

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“VENTAJAS TÉCNICAS Y ECONÓMICAS DE LA
PRODUCCIÓN DE ACERO A TRAVÉS DE LA RUTA
MINIMILL”**

INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:
YERNER MALLQUI NIETO

LIMA – PERU

2010

DEDICATORIA

A mi querida madre Teodocia, a mis hermanos Jessica y Lener, quienes son mi motivación, deseo de superación y fuerza para alcanzar mis metas.

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a los Profesores de la Facultad de Ingeniería Química (UNI), quienes a través de la enseñanza que me impartieron contribuyeron a mi formación.

RESUMEN

El presente Informe de Suficiencia muestra a través de información cuantitativa cual es la alternativa mas adecuada para la producción de acero ante las actuales tendencias, enfocándose principalmente en mostrar las ventajas técnicas y económicas.

Con este propósito en el Capítulo II se muestran las diferentes formas de producción de acero (ruta integral y ruta *minimill*), también se detallada las diferentes etapas que conforman la ruta *minimill* como son: el proceso de reducción directa, el proceso de fusión en el horno eléctrico, el proceso de colada continua y el proceso de laminación. En lo referente a la el proceso de reducción directa del mineral o pellets de oxido de hierro (una de las etapas de la ruta *minimill*) se presentan las diferentes tecnologías a través de la cual puede llevarse acabo: Midrex, HyL y SL/RN.

En el Capítulo III se detallan los aspectos ambientales tomados en cuenta para seleccionar la mejor ruta de producción de acero los cuales incluyen: reciclaje, consumo de energía, emisiones, escorias y además el impacto de las regulaciones ambientales sobre los costos de manufactura. En la parte final del capitulo se presentan los aspectos económicos que permiten determinar cual de las tecnologías de reducción directa vistas en el Capitulo II es la que genera mayor rentabilidad.

INDICE

I INTRODUCCIÓN	7
II DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TÉCNICAS	8
2.1 Análisis de Situación Actual	8
2.2 Rutas para la producción de acero	12
2.3 Proceso de Reducción Directa	14
2.2.1. Proceso Midrex	16
2.2.2. Proceso HYL-III	19
2.2.3. Proceso SL/RN	21
2.2.3.1. Materias primas e insumos	22
2.2.3.2. Dosificación de materias primas e insumos	24
2.2.3.3. Equipos de proceso	26
2.2.3.4. Reacciones durante el proceso de reducción	31
2.2.3.5. Requerimientos de energía en el proceso de reducción	32
2.2.3.6. Sistema de refrigeración en el enfriador	33
2.2.3.7. Temperatura de operación en los hornos rotatorios	34
2.2.3.8. Limitaciones del proceso	36
2.4 Proceso de fusión en el Horno de Arco Eléctrico	37
2.5 Proceso de colada continua	37
2.6 Proceso de laminación en caliente	38
III DESARROLLO DEL TEMA	40
3.1 Aspectos ambientales en la producción de acero a través de las diferentes rutas (integrada y <i>minimill</i>).	40
3.1.1. Reciclaje	40
3.1.2. Consumo de Energía	43
3.1.3. Emisiones de gases contaminantes	45
3.1.4. Escorias	49
3.2 Efecto de las Regulaciones Ambientales en la industria siderúrgica.	51
3.3 Evaluación Financiera	56

3.2.1 Costo de Capital -----	57
3.2.2 Costos de Operación. -----	61
3.2.3 Tasa Interna de Retorno -----	65
IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	66
V BIBLIOGRAFÍA -----	68

I. INTRODUCCIÓN

El acero constituye la base de la sociedad moderna; desde los autos que manejamos, los envases y artefactos que usamos hasta las casas en que vivimos están hechos de este material.

Hoy en pleno siglo XXI, el acero está todavía revolucionando el modo en que nosotros vivimos constituyéndose además como indicador que mide el crecimiento económico de un país; los niveles de desarrollo socioeconómicos y los estándares de vida de las personas en los países es medido por el consumo per cápita del acero.

En la actualidad el acero es producido a través de dos rutas: ruta integrada (alto horno – convertidor de oxígeno) y ruta *minimill* (reducción directa – horno de arco eléctrico). La obtención del acero vía la ruta *minimill* incluye el proceso de reducción directa el que está basado en diferentes tecnologías, siendo las más utilizadas: MIDREX, HYL y SL/RN.

Las actuales tendencias como son, el constante crecimiento de la producción de acero (la cual se espera que se duplique para el 2050), la preocupación por el calentamiento global que tiene como principal causa el incremento de las emisiones de CO₂ los actuales acuerdos internacionales tales como el Protocolo de Kioto (mismo que está trayendo como resultado regulaciones ambientales más estrictas que se traducen a nivel industrial como un incremento en los costos de manufactura), motivan la realización de este informe que tiene por objetivo analizar y evaluar cuál es la alternativa más adecuada de producción de acero ante las actuales tendencias.

II. DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TÉCNICAS

2.1 Análisis de la Situación Actual

Hasta la actualidad el acero sigue constituyendo uno de los materiales más importantes, versátiles y de gran relevancia en los sectores construcción, minería, comercio e industria.

Según la World Steel Association a diciembre del 2008, la producción mundial del acero alcanzó 1326 millones de TM, este monto es ligeramente inferior al registrado en el mismo periodo el 2007 (1351 millones de TM), ello se ha debido a la menor demanda del producto por efecto de la crisis financiera mundial y la paralización de varias plantas en diferentes partes del mundo, incluyendo China uno de los países de mayor crecimiento global. En este sentido la producción de China en el 2008 se incrementó solo 2,3% respecto a diciembre del 2007, mientras que en el periodo anterior registro un incremento de 16,7%, situándose a diciembre del 2008 en un nivel de producción de 500 millones de TM, equivalente a 37,7% de la producción mundial.^[1]

Si bien China no creció a un ritmo de periodos anteriores, este país ha duplicado su producción de acero en los últimos cinco años, convirtiéndose en el primer país en la historia en producir 500 millones de TM de acero en un año.

En el 2009 la producción declinó en casi todos los países productores de acero; sin embargo, China mostró un positivo crecimiento tal como se muestra en la figura 2.1. ^[2]

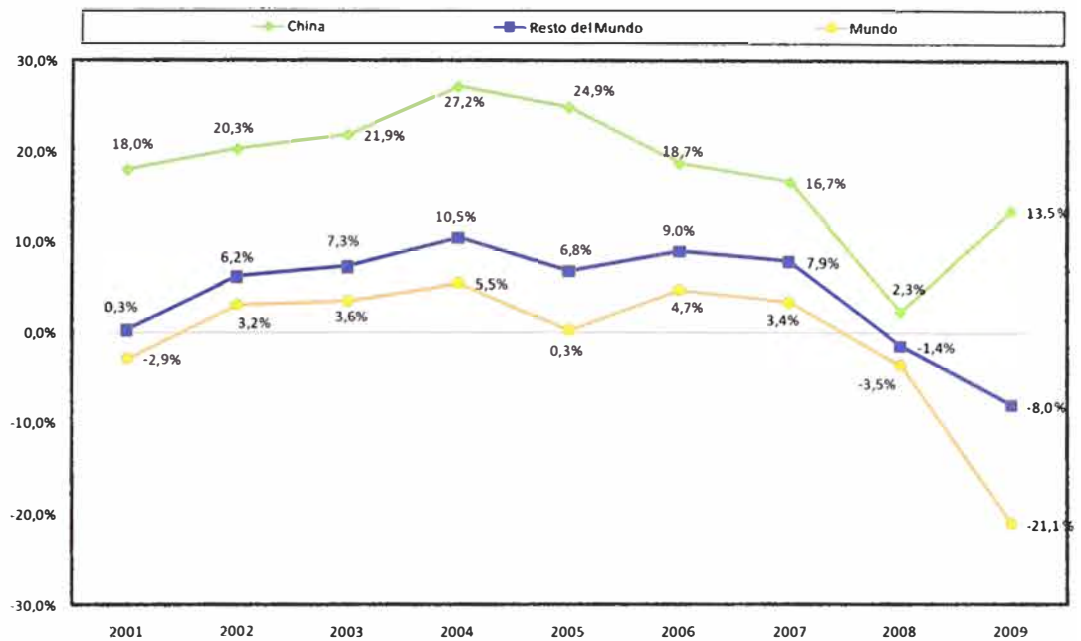


Figura 2.1: Tendencias de crecimiento en la producción de acero

Fuente: World crude steel output decreases by -8.0% in 2009^[2]

