor aceptación debido a que es muy empleada en análisis de huella de carbono y otras variantes de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Cada proceso se caracteriza por su propia evaluación ambiental donde es puntuado en función de la naturaleza e intensidad del uso de los recursos, por ejemplo electricidad consumida, así como de las emisiones y residuos generados. Cuando un producto sale de

un proceso se le asigna un set de valores que reflejan el estado ambiental de dicho proceso. Después, dicho producto intermedio pasa al siguiente proceso donde de nuevo se calculan los valores de estado ambiental que se le agregan a los que arrastra de procesos anteriores, correspondiendo dicho valor agregado con el del sistema completo.

Los Indicadores de Desempeño Ambiental o **KPIs** (del inglés *Key Performance Indicators*), presentan las características adecuadas para su uso por parte de un SCI dado que son índices dedicados a describir y monitorizar de forma numérica el desempeño ambiental de un sistema, organización o proceso. Son muy útiles en evaluación ambiental dado que miden parámetros y cantidades relevantes que simplifican realidades complejas, proporcionando información fácilmente interpretable sobre el estado ambiental de la entidad analizada (Andrés, 2005). Además, cuando la información de los KPIs es calculada y reportada periódicamente permite detectar tendencias y aplicar correcciones en caso de resultados insatisfactorios (Ministerio de Medio Ambiente, 1996). Ejemplos populares de KPIs fuera del ámbito estrictamente siderúrgico son las toneladas de CO₂ equivalentes emitidas a la atmósfera o las hectáreas de tierra dedicadas a agricultura ecológica.

3. Metodología de selección de KPIs para la evaluación de la sostenibilidad de los procesos siderúrgicos

Para asegurar que un indicador es eficiente a la hora de reflejar un estado ambiental se debe cumplir los siguientes puntos (Australian State of the Environment Committee, 2006):

- Relevante para el parámetro medido
- Entendible por todos los implicados en su uso, es decir, debe ser claro y ausente de ambigüedades
- Basado en información fiable
- Transparente y verificable en su cálculo
- Basado en condiciones específicas
- Debe representar completamente el fenómeno a estudio

Mientras que un indicador se refiere a un problema ambiental específico, los KPIs se agrupan generalmente en sets de indicadores comúnmente denominados **Sistemas de Indicadores** que representan un conjunto ordenado de problemas ambientales que conciernen a la actividad industrial concreta (MMA, 2000). Dado que la problemática ambiental normalmente es multidimensional, y por lo tanto no puede ser analizada con un solo indicador, antes de desarrollar los KPIs que serán incluidos en el SCI, se debe formalizar un sistema de indicadores para asegurar que todas las categorías relevantes son cubiertas con un número manejable de indicadores. Es buena práctica el utilizar sistemas de indicadores genéricos como punto de partida para el diseño del sistema de indicadores propio. Para el caso de la industria del acero en España, son de especial relevancia los siguientes sistemas de indicadores genéricos:

- Sistema IHOBE (Sociedad Pública Gestión Ambiental del País Vasco)
- Sistema GRI (Global Reporting Initiative)
- IISI Sustainability Indicators (World Steel)
- Sistema ITA/FEMZ (Instituto Tecnológico de Aragón)

Los sistemas de indicadores genéricos son confrontados individualmente y se comprueba cuidadosamente si cada aspecto ambiental de la producción del acero está cubierto y también se evita incurrir en duplicidades como se ejemplifica en la

