

METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD REFERENTES A EMISIONES DE GEI

Jesús Laine Cuervo ⁽¹⁾

Valeriano Álvarez Cabal ⁽¹⁾

Francisco Javier De Cos Juez ⁽¹⁾

Juan Antonio Rodríguez González ⁽¹⁾

⁽¹⁾Área de proyectos de Ingeniería – Universidad de Oviedo.

Abstract

Greenhouse gas emissions are one of the most important worldwide environmental problems nowadays, which emphasizes the importance of an improvement in the production processes in order to reduce those emissions as possible.

To achieve that goal a general methodology applicable to all industrial sectors is proposed, which allows detection of the key areas for the improvement regarding the reduction of greenhouse emissions.

That methodology basically has five steps, which should be applied to each process in the process tree of the product

Evaluation of the minimum theoretical values for the industrial activity.

Search of the minimum practical values obtained in the industrial activity and the techniques used to achieve them

Determination of Practical minimum emissions

Estimation of the average emission values for the industrial sector studied.

Once all this data is collected the key areas for improvement in the production process are determined, focusing on the difference between practical minimum and actual emission.

The study includes two use cases.

Keywords: *emissions; gases; greenhouse; environment; CO2; sustainability*

Resumen

La emisión de gases de efecto invernadero configura una de las mayores preocupaciones a nivel mundial en la actualidad, lo que acentúa la necesidad de una mejora de los procesos productivos para su reducción.

Para lograr dicho objetivo se propone una metodología integral aplicable a cualquier sector industrial que permita la detección de los puntos clave en emisiones GEI.

Dicha metodología consta básicamente de cinco etapas que deben aplicarse a cada uno de los procesos presentes en el ciclo de producción

Evaluación de los valores mínimos teóricos de emisión necesarios para llevar a cabo la actividad

Búsqueda de información sobre los valores mínimos de emisión a nivel práctico obtenidos en la actualidad.

Evaluación de las emisiones mínimas a nivel práctico obtenibles

Obtención de los valores medios de emisión en el sector.

Una vez obtenidos estos datos se determinan los puntos clave de mejora de las instalaciones como aquellos en los que exista una mayor diferencia entre sus emisiones mínimas prácticas y actuales, lo que permitirá a las empresas del sector focalizar sus esfuerzos en aquellos aspectos en los que se obtengan resultados más notables.

El trabajo se complementa con dos casos de uso.

Palabras clave: emisiones; gases; invernadero; medioambiente; CO₂; sostenibilidad

1.-Introducción

Se define gas de efecto invernadero como aquel que se encuentra presente en la atmósfera y que absorbe y emite radiación a unas longitudes de onda determinadas, dentro del espectro de la energía térmica emitida por la radiación de la superficie terrestre. Pueden ser de origen natural o antropogénico y debido a esas propiedades de radiación, son los causantes del efecto invernadero (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] 2008)

La concentración atmosférica de estos gases (CO₂, CH₄, N₂O, H₂O etc) se ha disparado desde la revolución industrial hasta nuestros días, y siguen aumentando en torno al 1% cada año (IPCC 2001). Si la concentración continua con esta tendencia, se estima que se producirá un aumento de temperatura de 1°C en el 2025 aproximadamente y de 3°C al final de siglo. (IPCC 2001)

Es por eso que resulta imperativo reducir dicho crecimiento de emisiones para poder frenar de forma efectiva el proceso de cambio climático. No obstante es evidente que existe una limitación de los recursos disponibles para hacer esta adaptación manteniendo la viabilidad económica de la producción del bien. Por ello es preciso establecer sistemas que permitan analizar los posibles puntos de mejora existentes, priorizando aquellos sobre los que una actuación proporcione una mejora más significativa.

Con ese objetivo se diseña una metodología basada en análisis del rango existente entre las emisiones mínimas prácticas alcanzables y las emisiones actuales de la fabricación de un producto, que permita la toma de decisiones objetivas sobre qué elementos del proceso deben ser mejorados en primer lugar para obtener una mayor disminución de estas emisiones.

Una parte de la metodología se basa en los documentos publicados por Energetics, Inc. para el Departamento de Energía de los EE.UU. sobre lo que se denomina "Energy Bandwidth" o Intervalo energético, que describe los niveles de consumo energético para diferentes sectores industriales como minería, producción de acero y refinado del petróleo.(Inc. Energetics [EI] 2004; Office of Energy Efficiency and Renewable Energy [EERE] 2006; Industrial Technologies Program [ITP] 2007)

De dichos documentos se extrae una metodología general aplicable a cualquier sector de actividad, y se extiende a todos los procesos anteriores necesarios para la consecución de un producto concreto.

Estos dos aspectos convierten a la metodología en integral y permiten la evaluación completa de las oportunidades de mejora de un producto determinado teniendo en cuenta la cadena completa de procesos necesarios para su obtención.

2.-Metodología

La metodología aquí propuesta proporciona un mecanismo sencillo y de uso generalizado que permite analizar un proceso de forma global para identificar y actuar sobre los puntos óptimos de mejora. Para ello se interviene en dos niveles diferentes.

- En el primer nivel define el alcance del estudio, realizando un primer análisis de los procesos asociados al producto para determinar sobre cuáles se ha de aplicar el siguiente nivel y determinar los puntos de mejora en cuanto a emisiones GEI.
- El segundo nivel realiza los cálculos para la obtención de los puntos de mejora del producto que se deseaba analizar en un principio.