La producción de acero de China en el 2009 alcanzó 567,8 millones de TM, un incremento de 13,5% con respecto al 2008, esto es un record anual de la producción de acero crudo para un solo país; la participación de China en la producción mundial de acero continuó creciendo en el 2009 produciendo 47% de la producción mundial de acero.^[2]

La producción mundial de acero de manera global ha crecido, es así que de 307 millones de toneladas en 1959 se ha prácticamente cuadruplicado esta cantidad registrando 1219 millones de toneladas a fines del 2009 (figura 2.2). Según proyecciones de la World Steel Association la industria deberá seguir creciendo en 3% a 5% a nivel mundial y entre 8 a un 10% en China, India y Rusia para satisfacer una demanda proyectada que se espera se duplique para el 2050.^[3]

En la producción mundial, Sudamérica participó con 37,8 millones de TM a diciembre del 2009 (47,3 millones de TM a diciembre del 2008), siendo Brasil el principal productor de la región con 26,5 millones de TM. Es de

indicar que Perú participó con 1,9% de la producción de América del Sur en dicho periodo, habiendo disminuido en 28,3% en comparación a lo registrado en el año 2008 (718 mil TM vs 1001 mil TM).^[4]

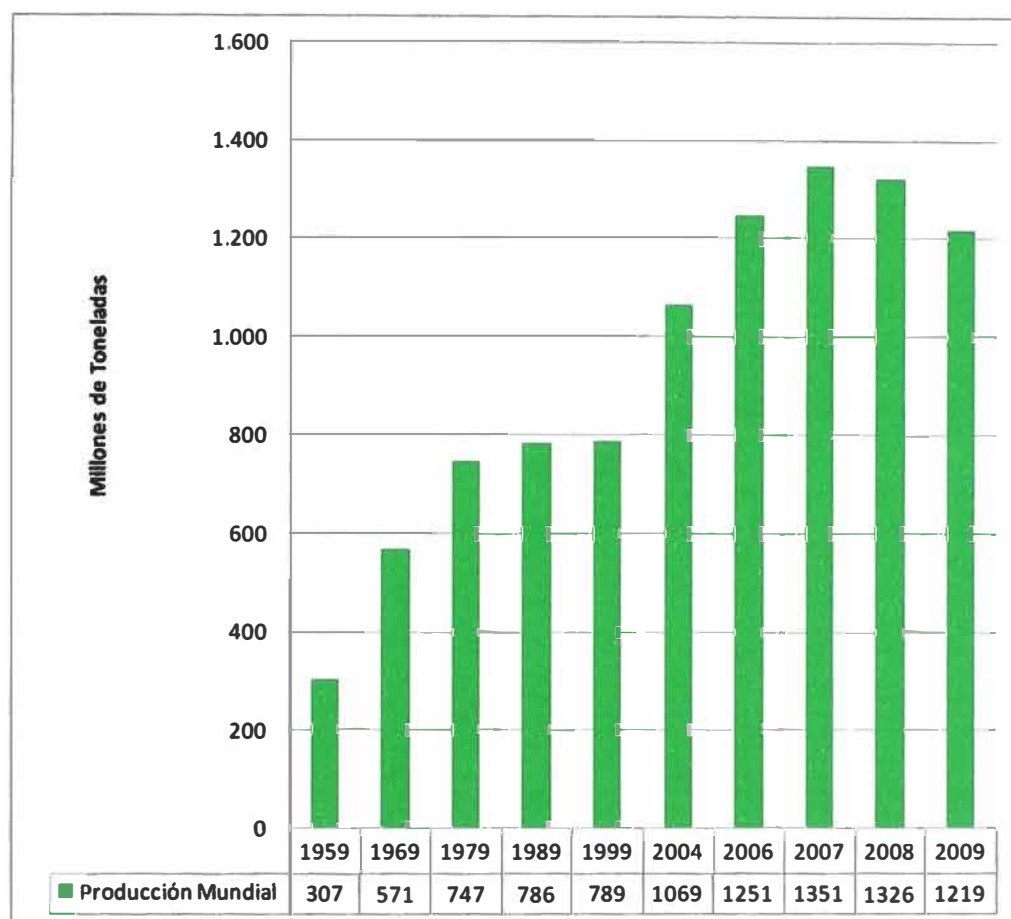


Figura 2.2: Producción mundial de acero

Fuente: Steel Statistical Yearbook 2008^[5] y Crude Steel Production –December 2009^[4]

En el mercado peruano hay dos grandes líneas de productos:

Productos largos, los que se destinan principalmente a la construcción y en menor medida, a la industria metalmeccánica y a la minería. Entre estos productos están: barras de construcción, alambión, barras lisas y perfiles, los cuales en conjunto representan el 65% de la demanda total.

Productos planos, los que están destinados a los sectores de manufactura, de minería y de construcciones metálicas, entre ellos: planchas de acero, bobinas

de acero, planchas galvanizadas y bobinas galvanizadas (35% de la demanda total).

Los proyectos de la construcción y la autoconstrucción son los que generan una mayor demanda, pues representan el 40% de las ventas totales del mercado de acero en el Perú.

El mercado en el Perú es abastecido principalmente por dos empresas locales: Corporación Aceros Arequipa y Empresa Siderúrgica del Perú (Siderperú) complementado por un importante número de importadores y distribuidores locales. A lo largo de los años el consumo de acero en el Perú ha superando la producción nacional generando una brecha que ha tenido que ser cubierta por las importaciones tal como se muestra en la figura 2.3.

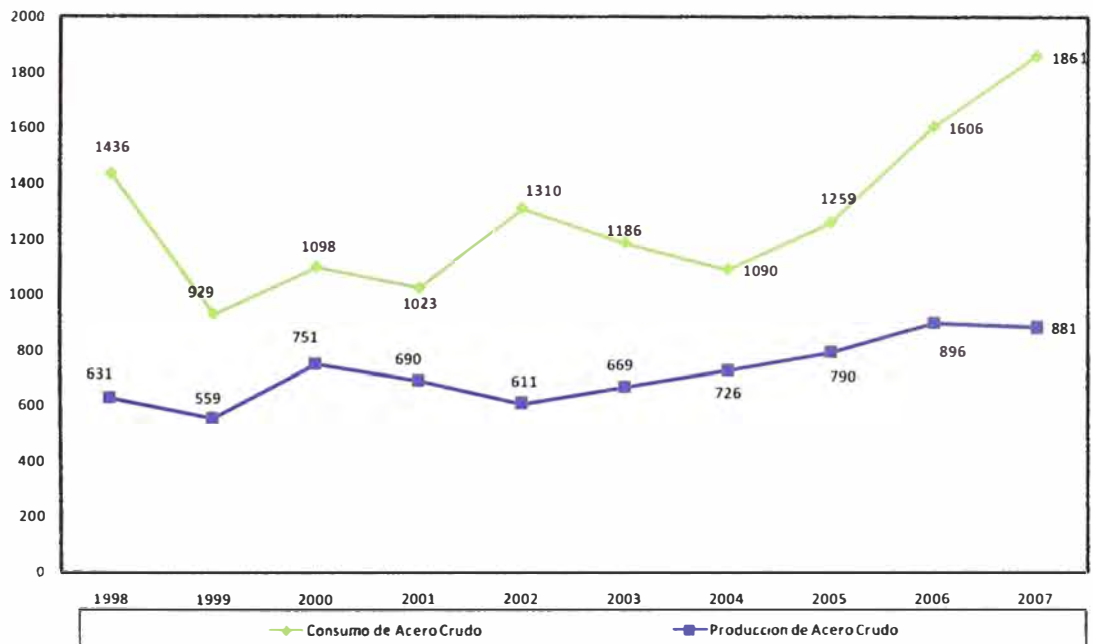


Figura 2.3: Producción y consumo de acero crudo en el Perú (miles de TM)

Fuente: Steel Statistical Yearbook 2008^[5]

Bajo lo escenarios actuales en que el acero presenta una balanza comercial negativa y que la demanda presenta una proyección positiva en su tasa de crecimiento son razones para que se invierta en la creación de mas plantas siderúrgicas o en aumentar la capacidad instalada de las plantas existentes.

2.2 Rutas para la producción de acero

En la actualidad y tal como se muestra en la figura 2.4 el acero es producido principalmente a través de dos rutas.