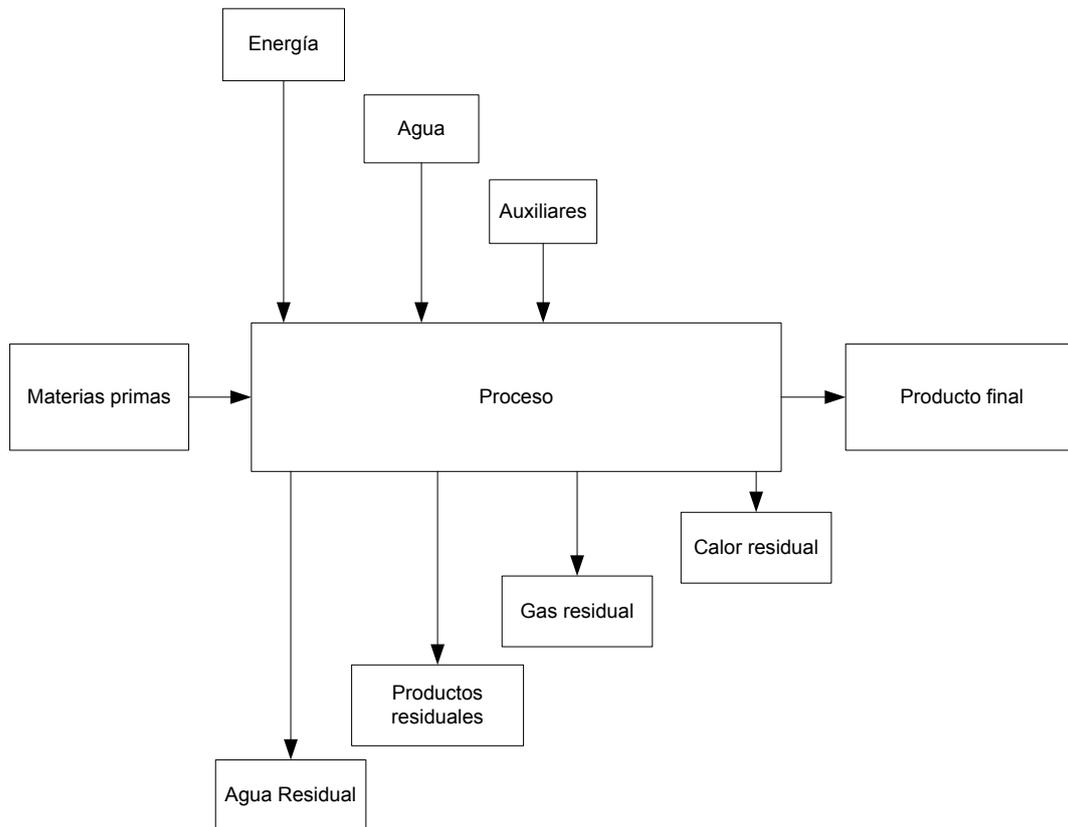
Figura 2:

Figura 2: Ejemplo de confrontación de sistemas de indicadores genéricos.

		Clasificación IHOBE/ISO/EMAS																			
		Comportamiento operacional							Comportamiento de la gestión							Estado medioambiental					
		Entrada		Equipamiento e instalaciones			Salida		Sistema				Área funcional			Comportamiento medioambiental					
		Materiales	Productos y servicios	Infraestructura	Utilización del suelo	Transporte	Productos y servicios	Residuos	Emisiones	Aplicación de políticas y programas	Conformidad	Comportamiento	Formación	Participación de los empleados	Administración y planificación	Compras e inversiones	Seguridad y Salud	Relaciones con la comunidad	Aire	Agua	Suelo
cación GRI	Económicas	Desempeño económico																			
	Ambientales	Materiales	X																		
		Agua																		X	
		Biodiversidad																			X
		Emisiones, vertidos y residuos							X	X									X		
		Productos y servicios						X	X												
Comportamiento																					

Una vez que se tiene formalizado el sistema de indicadores para la instalación en estudio se procede al estudio de todos los **flujos** de cada proceso, ya que no todas las entradas y salidas tienen una influencia significativa en el resultado final, de forma que se identifiquen todos aquellos parámetros que resulten relevantes en la evaluación ambiental y sean susceptibles de ser reflejados por indicadores. Cada proceso es caracterizado por un diagrama de flujo de masas en el que se detallan todos los inputs y outputs del proceso como es ejemplificado de forma genérica en la Figura 3:

Figura 3: Diagrama de flujo de masas genérico para procesos siderúrgicos.



Una vez todos los flujos son conocidos, se procede a cribar aquellos parámetros que no van a tener una influencia significativa en la evaluación ambiental del proceso. Dicho cribado no suele ser una tarea evidente y es esperable que a menudo exija la modelización de impacto de todo el proceso para ver cuáles son los flujos significativos. Dicha modelización se puede realizar con las metodologías habitualmente utilizadas en Análisis de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) entre las que se destacan:

- ReCiPe
- IMPACT 2002
- USEtox
- TRACI

Tras el análisis de la contribución de cada flujo del proceso se establecen los más relevantes y se formaliza su estructura, fórmula de cálculo, unidades de medida, unidad funcional a la que debe ser referida, y periodicidad de cálculo