2.1.- Consideraciones previas

Fuentes de emisión

Las emisiones de GEI de un proceso industrial tienen tres fuentes genéricas principalmente:

- Reacciones químicas del propio proceso, que pueden tener como productos de la reacción alguno de estos gases.
- Consumo energético del proceso en cualquiera de sus formas, que genera emisiones diferentes según las fuentes utilizadas para alimentarlo.
- Fugas

Las emisiones asociadas al consumo eléctrico han de ser calculadas en función de la mezcla de fuentes de energía utilizadas para su generación (mix energético) y ponderadas teniendo en cuenta las pérdidas que se producen por transporte de electricidad en caso necesario.

Diferencia entre equipamiento, consumibles y materias primas

Para poder determinar correctamente cuáles son los procesos asociados al producto, es necesario establecer claramente la definición de estos tres conceptos.

Materia prima: Se define materia prima como aquel producto que sufrirá una transformación en otro nuevo a lo largo del proceso. Hierro, Dolomía, Caliza, Plásticos, etc...son ejemplos de materias primas, aunque en general dependen totalmente del proceso a analizar

Equipamiento: Toda aquella herramienta que se utilice durante el proceso pero que no sufra transformación alguna por este y pueda ser utilizada de nuevo. Su evaluación se hará en base a sus emisiones por tonelada, y no requiere la evaluación de sus procesos de fabricación. Dumpers, camiones, cintas transportadoras, pantallas de ordenador, etc...

Consumibles: Todo aquel material que sea necesario consumir la consecución del proceso, pero no sea transformado dentro de este, sino meramente utilizado. Explosivos, adhesivos, tinta, tornillería, etc...

2.2.- Primer nivel

Define los procesos a los que se le aplicará la metodología de nivel 2

Paso 1.- Determinar el producto que se desea analizar.

Paso 2.- Establecer los procesos necesarios para su obtención y su tipo

Realizando un estudio del producto se determinan qué procesos son necesarios para su obtención, incluyendo aquellos asociados a las materias primas y transporte de las mismas, formando una cadena de proceso que incluya todo su ciclo.

Una vez definidos se clasifican en base a dos tipos de proceso:

- Procesos de extracción: aquellos cuyo objetivo es extraer alguna materia prima. Se consideran procesos fin de cadena
- Procesos de transformación: cuyo objetivo es transformar alguna materia prima o producto intermedio en otro producto intermedio o final

Los procesos de extracción se consideran como el último proceso de una cadena de procesos determinada, de forma que el análisis no debe seguir dando pasos hacia atrás por esa vía cuando se encuentre un proceso de este tipo. Esta asunción tiene por objetivo marcar un límite claro a los procesos a estudiar en la metodología para simplificarla en cierta medida, aunque desde el punto de vista estricto sería necesario evaluar las oportunidades de mejora para cada una de herramientas individuales o consumibles utilizadas en el proceso.

El transporte de materiales es un caso especial ya que ocurre en todos los procesos de producción de una forma u otra: ya sea como parte de un proceso concreto, para transportar un material de una parte de la planta a otra, o como transporte de un producto que servirá de materia prima para un proceso siguiente. Generalmente el transporte dentro del propio proceso ya se encuentra evaluado en las oportunidades de mejora del mismo y no es posible diferenciarlo de este. En el caso del transporte entre procesos, a priori debe ser considerado puesto que presenta un valor de emisiones que puede ser considerable.

Se excluyen de la metodología los procesos asociados a la producción de las herramientas y consumibles.

Paso 3.- Determinar el alcance del informe

Una vez clasificados todos los procesos, es necesario definir cuáles serán incluidos en el estudio. Dada la naturaleza integral de la metodología, el nivel de detalle al que es posible llegar es muy alto, por eso se recomienda alcanzar un compromiso entre el nivel de detalle y recursos empleado.

Se realiza un pequeño estudio en el que se determina un nivel de emisiones actuales aproximado, que servirá de base para decidir en función de un punto de corte, qué procesos serán analizados y cuáles no.

2.3.- Segundo nivel

Se detallan a continuación los pasos para determinar los parámetros que permitirán evaluar las oportunidades de mejora de un proceso de producción en particular, estableciendo un "Intervalo de emisión". Este concepto, establecido en base al Intervalo de energía ("Energy Bandwidth") (EI 2004; EERE 2006; ITP 2007) se define como la diferencia existente entre el nivel de emisiones actual y el mínimo práctico alcanzable en el proceso.

Este nivel debe ser aplicado a cada uno de los procesos que se hayan definido en el nivel anterior

Consideraciones previas

Antes de comenzar a calcular cada uno de los valores citados es recomendable realizar un primer estudio del proceso con el objetivo de dividirlo en unidades más pequeñas con algún elemento común entre ellas que facilite su estudio en conjunto (ITP 2007)

También es necesario establecer cuál es el consumo de materias primas para poder evaluar las diferentes emisiones asociadas a estas.

Todas las emisiones deben ser convertidas a Kg CO₂ siguiendo la metodología detallada por el "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC). (University of Copenhagen [UC] 2009)

Determinar las posibles fuentes de emisión en el proceso, normalmente se dividirán en consumo eléctrico, consumo energético por otras fuentes y emisión por reacciones químicas del proceso.

Paso 1.- Estimación de la emisión del mix energético a utilizar.