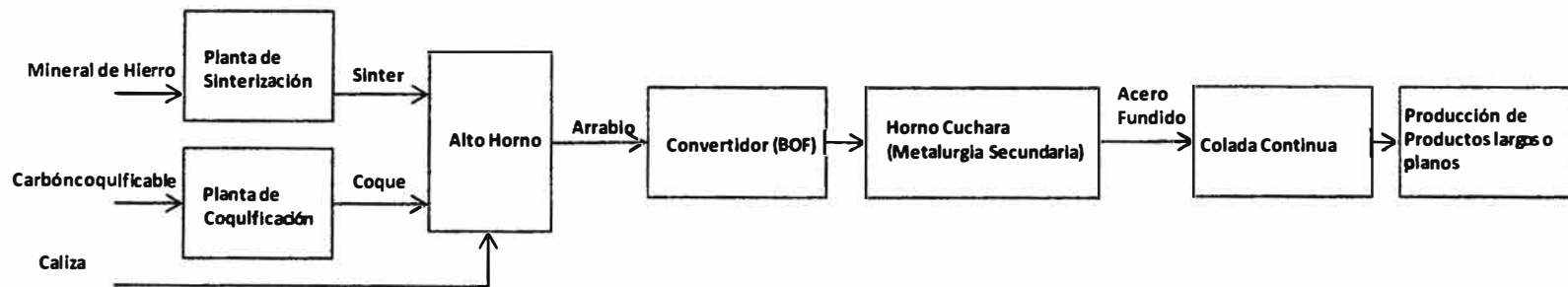
La ruta integrada, que esta basada en el Alto Horno y el Convertidor básico de oxígeno (BOF) emplea como materia prima: mineral de hierro, carbón y caliza. En el proceso, los finos del mineral de hierro son llevados a la planta de sinterización para su aglomeración en sinter, en tanto que el carbón es llevado a la planta de coquificación para ser transformado en coque. El coque y el sinter obtenidos son alimentados a los altos hornos donde el mineral de hierro es reducido y fundido por la quema de coque. El proceso es iniciado y acelerado por soplado de aire caliente a través del alto horno.

El producto obtenido a la salida del Alto Horno es un hierro líquido llamado arrabio (a una temperatura de aproximadamente 1400 °C); de allí es transportado hacia los convertidores para eliminar el exceso de carbón presente.

Las propiedades del acero líquido obtenido son mejoradas en el horno cuchara (metalurgia secundaria) por la adición de metales hasta obtener la calidad requerida, luego el acero es llevado a la planta de colada continua y solidificado en productos semiterminados como planchas para productos planos y palanquillas para productos largos.

La ruta *minimill*, basada en el Horno de Reducción Directa y el Horno de Arco Eléctrico emplea como materia prima: chatarra, mineral de hierro y caliza. El mineral de hierro es procesado en una planta de Reducción Directa para obtener el mineral de hierro reducido (DRI) en tanto que la chatarra usualmente es triturada. La chatarra y el DRI son alimentados al Horno de Arco Eléctrico (EAF) el cual mediante el uso de electricidad la transforma en acero líquido para este luego seguir un camino similar a la ruta anterior.

Ruta Integrada



Ruta Minimill

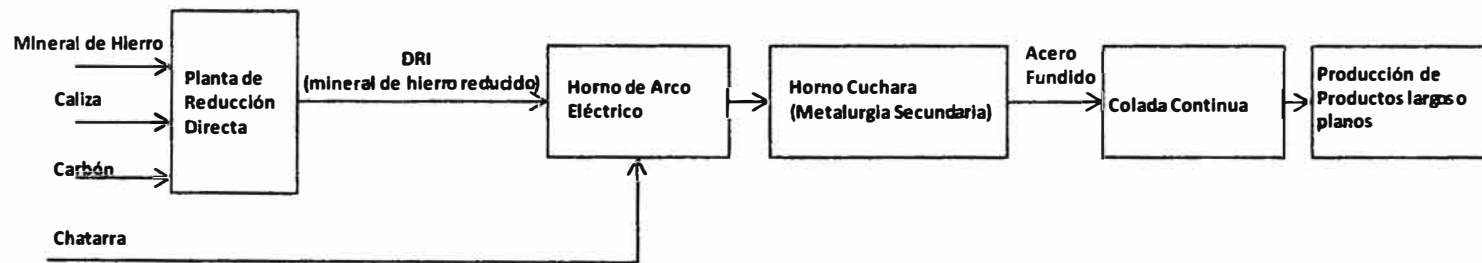


Figura 2.4: Rutas para la producción de Acero

Fuente: McKinsey^[6]

Las rutas principales para la producción de acero y su selección de una respecto a la otra ha ido variando a lo largo del tiempo, siendo actualmente las más utilizadas a nivel mundial la Ruta Integrada (Alto Horno – Convertidor de Oxígeno) tal como se muestra en la figura 2.5. En tanto que en nuestro país la Ruta *minimill* (Reducción Directa- Horno de Arco Eléctrico) es la que produce la mayor cantidad de Acero (figura 2.6).

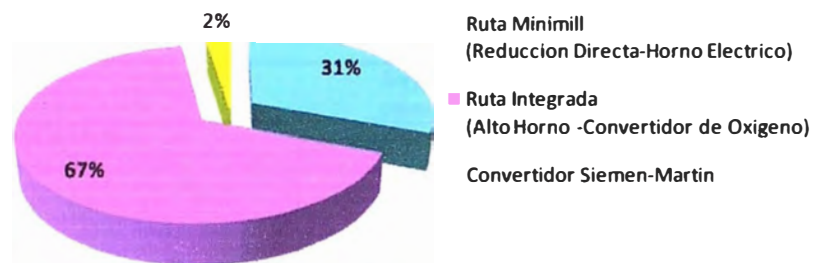


Figura 2.5: Producción de acero en el mundo por tipo de proceso (2007)

Fuente: Steel Statistical Yearbook 2008^[5]

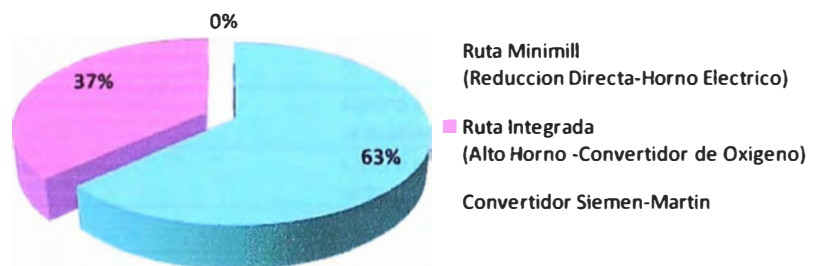


Figura 2.6: Producción de acero en el Perú por tipo de proceso (2007)

Fuente: Steel Statistical Yearbook 2008^[5]

2.3 Proceso de Reducción Directa

La reducción directa es el proceso mediante el cual se produce hierro sólido a partir de mineral mediante la utilización de gas natural o carbón que intervienen como agentes reductores. Los procesos de reducción directa en las diferentes tecnologías se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Procesos tecnológicos para reducción directa del hierro

TIPO	SITUACIÓN ACTUAL
HORNOS DE CUBA	
<i>Altos Hornos</i>	<i>Probado comercialmente</i>
<i>Corex</i>	<i>Probado comercialmente</i>
<i>Midrex</i>	<i>Probado comercialmente</i>
<i>Hylsa</i>	<i>Probado comercialmente</i>
<i>Tecnored</i>	<i>A Escala de Planta Piloto</i>
HORNOS ROTATORIOS	
<i>SL/RN</i>	<i>Probado comercialmente</i>
HEARTH ROTATORIOS	
<i>Redsmelt</i>	<i>En proceso de arranque en escala comercial o fase de demostración</i>
<i>Fastmet/Fastmelt</i>	<i>A Escala de Planta Piloto</i>
<i>Itmk3</i>	<i>A Escala de Planta Piloto</i>
<i>Inmetco</i>	<i>En proceso de arranque a escala comercial o fase de demostración</i>
<i>Iron Dynamics</i>	<i>En proceso de arranque a escala comercial o fase de demostración</i>
<i>MauMee</i>	<i>En proceso de arranque a escala comercial o fase de demostración</i>
LECHO FLUIDIZADO	
<i>Finmet</i>	<i>En proceso de arranque a escala comercial o fase de demostración</i>
<i>Circored</i>	<i>En proceso de arranque a escala comercial o fase de demostración</i>
<i>Circofer</i>	<i>A escala semipiloto</i>
<i>Nucor/ICH</i>	<i>Operó en escala comercial pero actualmente no esta en funcionamiento</i>
<i>Qualitech/Kawasaki</i>	<i>Operó en escala comercial pero actualmente no esta en funcionamiento</i>
<i>Procedyne</i>	<i>A escala semi-piloto</i>
OTROS	
<i>Hismelt</i>	<i>A Escala de Planta Piloto</i>
<i>Dios</i>	<i>A Escala de Planta Piloto</i>
<i>Romelt</i>	<i>A Escala de Planta Piloto</i>
<i>Gridsmelter</i>	<i>A escala semi-piloto</i>
<i>Comet</i>	<i>A escala semi-piloto</i>
<i>PlasmaRed</i>	<i>A escala semi-piloto</i>
<i>AISI/Cyclone</i>	<i>A Escala de Planta Piloto</i>

Fuente: Ironmaking Process Alternatives Screening Study¹⁷¹

En el presente informe la evaluación y ventajas de los procesos tecnológicos serán desarrolladas sobre aquellos procesos que han sido probados comercialmente y que actualmente tienen una gran demanda mundial.