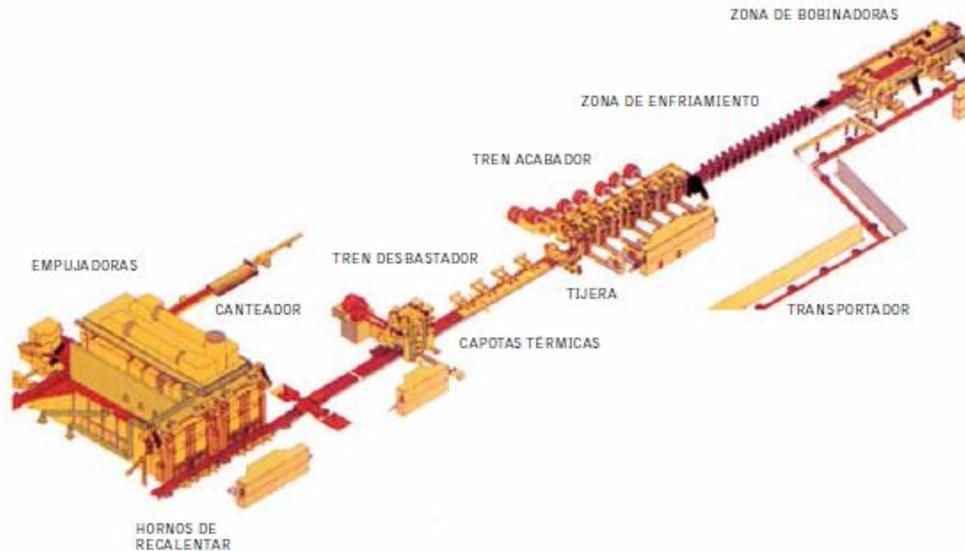
4. Aplicación a un caso particular

A continuación se procede a mostrar la metodología anteriormente desarrollada a través de un caso de aplicación, la producción de bobinas de acero en el Tren de Bandas en Caliente (TBC).

El TBC transforma los slabs o desbastes planos procedentes de la colada continua en bobinas de chapa de ancho y espesor determinados por las especificaciones del cliente. El espesor del slab es aproximadamente de 220-250mm, mientras que tras pasar por el tren de bandas en caliente, la chapa alcanza un espesor de 1.5-2.0mm.

La Figura 4 muestra la distribución de un TBC tipo de la siderurgia integral:

Figura 4: Esquema de un tren de bandas en caliente (Arcelor Mittal, 2007).



Las principales partes de las que se compone un TBC son los hornos de recalentamiento, donde se eleva la temperatura del slab, el tren desbastador que realiza la doble función de tratamiento de la cascarilla (rotura y eliminación) y laminación del desbaste hasta obtener planchas de espesor intermedio entre el slab y la chapa final (chaponos). Posteriormente es enviada al tren acabador donde una vez despuntado se reducirá su espesor hasta el deseado para la bobina caliente. Finalmente, se envía la chapa ya fina a la zona de bobinadoras donde es enhebrada.

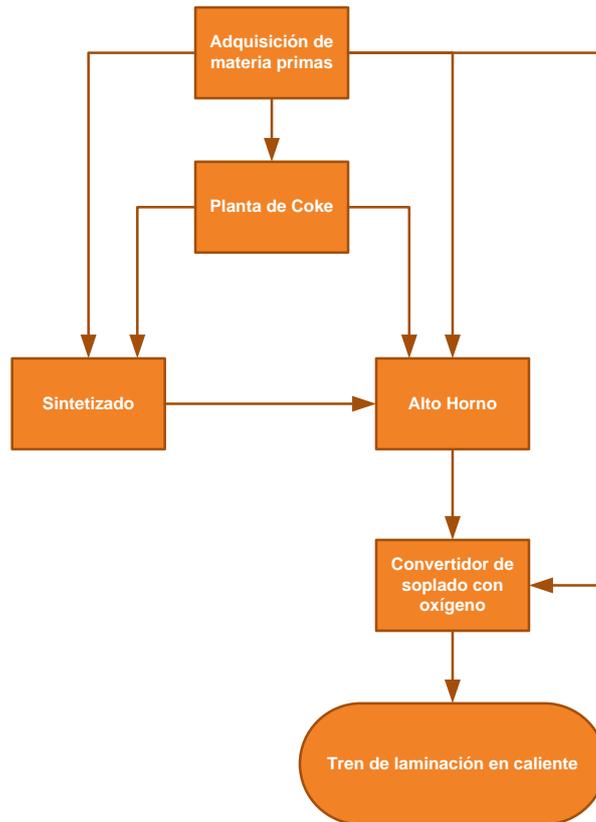
Las implicaciones ambientales de un producto intermedio o final no pueden ser evaluadas de forma aislada para el proceso que las genera, sino que deben ser tratadas de una manera holística dado que aspectos tales como por ejemplo el origen y las rutas de producción tomadas por las materias primas tienen gran influencia en el impacto ambiental del producto final. Sin embargo, aunque la metodología presentada en el apartado anterior es aplicable para toda la siderurgia integral, el proceso de toma y análisis de datos para todo el proceso siderúrgico conllevaría una gran cantidad de tiempo y recursos que no se justificarían para la implementación del SCI en una sola instalación aislada, por lo que en este caso se ha optado por realizar el análisis en dos niveles de detalle:

- Por un lado, todas las rutas que el producto puede tomar en cabecera se han realizado de una manera más grosera a partir de datos históricos de planta y de bases de datos.
- A su vez, la evaluación en el TBC se realiza en mayor detalle considerando todas las opciones posibles que tanto a nivel de operador como de gestión pueden ser tomadas.

4.1 Modelización del proceso de cabecera

Figura 5 ilustra el proceso de la evaluación ambiental grosera del proceso de cabecera antes de llegar al Tren de Bandas en caliente.

Figura 5: Diagrama de flujo de la siderurgia integral hasta el TBC.

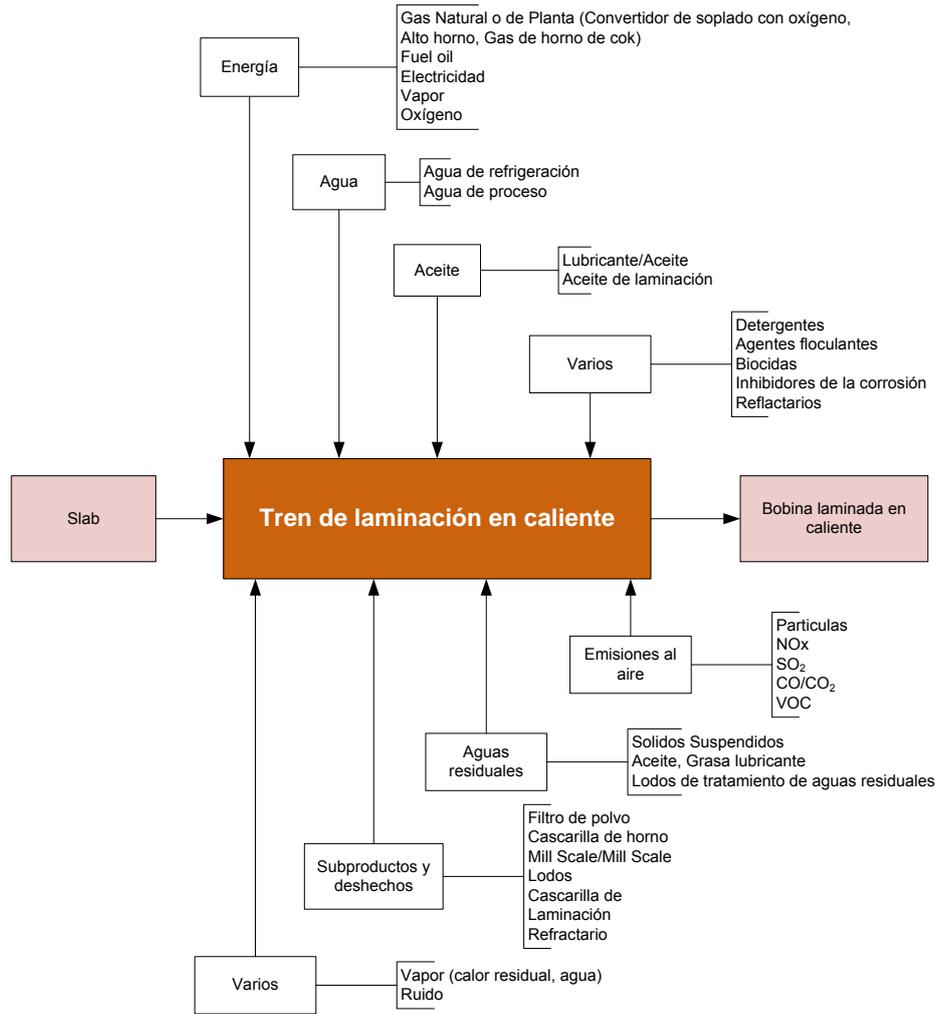


Como puede observarse en la Figura 5, todas las materias primas son extraídas y transportadas a la factoría ya arrastrando una carga ambiental que refleja su origen y la tecnología minera utilizada para su extracción, así como la distancia y medios de transporte empleados para traerlos hasta la planta. Después, los finos de mineral de hierro son procesados en el Sínter usando coke que ha sido o bien producido a partir de carbón en la propia Planta de Coke o importado, saliendo de dicho proceso arrastrando una cierta carga ambiental. El material sinterizado se envía al Horno Alto donde es procesado junto con otras materias primas y más coke para producir arrabio cuyo impacto es calculado y agregado al que ya traen los inputs de este proceso. Después, el arrabio es enviado al convertidor para producir acero que mediante la colada continua deja la instalación en forma de slab. De ese modo, la producción de bobinas en el TBC tiene los slabs como principal materia prima que ya traen una carga ambiental que ha sido calculada en base a la ruta de producción, los recursos consumidos y las emisiones y residuos generados.

Con objeto de modelizar el desempeño ambiental de todas las posibles combinaciones del tratamiento de la chapa que pueden tener lugar en el TBC, el análisis input/output de la instalación se realiza de una forma exhaustiva. A tal efecto, se evalúa la influencia de cada uno de los parámetros ambientales que intervienen en el proceso para determinar cuáles deben ser reflejados en el sistema de indicadores evaluador y cuáles deben no ser tenidos en cuenta por no tener suficiente significancia.