Cada sector industrial concreto presenta un mix de energía particular para su actividad, por lo que su nivel de emisiones para un mismo consumo energético variará en función de qué fuentes de energía compongan dicho mix.

Paso 2.- Determinación de las emisiones actuales

Si el estudio se está realizando para un caso concreto, los valores de emisiones actuales serán los de dicho caso si se encuentran disponibles. Si no se disponen datos o se desea realizar una evaluación general de un sector se puede obtener el valor de las emisiones actuales de una de las siguientes maneras:

En procesos muy homogéneos en los que no existe una gran variabilidad entre las diferentes plantas en cuanto a variables de proceso, es posible promediar valores de emisiones conocidos en el mayor número de plantas posibles. Un análisis estadístico de mediana y desviación típica puede darnos una estimación aproximada de cuán válida es la asunción del valor medio como representativo.

Si el proceso es muy heterogéneo, es decir, existen grandes divergencias entre las diferentes instalaciones que lo realizan, es necesario tomar como base una instalación tipo que sea lo más representativa posible de todo el sector. Si se toma como instalación tipo una existente, se tomarán los datos de emisión de esta como los del proceso, aunque también es posible modelar dicha instalación.

La minería es un claro ejemplo de este último caso: la variabilidad entre las leyes de los yacimientos, tipo de ganga y otros parámetros hacen imposible una obtención de un valor medio independiente de estas variables, por lo que establecer una mina tipo del mismo producto que se esté evaluando es la opción más óptima. Cuántos más datos se disponga del caso concreto que se desee analizar, el nivel de emisiones será más veraz.

Paso 3.- Determinación de las emisiones producidas por la aplicación de las Mejores Técnicas Disponibles

Valores de emisión actuales de algunas técnicas implantadas que se encuentren por debajo de la media.

Se puede determinar mediante búsqueda bibliográfica de las emisiones en sí mismas en aquellos lugares donde se encuentren implantadas, o como una mejora de rendimiento de los procesos implantados actualmente.

Tanto en este paso como en el anterior, se han de cuantificar las pérdidas por transporte eléctrico actuales.

Paso 4.-Determinación de las emisiones mínimas teóricas:

En función del tipo de proceso analizado, es posible determinar este valor de formas diferentes:

Para ciertos procesos es posible realizar estudios teóricos de los mismos, pero es necesario que no exista una gran variabilidad entre las distintas plantas y que sean susceptibles de un análisis teórico desde el punto de vista físico-químico y termodinámico. (Fruehan et al. 2000)

En el caso de que no se conozca exactamente los modelos teóricos que regulan el proceso, o estos sean muy complejos y exista gran variabilidad entre las distintas plantas, se estima la emisión mínima como aquella derivada de multiplicar la emisión Actual por el rendimiento de los procesos, equipamientos y reacciones que forman parte del proceso a analizar. Si las reacciones químicas son conocidas se pueden evaluar de forma teórica directamente y aplicar después las emisiones de aquellos procesos que no tengan un cálculo teórico.(ITP 2007)

Siempre que el estudio conste de un análisis teórico se han de citar las asunciones realizadas y quedan excluidas del mismo las pérdidas por transporte de energía eléctrica y de materiales

Paso 5.- Determinación de las emisiones mínimas prácticas

Se definen emisiones mínimas prácticas como aquellas emisiones que se obtendrán en un futuro cercano por la aplicación de mejoras actualmente en desarrollo en los procesos de estudio. Estas emisiones se calculan en base a los valores actuales de emisión modificados por los rendimientos futuros o, en el caso de no disponer de ellos, se puede estimar aplicando la siguiente regla de los 2/3 (ITP 2007)

$$\text{Practical minimum} = \text{Best Practice} - (\text{Best practice} - \text{Theoretical minimum}) * 2/3 \quad (1)$$