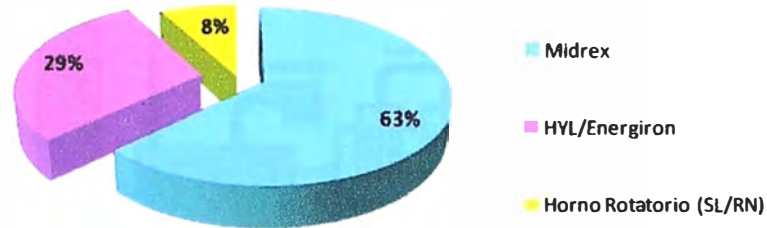


Figura 2.7: Producción mundial de hierro reducido (DRI) por proceso - 1989

Fuente: World Direct Reduction statistics^[8]

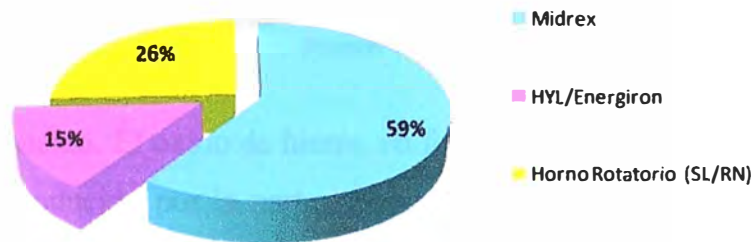


Figura 2.8: Producción mundial de hierro reducido (DRI) por proceso - 2008

Fuente: World Direct Reduction statistics^[8]

Como puede observarse en las figuras 2.7 y 2.8, la producción de mineral de hierro reducido (DRI) a través de Hornos Rotatorios (SL/RN) ha pasado desde un 8% en 1989 hasta un 26% en el 2008. Siendo la India el principal promotor en el desarrollo de dicha tecnología.

2.2.1. Proceso Midrex

El proceso MIDREX consta de tres etapas: 1) Reducción, 2) Reformación, y 3) Recuperación de Calor.

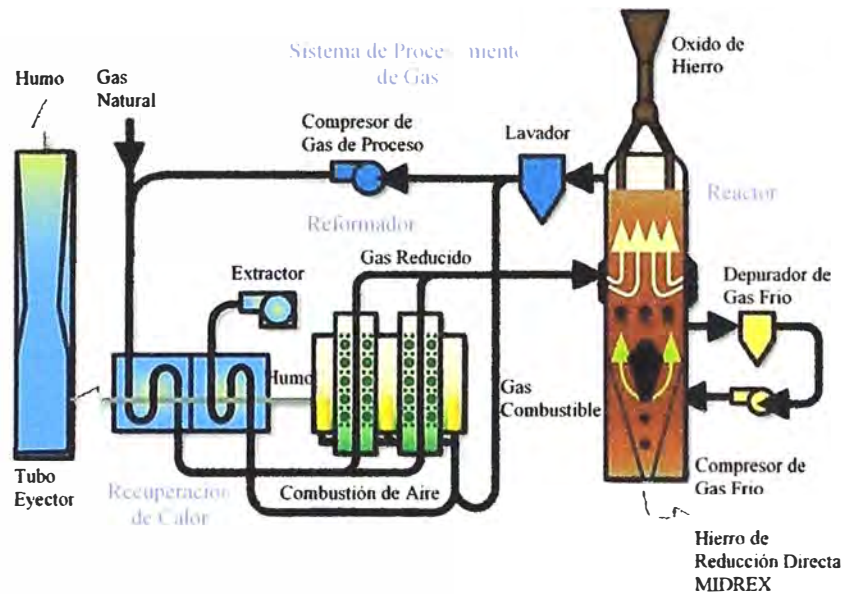
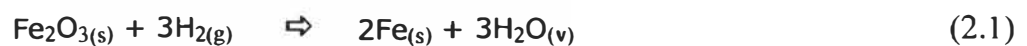


Figura 2.9: Diagrama del proceso Midrex

Fuente: Midrex Technology^[9]

Reducción. El óxido de hierro, en forma de *pellets* o de mineral de hierro, es introducido por la parte superior del horno a través de las tolvas. A medida que el material desciende dentro del horno por acción de la gravedad, es sometido a calor y el oxígeno es removido del hierro por acción de gases reductores que se mueven en contracorrientes (H_2 y CO_2).

Estos gases reaccionan con el Fe_2O_3 presente en el mineral de hierro y lo transforman en hierro metálico, dejando el H_2O y el CO_2 ($T=900^\circ C$ y $P=100$ KPa).



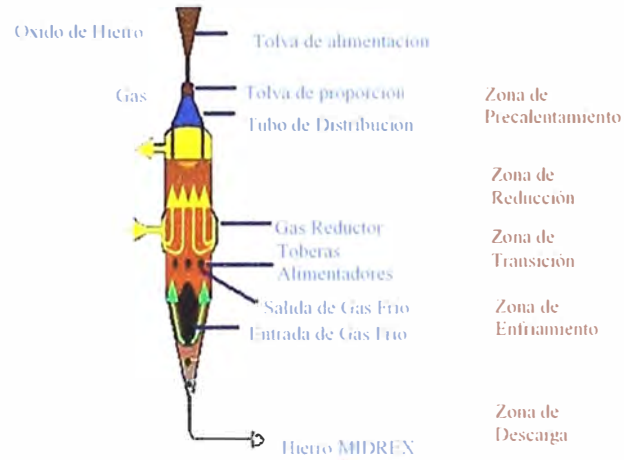
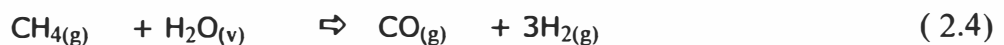
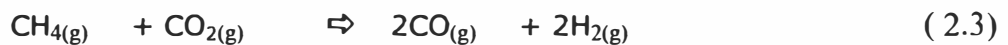


Figura 2.10: Etapa de reducción

Fuente: Midrex Technology^[9]

Reformador. Es un horno recubierto con material refractario y tubos de aleación llenos de catalizador. El gas es sometido a calor y reformado a medida que pasa a través de los tubos. Las reacciones que permiten llevar a cabo este proceso son las siguientes ($T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$):



Para maximizar la eficiencia en la reformación, los gases que han sido utilizados en el horno, son reciclados y mezclados con gas natural fresco.

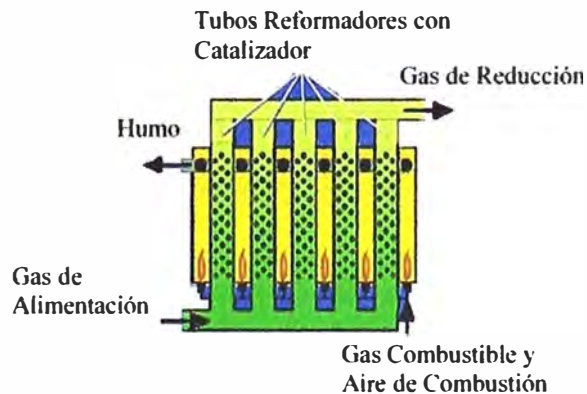


Figura 2.11: Etapa de reformado

Fuente: Midrex Technology^[9]

Recuperador de Calor. La eficiencia térmica del reformador MIDREX es mejorada principalmente debido al sistema de recuperación de calor. El calor sensible se recupera a partir del gas de humo del Reformador para precalentar el gas de alimentación, el aire de combustión hacia los Quemadores, y gas natural al proceso.