A continuación, Figura 6 muestra un diagrama de todos los flujos de entrada y salida del proceso del TBC susceptibles de ser considerados para la evaluación ambiental:

Figura 6: Diagrama de flujo del TBC.



A partir del concepto anterior, se extraen los inputs y outputs cuantificables que son utilizados para la evaluación ambiental del TBC en la Tabla 1:

Tabla 1: Inputs y outputs de la instalación del TBC

TREN DE BANDAS EN CALIENTE			
ENTRADAS		SALIDAS	
Horno recalentador			
Energía	GJ/t acero laminado (a.l.)	Polvo	g/t a.l.
Agua de refrigeración	0 (circuito cerrado)	NOx	g/t a.l.
		SO2	g/t a.l.
		CO	g/t a.l.
		CO2	g/t a.l.
		Hidrocarburo	g/t a.l.
		Cascarilla de horno	kg/t a.l.
Descascarillado			
Agua residual	m3/t acero laminado (a.l.)	Agua residual	m3/t a.l.

Energía	kWh/t acero laminado (a.l.)	Libre de aceite	kg/t a.l.
		Cascarilla con restos de aceite	kg/t a.l.
Laminación y lubricación			
Agua	m3/t acero laminado (a.l.)	Partículas	g/t a.l.
Energía	kWh/t acero laminado (a.l.)	Filtro de polvo	g/t a.l.
		Emisiones fugitivas de aceite	despreciable
		Agua residual	m3/t a.l.
		Lodo	m3/t a.l.
		Subproductos metálicos (recortes, deshechos,...)	kg/t a.l.
Planta de tratamiento de aguas residuales			
Agua de proceso	m3/t acero laminado (a.l.)	Agua de descarga	
Agentes floculantes	kg/t acero laminado (a.l.)	Total de sólidos suspendidos	g/t a.l.
Otros	kg/t acero laminado (a.l.)	Demanda química de oxígeno	g/t a.l.
		Contenido en hidrocarburo	g/t a.l.
		Tratamiento de lodos de aguas residuales	kg/t a.l.

4.2 Selección de los KPIs para la evaluación ambiental del Tren de Bandas en Caliente

La definición de una Unidad Funcional (UF), es decir, aquella magnitud a la que se refieren todos los indicadores es un paso previo a la definición de éstos. Para el caso del TBC se barajarían dos opciones:

- Tonelada de acero en forma de slab al entrar al TBC
- Tonelada de bobina producida que deja el TBC

Dado que el proceso de desbaste conlleva pérdidas de material hasta alcanzar el producto final, se decidió optar por Tonelada de bobina como UF. Esta perspectiva finalista para la elección de la UF es habitual en los análisis Input/Output.