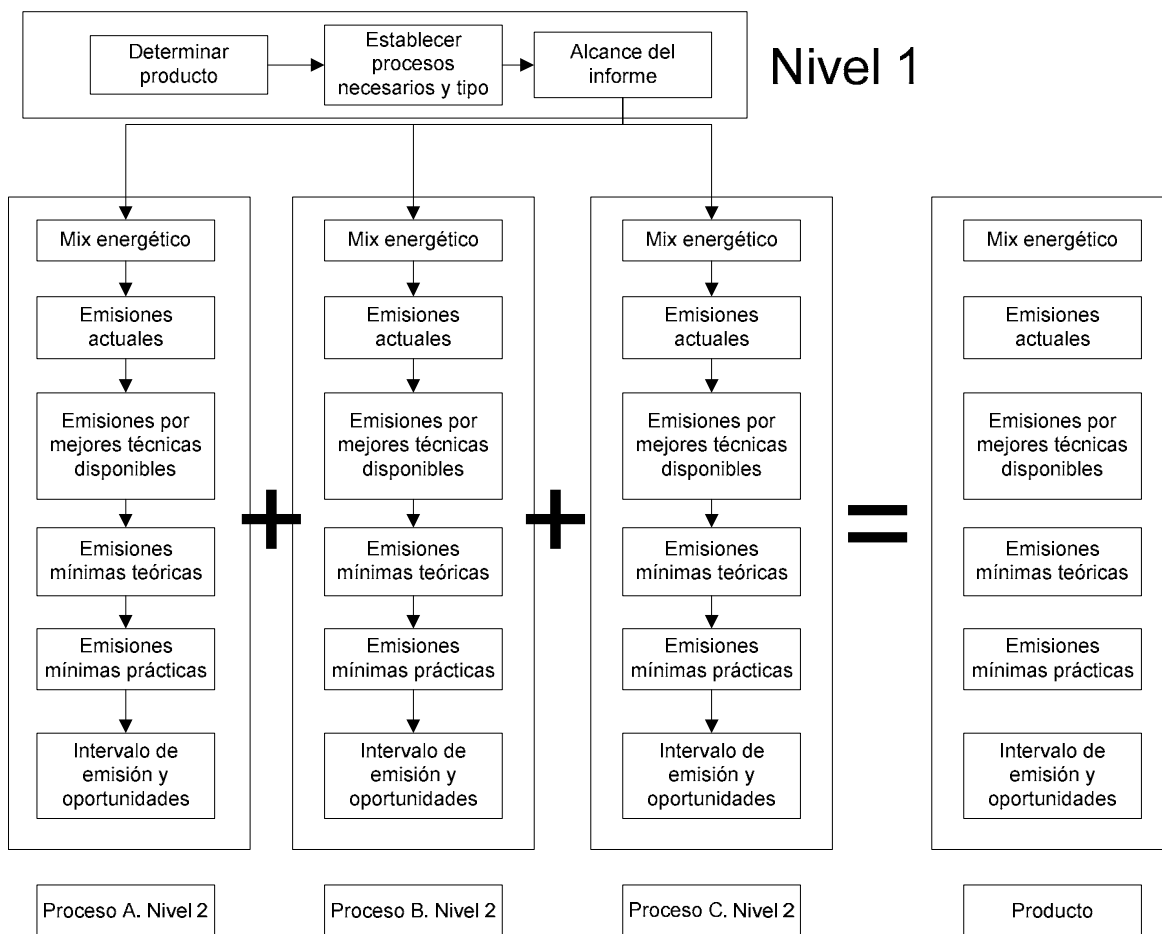
En este punto se han de tener en cuenta las pérdidas por transporte eléctrico de un futuro cercano.

Paso 6.- Calcular el Intervalo de emisión y las oportunidades de disminución de emisión

Se define Intervalo de emisión como la diferencia entre la emisión mínima producida y la actual. En cuanto a las oportunidades para la disminución de emisiones, para cada proceso se determinan como la diferencia entre las emisiones actuales y las mínimas prácticas.

Los pasos descritos anteriormente se encuentran resumidos gráficamente en la Figura 1, donde se muestra esquemáticamente el procedimiento

Figura 1: Esquema de la metodología



2.4.- Caso Práctico 1: Producción de mineral de hierro.

La producción de mineral de hierro constituye una de las actividades más extendidas a lo largo de todo el planeta y es un proceso de minería que deja un profundo impacto en el medioambiente. Además, su carácter de materia prima para otros procesos de producción muy necesarios en la actualidad, como el acero, lo convierten en un caso práctico de interés para comprobar la aplicabilidad de la metodología aquí recogida.

Los datos necesarios para la aplicación de la metodología se toman de una serie de minas modelo utilizadas para calcular el Intervalo energético ("Energy Bandwidth") de la industria minera en los Estados Unidos (ITP 2007).

Paso 1: Determinar el producto que se desea analizar

Se desea analizar el Intervalo de emisión del mineral de hierro.

Paso 2: Establecer los procesos necesarios para su obtención

Dado que se trata de un proceso de extracción se considera final de cadena: no hay procesos anteriores para la consecución de este.

Paso 3: Determinación del alcance del informe

La metodología de nivel dos será únicamente aplicada al proceso de: Minería de extracción

Nivel 2

Consideraciones previas

Antes de comenzar con el análisis dividimos la actividad de extracción en unidades más pequeñas para permitir un estudio más sencillo del proceso global y determinamos el equipamiento necesario en cada una de ellas. En el caso de la minería se pueden citar algunos.

Tabla 1: Algunos ejemplos de equipamiento minero [5]

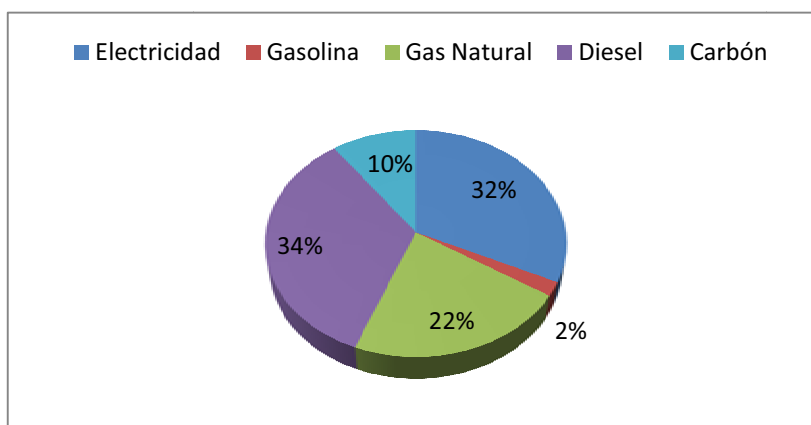
Proceso	Unidad	Equipamiento
Extracción	Perforación	Camión de carga de ANFO
		Perforadoras de diamante
		Perforadoras rotativas
		Perforadoras de percusión
		Jumbos de perforación
Extracción	Voladura	Explosivos
		Agentes explosivos (p. ej. ANFO)
	Extracción	Palas hidráulicas
		Máquinas de extracción continua (Rozadoras, minadores)
	Ventilación	Ventiladores
Bombeo de agua	Bombas	
Manejo y transporte de material	Equipamiento alimentado por Diesel	Camiones de servicio
		Cargadores de frente
	Equipamiento alimentado por electricidad	Bulldozers
		Camiones de recodiga
Procesado y recuperación	Trituración	Transportadores de cinta o cadena (motor)
		Tuberías (bombas)
	Trituración	Trturadora de mandíbulas
		Cono Simons
	Molienda	Molino de bolas
		Molino de rodillos
	Separación	Cetrifugado
		Flotación
Ciclón		
Separador Magnético		

Como posibles fuentes de emisiones únicamente se tendrá en cuenta el consumo energético, tanto eléctrico como de otras fuentes.