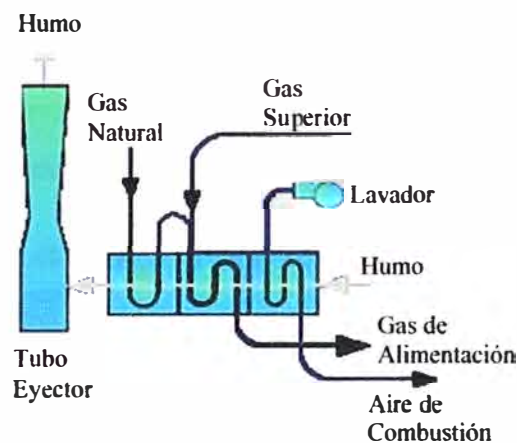


Figura 2.12: Etapa de recuperación de calor

Fuente: Midrex Technology^[9]

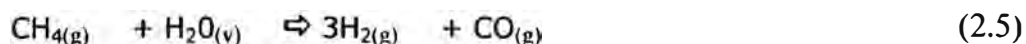
2.2.2. Proceso HYL-III

Este sistema consiste en suministrar mineral de hierro y reducirlo en un reactor a hierro líquido, mediante la utilización de una mezcla de gases de hidrógeno y monóxido de carbono previamente tratada en la sección de generación del gas reductor.

El proceso consta de tres circuitos principales:

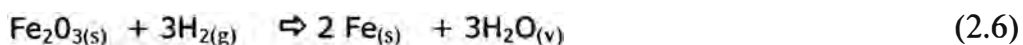
- Circuito de generación de gas reductor.
- Circuito de reducción de mineral de hierro.
- Circuito de enfriamiento.

Circuito de Generación de Gas Reductor. La finalidad de esta etapa es producir a partir de metano y agua, el hidrógeno y el monóxido de carbono que se emplea como agentes reductores del mineral de hierro. La reacción característica es:



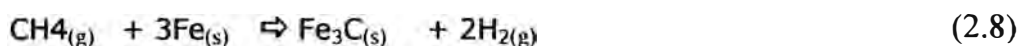
El gas natural se precalienta y se mezcla con vapor sobrecalentado, ingresando posteriormente al reactor (reformador) el cual consiste de una sección de radiación de calor y una serie de tubos de acero inoxidable, con catalizador de Níquel, donde se lleva a cabo la reacción de reformación.

Circuito de Reducción de Mineral de Hierro. Esta constituida por el reactor donde se lleva a cabo la reducción directa del mineral de hierro a través de las siguientes reacciones ($T=930^\circ\text{C}$ y $P=450$ KPa):



Los gases provenientes de la sección de generación ($320 - 420^\circ\text{C}$) se les elimina el vapor en exceso y son calentados hasta una temperatura entre 900 y 960°C antes de su ingreso al reactor, a continuación, en la zona de reducción (interior del reactor) se remueve el oxígeno del mineral de hierro por la acción de los gases reductores calientes. El gas generado en el reactor es recirculado a la línea de gases reductores (previamente se elimina el CO_2 por absorción).

Circuito de Enfriamiento. El enfriamiento del producto metalizado se lleva a cabo en la parte inferior del reactor donde, además de enfriarse, se carburiza. La reacción en esta etapa es la siguiente:



El gas natural utilizado para llevar a cabo la reacción se alimenta en la zona de enfriamiento a una temperatura entre 40 a 45°C , enfría y carburiza el producto y sale entre 490 y 540°C . Posteriormente, se lava y se pasa por el enfriador de gases para reciclarlo.

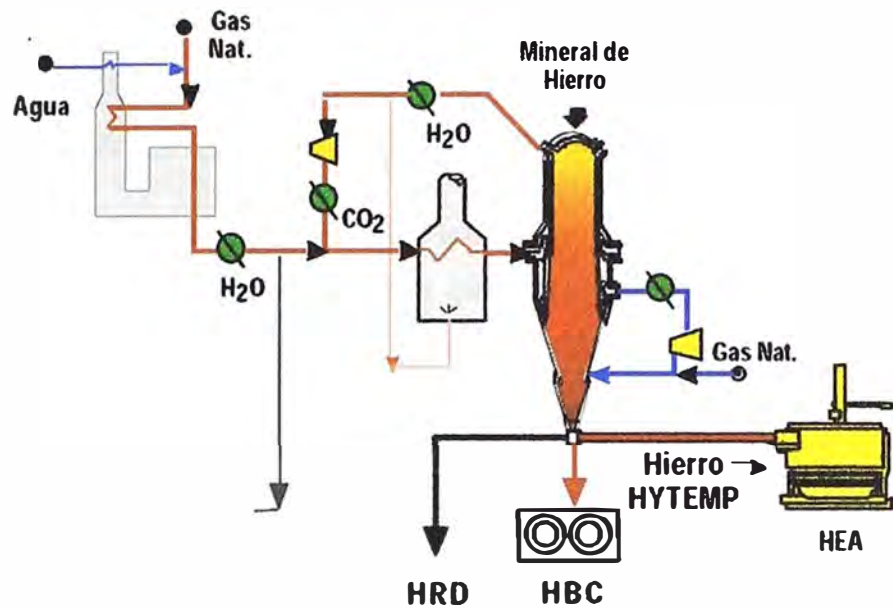


Figura 2.13: Esquema del proceso HYL III

Fuente: HYL Technology Division^[10]

2.2.3. Proceso de SL/RN

El horno rotatorio horizontal es alimentado con óxido de hierro (en la forma de mineral aglomerado o *pellets*), carbón (reductor) y caliza (absorbe el azufre del reductor). El horno rotatorio está inclinado desde la alimentación (parte elevada) a la descarga (parte más baja). La parte final, en la descarga, está provista de un quemador para ser usado en el arranque o para inyectar el reductor. Los tiempos de retención son alrededor de 10 horas. El horno rotatorio está dividido en dos regiones; precalentamiento y reducción. En la zona de precalentamiento las temperaturas oscilan entre 900 °C a 1000 °C.

Como el reductor es calentado, componentes volátiles son liberados y parte de los gases son quemados por inyección de aire en el horno rotatorio. Esta combustión transfiere calor a la carga directamente por radiación y también por conducción desde el recubrimiento del horno. La carga entonces pasa dentro de la zona de metalización o zona de

reducción donde la temperatura es mantenida cerca de 1000 °C a 1100 °C dependiendo el tipo de carga usada. La metalización final es cerca del 93% y el contenido de carbón cerca de 0,1 a 0,2 %. Después de dejar el horno el material remanente es separado en DRI , finos de DRI, char y dolochar.

Los gases de combustión desde los hornos los cuales contienen partículas de char y gases combustibles son quemados, pasados a través de un enfriador y un precipitador electrostático para finalmente ser venteado a la atmósfera.



Figura 2.14: Esquema del proceso SL/RN

2.2.3.1. Materias Primas e Insumos

Pellets y/o Mineral

Los *pellets* de mineral de hierro y/o mineral de hierro calibrado cumplen la función de aportar el contenido de hierro (Fe) en la forma de óxidos.

Composición Química

Hematita Fe_2O_3	70,0% Fe	30,0% O
Magnetita Fe_3O_4	72,4% Fe	27,6% O
Wustita FeO	77,7% Fe	22,2% O
Tamaños	3 ~ 25 mm	

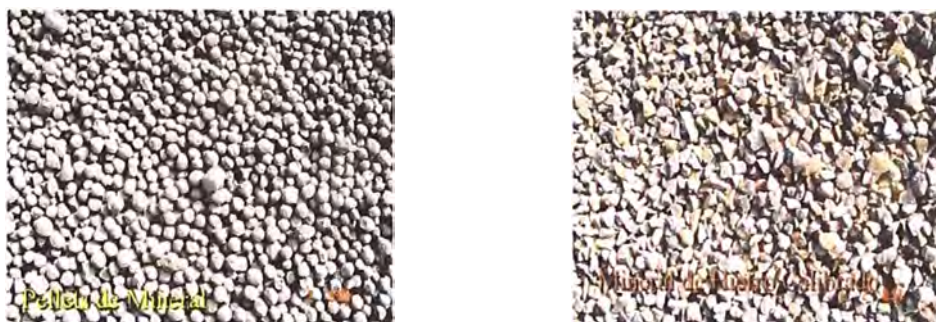


Figura 2.15: *Pellets* de mineral de hierro y mineral de hierro Calibrado(3-25 mm)

Carbón

Aporta el carbono para la generación de CO necesario para la reducción de los óxidos de hierro además de la energía requerida para el proceso de reducción directa.