Comparaciones con bases de datos de impacto ambiental específicas para el sector del acero muestran que el impacto ambiental de la mayoría de los parámetros mostrados en la Tabla 1 es insignificante comparado con el que se produce previamente en los procesos de cabecera (IISI, 2000). El único parámetro en el que el TBC tiene una contribución importante en el desempeño ambiental del producto final son las **emisiones de gases de efecto invernadero**, debidas principalmente al consumo energético, como muestra la Tabla 2:

Tabla 2: Emisiones de CO₂ para cada etapa de la producción de bobina laminada en caliente (Fruehan et al., 2000)

Proceso	CO ₂ (kg/tonelada de producto)	CO ₂ (%)
Arrabio	1500	82,4
Acero líquido	200	11,0
Laminación en caliente	120	6,6
Bobina laminada en	1820	100,0

caliente

El recalentamiento de los slabs y la reducción del espesor de las chapas son los procesos que consumen mayor cantidad de energía en el TBC, siendo el primero el más intensivo en consumo debido a que el límite de elasticidad de la chapa es bajo a altas temperaturas.

Otro gran consumidor de energía en el TBC que no está considerado en la Tabla 2 son las **pérdidas de productividad material**, cuya consideración en la evaluación ambiental sería conveniente. Algunas formas de pérdida de material han sido ya tenidas en cuenta durante el cómputo del consumo energético como ocurre cuando, por ejemplo, durante el laminado en caliente el metal que está siendo procesado se enfría y debe ser recalentado o deformado a más bajas temperaturas, lo que eleva el consumo energético. Sin embargo, a parte de algunas excepciones, este fenómeno no es tenido en cuenta dado que es difícilmente cuantificable, por lo que tampoco puede ser incluido dentro del SCI. Mucho más significativo es la **pérdida de Fe²⁺** en los diferentes estadios de la producción, debido a que durante toda la siderurgia integral hay cuantiosas pérdidas por causa de errores de proceso, oxidaciones, formación de polvo, etc., y su efecto en las emisiones depende de en qué punto se producen las pérdidas y de cuánta energía ha sido malgastada durante la producción hasta llegar a dicho punto. Por ejemplo, el Fe²⁺ que es perdido durante el laminado es normalmente refundido, incrementándose las emisiones alrededor de 2.3kg CO₂/tonelada acero por cada 1% de pérdida (en peso) de Fe²⁺. Sin embargo, la merma de material ocurre a menudo posteriormente en el proceso cuando aun más energía adicional ha sido invertida en el acero. Si el slab debe ser recalentado y laminado en caliente, la chatarra generada resulta en un incremento de 5.9kgCO₂/t. Si el hierro se oxida o no es recuperado, la energía invertida en el acero también es perdida. Unas pérdidas del 1% aplicadas a los casos de producción más probables representan una pérdida adicional de 1.4kg CO₂/t en energía de fusión en el convertidor. Tabla 3 muestra una estimación de kg de CO₂ extra emitidos a la atmósfera debido a las pérdidas de material en diversos puntos del proceso siderúrgico:

Tabla 3: Estimación de incremento de emisiones de CO₂ por pérdidas de material (Fruehan et al., 2000)

Proceso	Tipo de pérdida	CO ₂ (kg/t)
Arrabio	Arrabio perdido para desbaste pero recuperado	1.6
Arrabio	Arrabio perdido para desbaste pero recuperado	11.6
Convertidor de soplado con oxígeno	Fe vaporizado para polvo	2.6
Convertidor de soplado con oxígeno	Fe vaporizado para polvo	2.8
Laminación en caliente	Fe perdido y recuperado	2.3
Laminación en frío	Calentamiento para el laminación en caliente pero recuperado	5.9

De lo anteriormente expuesto se extrae que los factores más relevantes a tener en cuenta a la hora de valorar el desempeño ambiental del TBC son los relativos al consumo energético y a las pérdidas de material, ya que condicionan las emisiones de gases de efecto invernadero durante el proceso. Por lo tanto, los KPIs seleccionados para la evaluación ambiental del TBC son mostrados en la Tabla 4:

Tabla 4: KPIs seleccionados para la evaluación ambiental del TBC

Nombre	Formula	Unidad
Uso de materiales	$100 \cdot \text{Toneladas de desbaste} / \text{toneladas de bobina}$	%
Fe recuperado	$100 \cdot \text{Kg Fe recuperados} / \text{kg Fe perdidos}$	%
Emisiones totales CO ₂	$\text{Kg CO}_2 / \text{toneladas de bobina}$	kg/t
Emisiones CO ₂ por reducción en espesor	$\text{kg CO}_2(\text{fuerzas}) / \text{toneladas de bobina}$	kg/t
Emisiones CO ₂ por recalentamiento de slabs	$\text{kg CO}_2(\text{calentamiento}) / \text{toneladas de bobina}$	kg/t

Dado que los valores de emisión no son medibles directamente, la evaluación ambiental se realizaría a través de la monitorización on-line de los consumos energéticos de la maquinaria implicada, cuyas equivalencias con las emisiones de CO₂ se calculan a partir de los datos mostrados en la Tabla 5:

Tabla 5: Factores de emisión de las diferentes fuentes de energía para el TBC (Fruehan et al., 2000)

Fuente del combustible	Factor de emisión (kg CO ₂ /MJ)
Cok	0.109
Gas natural	0.050
Hidrógeno	0
Electricidad	0.173
Gas de horno de cok	0.046

5. Conclusiones

Los procesos industriales y en concreto el siderúrgico, deben tratar con mayor ahinco el aumentar su productividad al mismo tiempo que se minimice el impacto ambiental. Una manera de reducir dicho impacto es la inclusión de la componente ambiental en los sistemas de asistencia a la producción para que variables de fabricación, calidad o económicas no sean los únicos factores de decisión en cada paso de la cadena de producción.

A lo largo de esta comunicación se ha mostrado una metodología estructurada de selección de Indicadores de Desempeño Ambiental (KPIs) que sirven como fundamento para la evaluación ambiental automatizada en los procesos siderúrgicos. También, se ilustra el proceso de formalización de los sistemas de indicadores, de caracterización ambiental de los procesos, y de discriminación de los parámetros más relevantes para finalmente aplicar la metodología al caso concreto del Tren de Bandas en Caliente, resaltando cómo no todos los flujos implicados son suficientemente significativos como para merecer el esfuerzo de su definición, proceso y mantenimiento.

6. Referencias

- Andrés Payán, Ana (2005): *Punto focal de residuos del observatorio de sostenibilidad de Cantabria. Informe II. Aplicación de indicadores ambientales del área de residuos Punto focal de residuos de Cantabria (PFR)*. Grupo DEPRO, Desarrollo de Procesos Químicos y Control de contaminantes. Gobierno de Cantabria. Consejería de Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Química y Química Inorgánica
- Arcelor Mittal (2007): *El proceso Siderúrgico*. Arcelor Mittal Asturias. Oviedo
- Australian State of the Environment Committee (2006): *Environmental indicators for reporting*. Department of the Environment and Heritage 2006, Camberra
- Cowling P. (2003). A flexible decision support system for steel hot rolling mill scheduling. *Computers & Industrial Engineering* 45 307–321
- Fedáková D.& Marek P.(2003). Application of Production Controlling and Decision-Making System in U.S. STEEL Košice, s. r. o. – OKO. *5th International Metallurgical Conference on Continuous Casting of Billets and Modelling of Steelmaking Processes*, 21 - 23 October, Czech Republic.
- Fruehan, R.J., Fortini, O., Paxton & H.W., Brindle, R. (2000): *Theoretical Minimum Energies To Produce Steel for Selected Conditions*. Carnegy Mellon University. Pittsburgh
- International Iron and Steel Institute-IISI (2000): *IISI Life Cycle Inventory Study for Steel Industry Products*. World Steel. Brussels.
- Ministerio de Medio Ambiente (1996): *Indicadores Ambientales. Una propuesta para España*. Edita: Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. 1996
- Ministerio de Medio Ambiente (2000): *Indicadores ambientales. Una propuesta para España*. Monografías. Madrid..
- Spengler T., Geldermann J., Hthre S., Sieverdingbeck A. & Rentz O (1998): Development of a multiple criteria based decision support system for environmental assessment of recycling measures in the iron and steel making industry. *Journal of Cleaner Production* 6. 37-52.
- Zhang, R., Lu J, & Zhang G (2011). A knowledge-based multi-role decision support system for ore blending cost optimization of blast furnaces *European Journal of Operational Research* 215, 194-203.