Paso 1.- Determinación de la emisión por unidad de energía

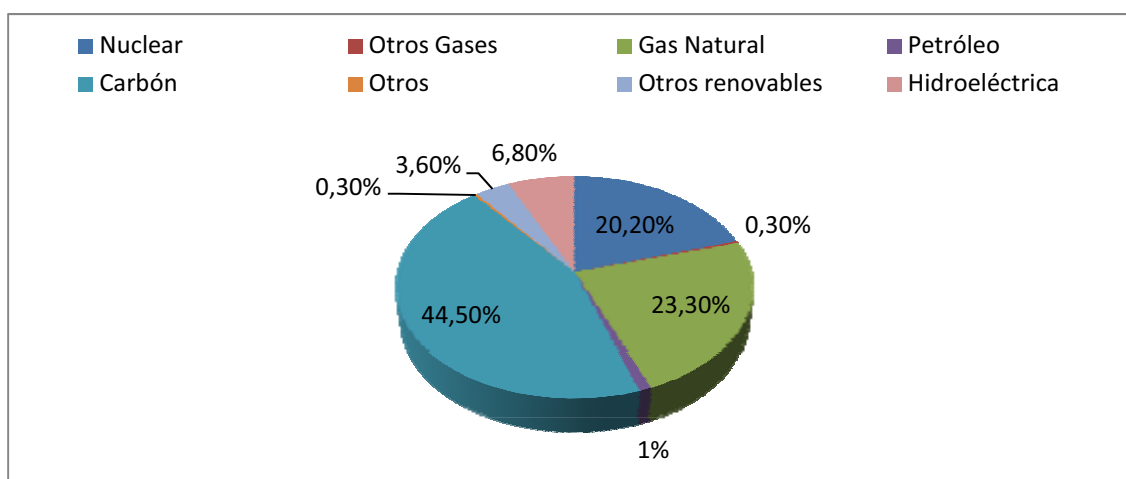
En el caso de la minería en general, se toman los valores del mix energético de EEUU, descritos por el "Mining Industry Energy bandwidth"

Figura 2: Mix energético del sector de la minería en EE.UU. (ITP 2007)



Al que se aplican los factores de emisión establecidos por la U.S. Energy Information Administration (EIA 2011) y de la base de datos Eco-Invent y tomando como mix energético nacional para la producción de electricidad el siguiente

Figura 3: Mix energético para la producción de energía eléctrica en EE.UU.



Obteniéndose como valor final de factor de emisión por consumo energético de: 0,33 Kg CO₂/KWh

Paso 2.- Determinación de los valores de emisión actuales

El primer paso es la estimación del número de unidades de equipamiento necesarias y número de horas que trabajan al día. A partir de ello se determinan dichos valores y se puede estimar la emisión por tonelada de material producido, promediándolo entre varias minas modeladas: potasio, caliza y fosfatos (ITP 2007).

En este caso no existen reacciones químicas que produzcan gases de efecto invernadero, por lo que el cómputo de emisiones se realizará en base a las emisiones por consumo energético únicamente. Así pues el valor de emisiones actuales será la suma de los valores de cada equipo individualmente. Cuando se trata del diseño de un nuevo proceso, se puede acudir a estadísticas sectoriales, si bien se debe considerar que pueden existir grandes diferencias de unos casos a otros en función de los niveles tecnológicos e incluso las eficiencias de las organizaciones.

Paso 3.- Determinación de las emisiones producidas con la aplicación de las Mejores Prácticas

Estos valores se determinaron mediante la búsqueda y aplicación de las eficiencias de los equipos con mayor rendimiento, tal como vienen indicados en los diferentes documentos de mejores técnicas disponibles y BREF sectoriales. En el caso de no disponer de datos o que las características del equipo variasen enormemente de una mina a otra, se utilizaron otros datos como el rendimiento de los motores que emplea la máquina o similares. (ITP 2007)

Paso 4.-: Determinación de las emisiones mínimas teóricas

Dada la gran diferencia existente entre cada una de las minas analizadas, se ha optado por la determinación de las emisiones mínimas en base a los rendimientos actuales de la maquinaria y a las emisiones de las mismas. Si en lugar de una actividad extractiva se tratase de una actividad productiva, tal como se verá en el ejemplo posterior, se podrá determinar estos valores mínimos a partir de las ecuaciones estequiométricas.

Paso 5.-: Determinación de las emisiones mínimas prácticas

Para algunos elementos del inventario como los motores o bombas, se utilizan valores conocidos de rendimiento máximo, mientras que para el resto se puede utilizar la fórmula (1)

Los resultados concernientes a estos 5 primeros pasos se resumen en la Tabla 2 a continuación, en valores de Kg CO₂ por tonelada de material extraído.