Composición Química:

Humedad (H ₂ O)	:	11,9%	máximo
Materia Volátil	:	7,95%	máximo
Carbono Fijo	:	38,02%	mínimo
Cenizas	:	54,03%	máximo

Tamaños : 0 ~ 3 mm y 3 ~ 15 mm



Figura 2.16: Carbón bituminoso calibrado y antracita para chancado

Caliza Cálcica

Aporta los carbonatos (CaCO_3) para la formación de cal (CaO), el cual se encarga de absorber el azufre (S) del carbón e impedir que éste sea absorbido por el hierro esponja.

Composición Química:

H_2O	2,00 %	máximo
CaCO_3	97,00 %	mínimo
SiO_2	2,00 %	máximo
S	0,25 %	máximo

Tamaños 2 ~ 6,3 mm.



Figura 2.17: Caliza cálcica

2.2.3.2. Dosificación de Materias primas e insumos

Mediante el uso de balanzas de faja (weight feeders) y fajas de velocidad constante; la mezcla de los óxidos de hierro, el carbón y la caliza son dosificados a los hornos rotatorios. Las proporciones de las materias primas e insumos se determinan en función de la composición química.

La alimentación y la inyección de los materiales de la carga y del carbón se realizan de modo continuo para lo cual se dispone de un tubo de alimentación y un sistema neumático de inyección.

Faja dosificadora

Se emplea para dosificar la caliza, es de velocidad constante y lo que se regula es la altura de la cama del material alimentado.

Balanzas Dosificadoras (Weight Feeders)

Se emplean para alimentar e inyectar en proporciones adecuadas los óxidos de hierro (mineral o *pellets*) y el carbón (de alimento e inyección).

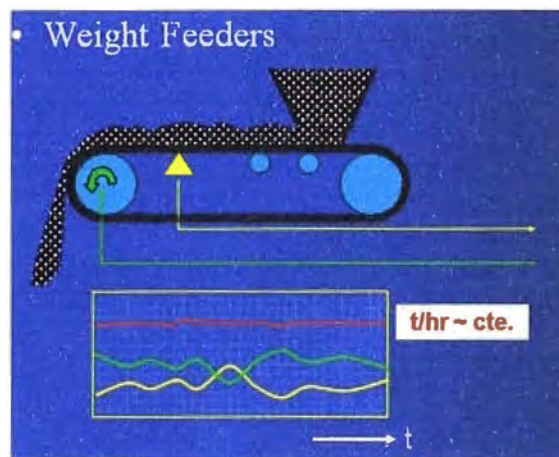


Figura 2.18: Balanza dosificadora

Ingreso de Materiales a los Hornos

Es un requerimiento del proceso que el sistema deba mantenerse presurizado (presión positiva) además de esto los hornos rotatorios deben mantenerse en movimiento en todo momento para evitar deformaciones del casco. Esto implica que se disponga de dispositivos apropiados para poder alimentar e inyectar de manera continua los distintos materiales.

Es importante que estos mecanismos eviten las fugas de gases y acarreo de partículas hacia el medio ambiente.

Tubo de alimentación y sistema de sellado

El alimento de los materiales de carga se realiza a través de un medio estático (tubo de alimentación) hacia uno en movimiento ó dinámico (horno rotatorio).

Las partículas ingresan al horno por efecto de la gravedad (caída a través de un tubo inclinado), mientras que una corriente de aire evita que las partículas más finas y los gases calientes del interior del horno escapen por el mismo.

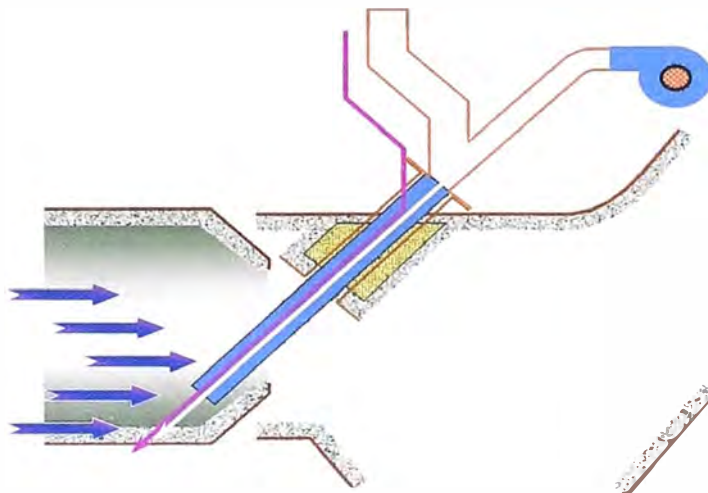


Figura 2.19: Tubo de alimentación y sistema de sellado

2.2.3.3. Equipos de proceso

Hornos Rotatorios

Son los reactores dentro de los cuales se lleva a cabo el calentamiento de los materiales y las reacciones de reducción de los óxidos de hierro.

El avance de los materiales en el interior es consecuencia de la inclinación (diferencia de altura entre la entrada y la salida) y la rotación de los mismos.

Para resistir las altas temperaturas, así como para minimizar las fugas térmicas, estos están recubiertos por material refractario en su interior.



Figura 2.20: Hornos rotatorios

Tabla 2.2: Características de un horno rotatorio (90 000 ton/año)

	Unidad	Característica
Longitud	m	40,0
Diámetro Interno	m	2,45 (N°1) 2,65 (N°2)
Refractario	m	0,20 (85% Al ₂ O ₃)
Carcaza	mm	25
Inclinación	%	2,5
Velocidad de Rotación	rpm	0,45 ~ 0,6
Ventiladores	-	7 + 1 quemador central
Peso (vacío)	ton	140 (N°1) 150 (N°2)

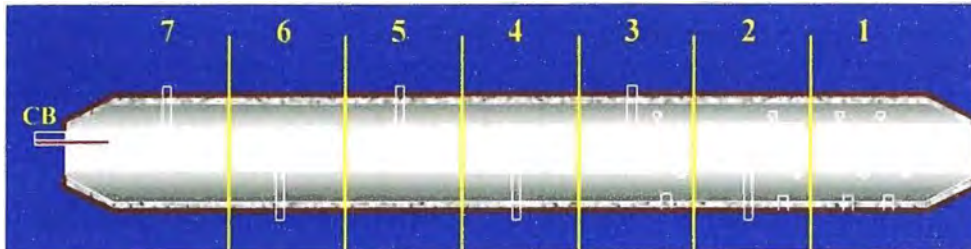


Figura 2.21: Sección Longitudinal del horno rotatorio



Figura : 2.22 Sección transversal del horno rotatorio

Enfriadores

Son del tipo rotatorios de baño externo de agua y tienen como función disminuir la temperatura de los materiales que salen del horno. Al igual que en los hornos, el avance de los materiales en el interior es consecuencia de la inclinación y de la rotación de los mismos.

Sólo llevan refractario en la llanta y cono de entrada. El resto es solamente chapa metálica para favorecer la transferencia de calor. A diferencia del horno, en el interior del enfriador se disponen de unos elevadores y en la salida se dispone de un trommel.

Tabla 2.3: Características de un enfriador rotatorio (90 000 ton/año).

	Unidad	Características
Longitud	m	21,0
Diámetro Interno	m	2,83 (ent.) 2,53 (sal.)
Refractario (parcial)	m	0,20 (85% Al ₂ O ₃)
Carcaza	mm	25 (ent.) 20 (sal.)
Inclinación	%	2,5 %
Velocidad de Rotación	rpm	0,7 ~ 0,9
Caudal de agua	m ³ /h	150 ~ 250
Peso (vacío)	ton	27 (Nº1) 27(Nº2)



Figura 2.23: Enfriador del horno rotatorio

Chimeneas

Son cámaras de Post Combustión, en las cuales mediante la inyección de aire se consigue “quemar” el CO de los gases residuales y los polvos combustibles provenientes de los hornos rotatorios.

Durante la etapa de Post Combustión los gases incrementan su temperatura, por lo que a veces es necesario inyectar agua (pulverizada) para controlar estas temperaturas.

En algunos casos los gases calientes del producto de la Post Combustión son empleados para generar energía eléctrica. Asimismo la presión de operación se logra controlar mediante el accionamiento de la tapa de la chimenea.



Figura 2.24: Chimenea de los hornos rotatorios

Separador Magnético

El material proveniente de la descarga de los enfriadores consta tanto de partículas magnéticas como no magnéticas, las cuales presentan una distribución de tamaños por lo que se utiliza una zaranda para separarlos en mayores y menores a 3mm.