Tabla 2: Intervalo de emisión para la extracción de mineral de hierro en EE.UU. por procesos individuales. [Kg CO₂/t]

	Maquinaria	Actual	Mejores técnicas	Mínimo Práctico	Mínimo teórico
Extracción	Perforación	5.492	4.453	3.117	1.930
	Voladura	23.749	18.257	9.796	5.492
	Extracción	32.803	27.608	4.305	8.906
	Ventilación	36.069	32.803	27.905	8.461
	Bombeo de agua	4.601	4.156	3.859	1.039
Manejo y transporte de materiales	Maquinaria Diesel	179.454	119.636	85.497	53.881
	Maquinaria Eléctrica	0.000	0.000	0.000	0.000
	Motor	0.000	0.000	0.000	0.000
	LHD	0.000	0.000	0.000	0.000
	Bombas	0.000	0.000	0.000	0.000
	Conminución	454.052	382.805	134.479	3.562
	Trituración	14.249	8.906	7.422	2.226
	Molienda	439.802	373.899	127.057	1.336
Procesado y recuperación	Separacion	32.952	5.344	4.750	1.336
	Centrifugado	0.000	0.000	0.000	0.000
	Flotación	6.679	5.344	4.750	1.336

Subtotal	769.172	595.062	273.708	84.606
Operaciones auxiliares	50.170	50.170	48.240	15.734
Total	819.342	645.232	321.948	100.340

Paso 6.-Cálculo del intervalo de emisión

El resultado final por operación se resume en la Figura 4. Los valores de intervalo de emisión y oportunidad de mejora:

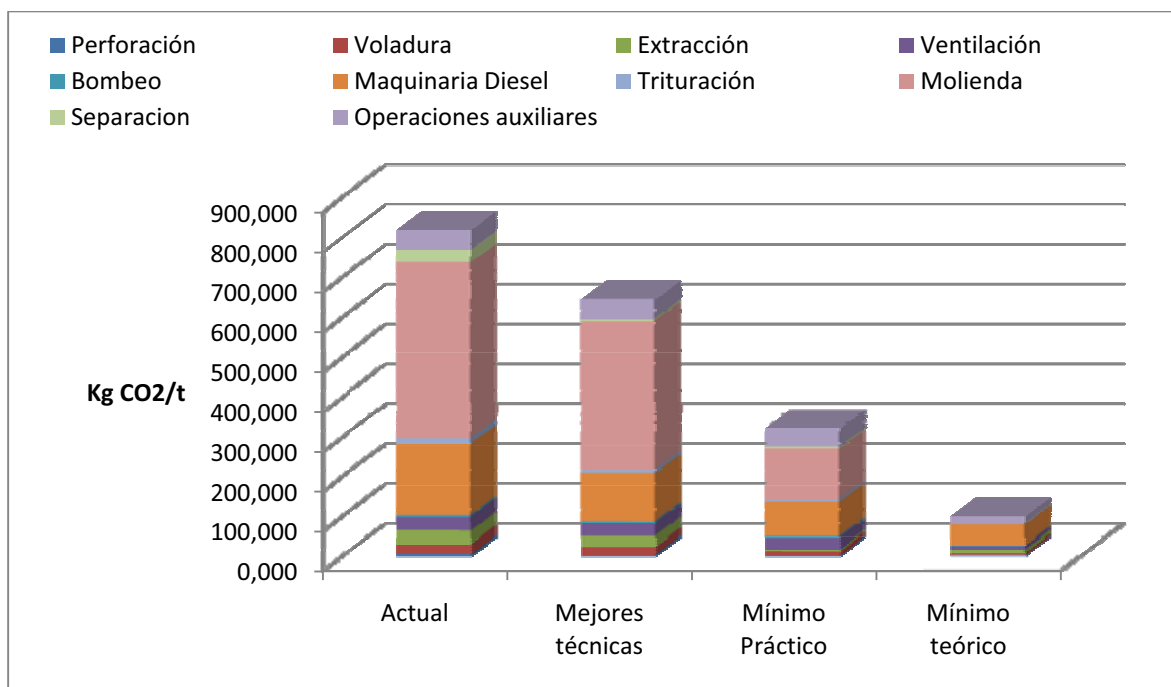
El intervalo de emisión de dióxido de carbono:

$$\Delta \text{Eco}_2 = 819.342 - 100.340 = 719,002 \text{ Kg CO}_2/\text{t} \quad (2)$$

Y las oportunidades de disminución de la emisión de dióxido de carbono

$$\text{Dco}_2 = 819.342 - 321.948 = 497,394 \text{ Kg CO}_2/\text{t} \quad (3)$$

Figura 4: Intervalo de emisión para la extracción de mineral de hierro en EE.UU. [Kg CO₂/t]



Se puede observar como los procesos de molienda y el empleo de maquinaria diesel presentan las mayores oportunidades de mejora de la emisión, expresado como una mayor diferencia entre sus emisiones actuales y sus mínimas prácticas. Concretamente con valores de 319,573 Kg CO₂ y 93,9571 Kg CO₂ respectivamente, que representan más del 80% de las disminuciones posibles

2.5.- Caso práctico 2: Horno de arco eléctrico

Paso 1: Determinar el producto que se desea analizar

Se desea analizar el Intervalo de emisión para la producción de acero líquido mediante horno de arco eléctrico a partir de chatarra

Paso 2: Establecer los procesos necesarios para su obtención

Existen multitud de combinaciones que permiten obtener el acero en horno de arco, según sean las materias primas empleadas y el tipo de acero deseado. En este caso estudiaremos la producción de acero para productos largos utilizando únicamente chatarra y fundentes.

Por ello, es necesario analizar:

- Proceso de horno eléctrico: Proceso de transformación
- Extracción del fundente, caliza: Proceso de extracción
- Transporte de chatarra y fundente. Proceso de transporte
- Transformación de la chatarra: Proceso de transformación

Paso 3: Determinación del alcance del informe

Tras un primer estudio de las emisiones actuales de todos los procesos asociados a la producción de acero líquido mediante EAF, se determina que el proceso con menores emisiones por tonelada de material tratado es la transformación de la chatarra, por lo que presenta pocas oportunidades de mejora y es eliminado del estudio. De esta manera finalmente la metodología de nivel dos será aplicada a los procesos de:

- Horno eléctrico
- Extracción del fundente.
- Transporte de chatarra y fundente.

Nivel 2: Extracción del fundente

Siguiendo unas asunciones homólogas al caso de la minería de hierro del caso 1, se pueden llegar a calcular los valores de emisión para la extracción del fundente caliza. Para no repetir el proceso se presentan los valores en la tabla 3, calculados a partir de los valores de intervalo energético para minerales y rocas industriales.

Tabla 3: Intervalo de emisión para la producción de fundentes en EE.UU. [Kg CO₂/t]

	Actual	Mejores técnicas	Mínimo Práctico	Mínimo teórico
Emisión (Kg CO ₂ /t)	7,0348	5,1288	3,9434	1,4649

Se estima que por cada tonelada de acero producida a partir de chatarra se necesitan 70 Kg de fundentes

Nivel 2: Transporte de chatarra y fundentes

Para este caso se considera que el transporte se realiza utilizando camiones diesel capaces de cargar 21 t de material por viaje y que realizan el viaje únicamente de ida, por una carretera de 500 Km. Los resultados se encuentran resumidos en la tabla 4

Consideraciones previas

Se estima que para la producción de 1 tonelada métrica de acero líquido se requieren 1100 Kg de chatarra y 70 Kg de fundentes.

La única fuente de emisiones es el consumo de combustibles.

No es posible dividir el proceso en unidades más pequeñas que faciliten su estudio.

Paso 1.-Determinación de la emisión por unidad de energía

Dado que son camiones diesel, la energía total vendrá aportada por dicho combustible cuya emisión según la US Environmental Protection Agency (EPA) es de 10,084 g/galón.

Paso 2: Determinación de los valores de emisión actuales

Basándose en los consumos medios calculados a partir de los presentes en *Road Freight Statistics 2009* (Department for Transport [DT] 2009) y las emisiones del diesel proporcionadas por la EPA (EPA 2005), para un camión de 21 toneladas se puede obtener un valor de emisión por tonelada,

Paso 3.- Determinación de las emisiones producidas por la aplicación de las Best Practices

Para este paso se tomarán los consumos menores de los camiones de 21t que se detallan en "*Road Freight Statistics 2009.*" (DT 2009)

Paso 4.-: Determinación de las emisiones mínimas teóricas

Las emisiones mínimas teóricas para un proceso de transporte se consideran como nulas, puesto que para el proceso teórico no se consideran.

Paso 5: Determinación de las emisiones mínimas prácticas

Se calcula suponiendo un rendimiento actual del 37% y en las mejores condiciones del 55% (EPA 2006)

Paso 6.- Cálculo del intervalo de emisión.

Los resultados de los cálculos anteriores se resumen en la Tabla 4

Tabla 4: Intervalo de emisión para el transporte de chatarra y fundente al horno eléctrico por cada 500 Km. [Kg CO₂/t]

	Actual	Mejores Técnicas	Mínimas prácticas	Mínimas teóricas
Emisión (Kg CO ₂ /t)	13,7375	11,6768	7,8553	0

Nivel 2: horno de arco eléctrico

Consideraciones previas

En este caso el proceso resulta indivisible en unidades más pequeñas de forma que nos facilite la estimación, por lo se analizará como una única unidad

Como posibles fuentes de emisiones se encuentran:

- Consumo energético
- Consumo energético por calcinación de la caliza
- Consumo energético por obtención de oxígeno
- Reacciones químicas del proceso

EL proceso es análogo a los indicados anteriormente, con la diferencia de la existencia de reacciones químicas.

Paso 1.- Determinación de la emisión por unidad de energía

Se considera que para alimentar una unidad de energía al horno eléctrico se utiliza una mezcla de 72% electricidad y 28% Gas Natural, para operaciones auxiliares de la chatarra. De esta forma se estiman unas emisiones de 0,45 Kg CO₂/KWh

Pasos 2, 3, 4 y 5

Para evaluar las emisión por reacción química, es posible realizar un balance al carbono de todas las materias primas, pero en este caso se trata de materias con bajo contenido en carbono y el resultado estimado es de 16 Kg CO₂/t, poco significativo

para el proceso global del EAF, aunque se incluirá a cada una de las emisiones calculadas por consumo energético.

El resto de cálculos se realizaron utilizando como base el documento "Theoretical Minimum Energies to Produce Steel" (Fruehan et al. 2000), que determina las energías para producir una tonelada de acero líquido incluyendo el consumo por calcinación de la caliza, en base a valores medios tomados de la industria Americana en 1998 (American Iron And Steel Institute [AISI] 1998, International Iron and Steel Institute [IISI] 1998). Se encuentran resumidos en la Tabla 5.