Luego mediante un separador magnético y aprovechando las características de los materiales se consigue separar cada porción (los mayores y menores a 3 mm) en Magnéticas y No Magnéticas.

De este modo, quedan definidos 4 materiales los que son mayores a 3 mm (hierro esponja grueso y char) y los que son menores a 3mm (hierro esponja fino y dolochar)

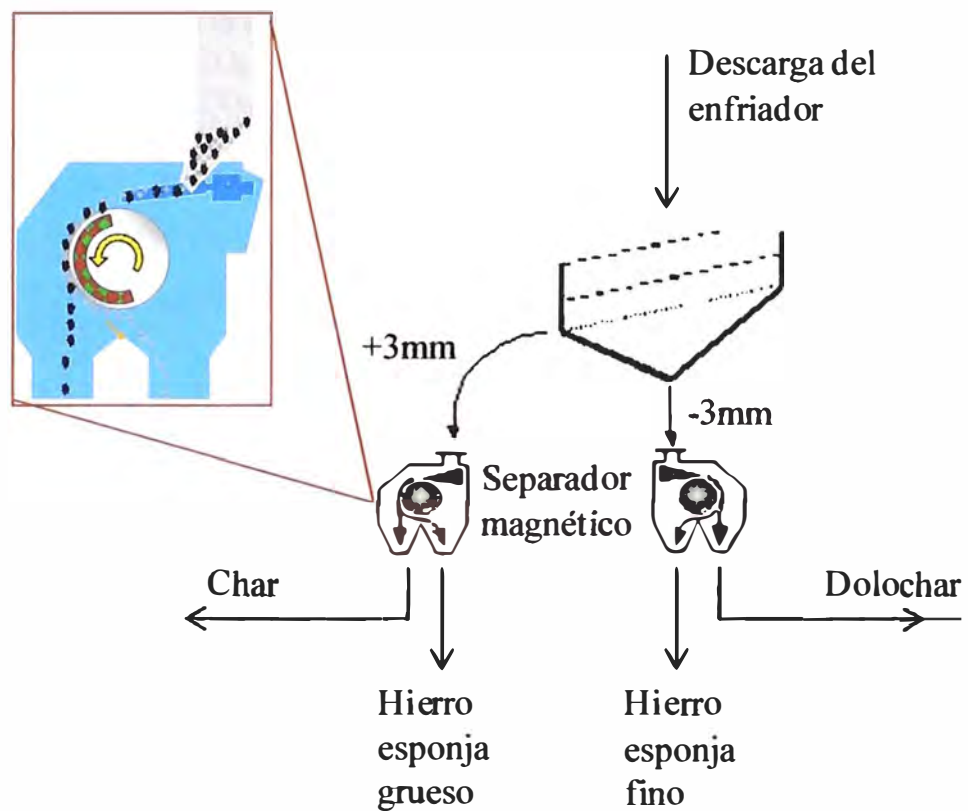


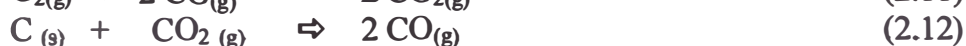
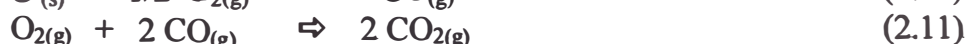
Figura 2.25: Separador magnético

2.2.3.4. Reacciones durante el proceso de reducción

Las diferentes reacciones que se producen durante el proceso de reducción directa tienen lugar en dos zonas; aquellas que se producen en el gas y que conducen a la formación del agente reductor (monóxido de carbono) la segunda zona que es la cama en la cual se

lleva a cabo una secuencia de reacciones que conducen a la reducción del mineral de hierro transformándola en hierro metálico ($T=1000^{\circ}\text{C}$).

Reacciones en el gas:



Reacciones en la cama:

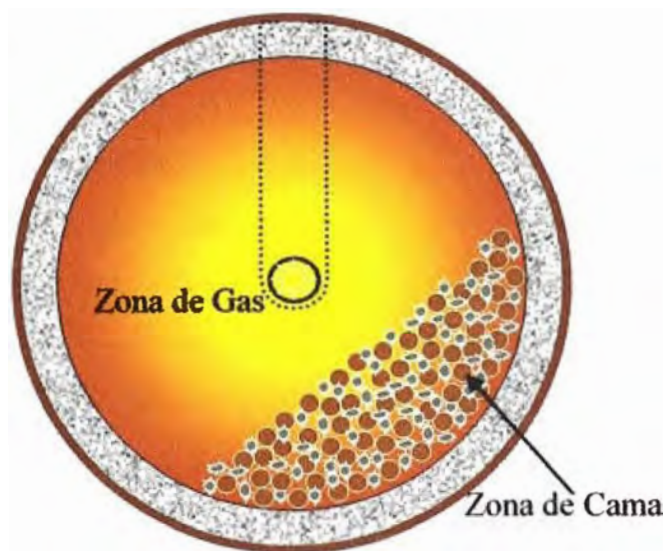
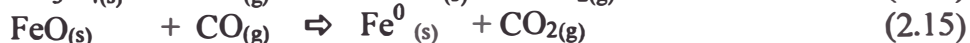
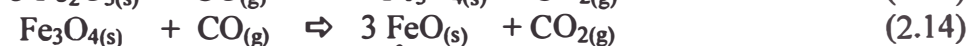
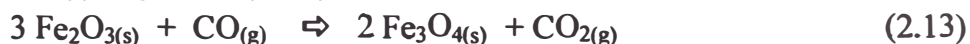


Figura 2.26: Zonas de reacción en el horno rotatorio

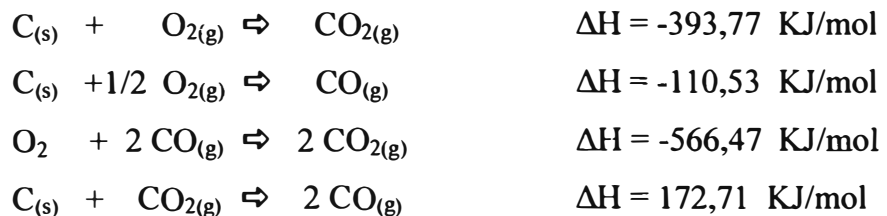
2.2.3.5. Requerimientos de energía en el proceso de reducción

Para la determinación de los requerimientos de energía se debe considerar que se necesita entregar energía para que se lleven a cabo las reacciones así como para compensar las pérdidas por radiación a través de la carcasa del horno y la fuga de calor con los gases que

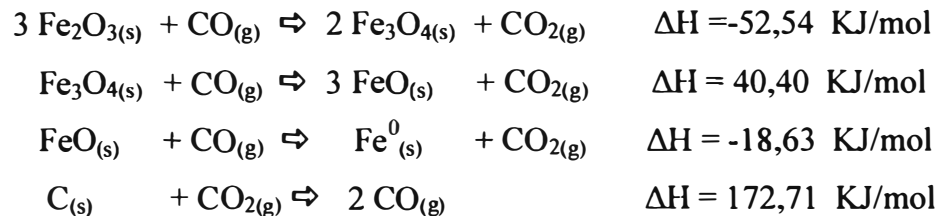
escapan del horno y salen por la chimenea, los cuales pueden ser usados en un intercambiador de calor para la generación de vapor, el mismo que es empleado para la generación de energía eléctrica.

La determinación de la cantidad de carbón necesario no está solamente en función del poder calorífico, ya que este está referido a una combustión completa, y por las características del proceso la energía útil (liberada dentro del horno) está gobernada por las reacciones de combustión incompletas (sólo hasta CO).

Reacciones en la zona de gas:



Reacciones en la zona de cama:



2.2.3.6. Sistema de refrigeración en el enfriador

Con el propósito de impedir la reoxidación del hierro esponja (que se encuentra a altas temperaturas) es necesario enfriarlo. En el enfriador se realiza un intercambio de calor con el agua de refrigeración, de modo indirecto a través de la carcasa.



Figura 2.27: Sistema de enfriamiento

2.2.3.7. Temperatura de operación en los hornos rotatorios

Para definir la temperatura de operación se debe tener presente el comportamiento de los óxidos de hierro a diferentes condiciones de temperatura y concentración de reductor. Este comportamiento es explicado a través de las curvas de Bourdouard y de Chaudron (véase figura 2.28); la curva de Bourdouard señala las proporciones teóricas de CO y CO₂ que pueden existir en el equilibrio a la presión atmosférica y a diferentes temperaturas, en un recinto cuando se encuentran mezclados esos dos gases en presencia de un exceso de carbono. En tanto que la curvas de Chaudron señalan las posibles reacciones teóricas que se pueden producir a diversas temperaturas entre los óxidos de fierro Fe₂O₃, Fe₃O₄ y FeO con diferentes proporciones de CO y CO₂. Es decir, estas curvas señalan las proporciones de CO que se deben rebasar para que se pueda producir a diversas temperaturas la reducción de los diferentes óxidos de hierro.