Tabla 5: Intervalo de emisión para la producción de acero líquido por horno eléctrico. [Kg CO₂/t]

	Actual	Mejores técnicas	Mínimo práctico	Mínimo teórico
EAF(Kg CO ₂ /t)	1005,7427	949,1985	666,4771	539,2525

Paso 6.- Cálculo del Intervalo de emisión.

Para este caso es necesario sumar todas las emisiones de los procesos de las materias primas, ponderadas por el consumo de dichas materias primas. El resultado obtenido se resume en la Tabla 6.

Tabla 6: Intervalo de emisión integral para producción de 1 tonelada de acero líquido vía horno eléctrico [Kg CO₂/t]

	Actual	Mejores técnicas	Mínimo práctico	Mínimo teórico
Fundente	7,0348	5,1288	3,9434	1,4649
Transporte	13,7375	11,6768	7,8553	0,0000
Horno eléctrico	1005,7427	949,1985	666,4771	539,2525
TOTAL	1026,5150	966,0041	678,2759	540,7174

El intervalo de emisión de dióxido de carbono:

$$\Delta E_{CO_2} = 1026.5150 - 540.7174 = 485,7976 \text{ Kg CO}_2/\text{t} \quad (4)$$

Y las oportunidades de disminución de la emisión de dióxido de carbono

$$D_{CO_2} = 1026.5150 - 678.2759 = 348,2391 \text{ Kg CO}_2/\text{t} \quad (5)$$

Presentando el proceso del horno eléctrico más del 90% de las oportunidades de mejora.

3.- Conclusiones

Como resultado del trabajo desarrollado se obtiene una metodología de amplio espectro, aunque con mayor aplicación en sectores industriales, que supone una aproximación estructurada a la forma de afrontar los procesos de reducción de emisiones en las empresas.

- La metodología propuesta permite una evaluación de los posibles puntos de mejora dentro de los procesos industriales respecto a sus emisiones de gases de efecto invernadero mediante la separación de cada proceso en unidades más pequeñas.
- Se puede utilizar a modo de benchmarking para comparar diversas vías de generación de un mismo producto teniendo en cuenta no sólo sus emisiones

actuales, como en los análisis de ciclo de vida, sino en su potencialidad para futuras emisiones a corto plazo.

- Al incluir los mínimos teóricos, la diferencia respecto de los mínimos actuales y prácticos es un indicador de los potenciales puntos de investigación para la mejora de los procesos.
- La aplicación de la metodología de nivel 2 también a los productos consumibles e incluso a los procesos de generación eléctrica es posible, lo que aumentaría el nivel de precisión y el rango de visión del estudio, aunque a costa de una gran inversión de recursos
- En los procesos de extracción del hierro, la molienda y el consumo de diesel en maquinaria son los sectores que presentan un potencial mayor para su disminución de emisiones, reuniendo entre las dos más del 80% de emisiones reducibles, para valores de emisiones medidos en base a 3 minas de roca industrial modeladas (ITP 2007).
- En los procesos de producción de acero líquido mediante horno de arco eléctrico en base a chatarra, más del 90% de las oportunidades totales de mejora se encuentran en el propio horno, siendo poco significativas las emisiones por transporte y obtención de fundente y transporte de chatarra. Los datos para este estudio se basan en los valores medios de la industria Americana proporcionados por el American Iron and Steel Institute y el International Iron and Steel Institute.
- En los casos aquí evaluados únicamente se han utilizado emisiones de CO₂, pero para evaluar el efecto total de los procesos es necesario tener en cuenta también otras emisiones como el CH₄, o N₂O y tantos gases como se considere oportuno transformándolas en su equivalente en CO₂. El proceso es análogo y el resultado la suma de todos los equivalentes en CO₂.

4.- Referencias

- American Iron and Steel Institute (1998) "Annual Statistical Report".
- Department for Transport. (2009). "Road Freight Statistics 2009." The United Kingdom Statistics Authority.
- Fruehan, R. J., Fortini, O., Paxton, H. W. & Brindle, R. (2000). Theoretical Minimum Energies To Produce Steel. Electronics Inc., for the U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies.
- International Iron and Steel Institute (1998). "Energy Use in the Steel Industry." International Iron and Steel Institute Committee on Technology. Brussels, September 1998.
- Inc. Energetics. (2004). "Steel Industry Energy Bandwidth Study." Work for the Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy.
- Industrial Technologies Program. (2007). "Mining Industry Energy Bandwidth Study." U.S. Department of Energy.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). "Climate Change 2001: the scientific basis."
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2008). "AR4 SYR Appendix Glossary."
- Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (2006). "Energy Bandwidth for Petroleum Refining Processes." U.S. Department of Energy.
- University of Copenhagen (2009). "Synthesis Report."
- U.S. Energy Information Administration (2011). "Fuel Emission Coefficients".
- US Environmental Protection Agency (2005). "Emission Facts".
- US Environmental Protection Agency. (2006). "Motivations for Promoting Clean Diesels. Presentation."

Correspondencia

Valeriano Álvarez Cabal. Area de Proyectos de Ingeniería – Universidad de Oviedo
Phone: +34 985104272
Fax: +34 985104256
E-mail: valer@api.uniovi.es
URL: <http://www.api.uniovi.es>