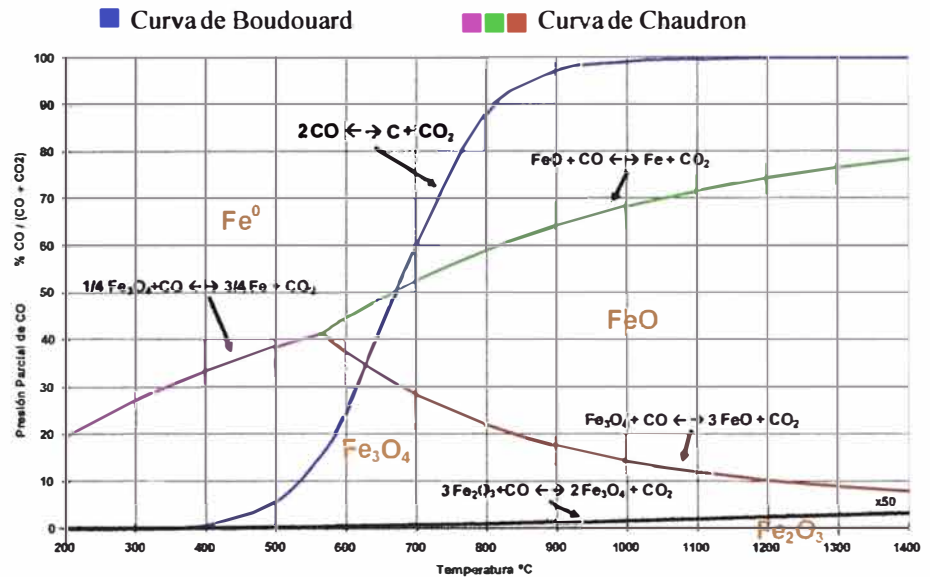


Figura 2.28: Estabilidad de los compuestos en función de la temperatura

Fuente: Termodinámica de la reducción de los óxidos de hierro con óxidos de carbono^[11]

A temperaturas superiores a 900°C que es la temperatura de operación en el reactor, la reducción de los óxidos de hierro por acción de mezclas de CO y CO₂ se realizan en tres etapas sucesivas, avanzando las transformaciones de la siguiente forma:



El control de la temperatura se consigue mediante el suministro continuo y controlado de aire a través de los tubos de viento, buzas y quemador central (también interviene el aire del sistema de inyección).

El aire es suministrado por 7 ventiladores que están dispuestos sobre la carcasa del horno y uno adicional para el quemador central (Figura 2.29). El control del suministro de aire se consigue mediante “Dampers” (válvulas graduadas). El perfil de temperatura a lo largo

del reactor es variable siendo menor en la zona de precalentamiento hasta alcanzar su máximo en la zona de reducción (Figura 2.30)

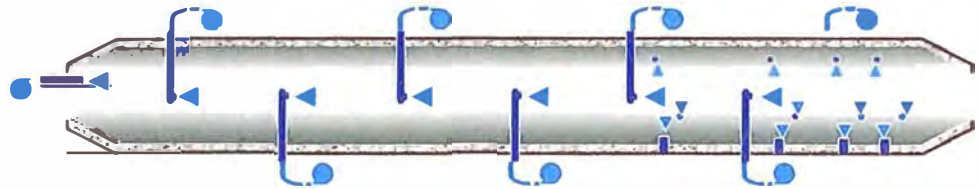


Figura 2.29: Distribución de los ventiladores en el horno rotatorio

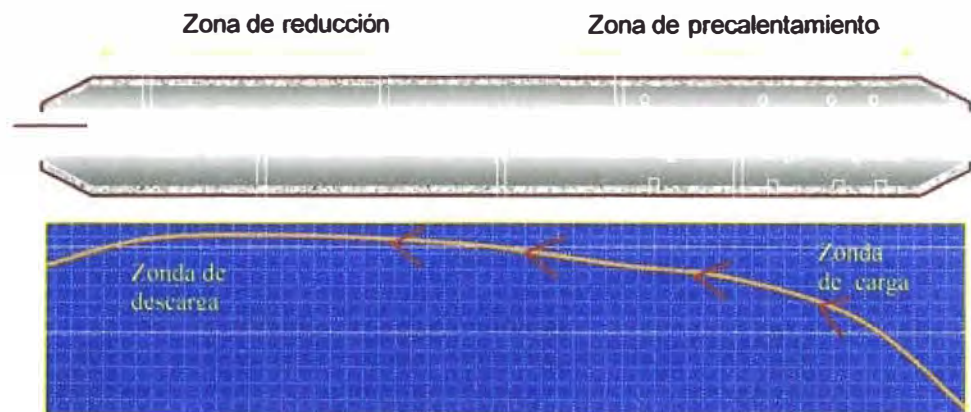


Figura 2.30: Perfil de temperatura longitudinal en el horno rotatorio

2.2.3.8. Limitaciones del proceso

- La formación de encostramientos internos, los mismos que impiden el paso del material originando “retornos de carga” determinan el tiempo de operación de los hornos rotatorios.
- Deposito de cenizas y finos (costras) sobre las termocuplas, impiden obtener una lectura real del interior del horno.
- Fusión del material en el interior cuando falla el suministro de carbón.

2.4 Proceso de fusión en el horno de arco eléctrico

El proceso de fusión tiene lugar en el horno de arco eléctrico a partir de una carga constituida mayoritariamente por chatarra y mineral de hierro reducido (conjuntamente un 80% al menos). En este caso la energía empleada para la fusión no es de origen químico sino fundamentalmente eléctrico, proviene de un arco eléctrico que se forma entre los electrodos que se introducen por la parte superior del horno. Luego de esto se toma una muestra, se lleva a laboratorio y con ayuda de un espectrofotómetro se determina la composición química para verificar que esta de acuerdo al tipo de acero requerido. Generalmente es necesario hacer algunos ajustes en su composición lo cual tiene lugar en el horno cuchara.

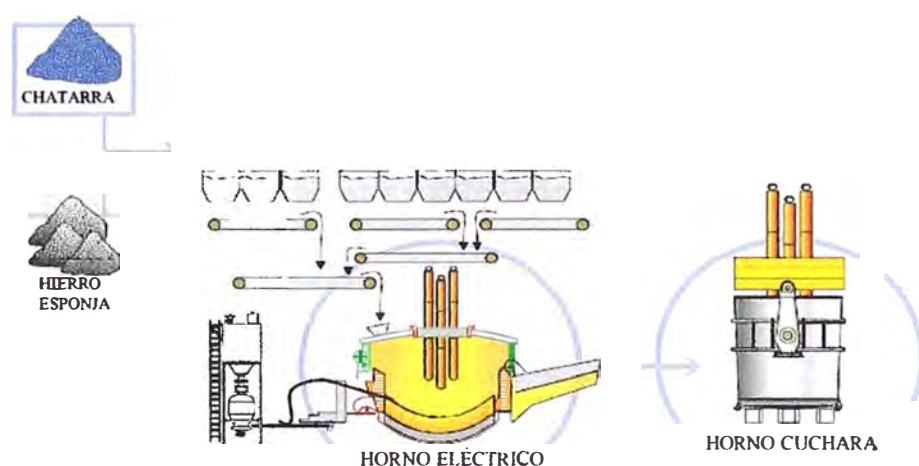


Figura 2.31: Esquema del proceso de fusión en el horno de arco eléctrico

2.5 Proceso colada continua

Proceso en el cual el acero líquido de la cuchara es vertido a un recipiente a una velocidad controlada, pasando luego a un molde de sección cuadrada. Las paredes del molde se lubrican para que el acero no se adhiera y se mantiene frías refrigerándolas con serpentines de agua. El molde además se hace vibrar para ayudar a que el acero se deslice. El molde no tiene tapa inferior por que

el acero solidificado en el extremo inferior, sirve como tapa. Después de pasar por el molde, el acero, ya solidado pero al rojo vivo, pasa por una serie de rodillos que lo jalan hasta llegar a un equipo de oxicorte automático la cual la corta en tramos de longitud deseada llamadas palanquillas.

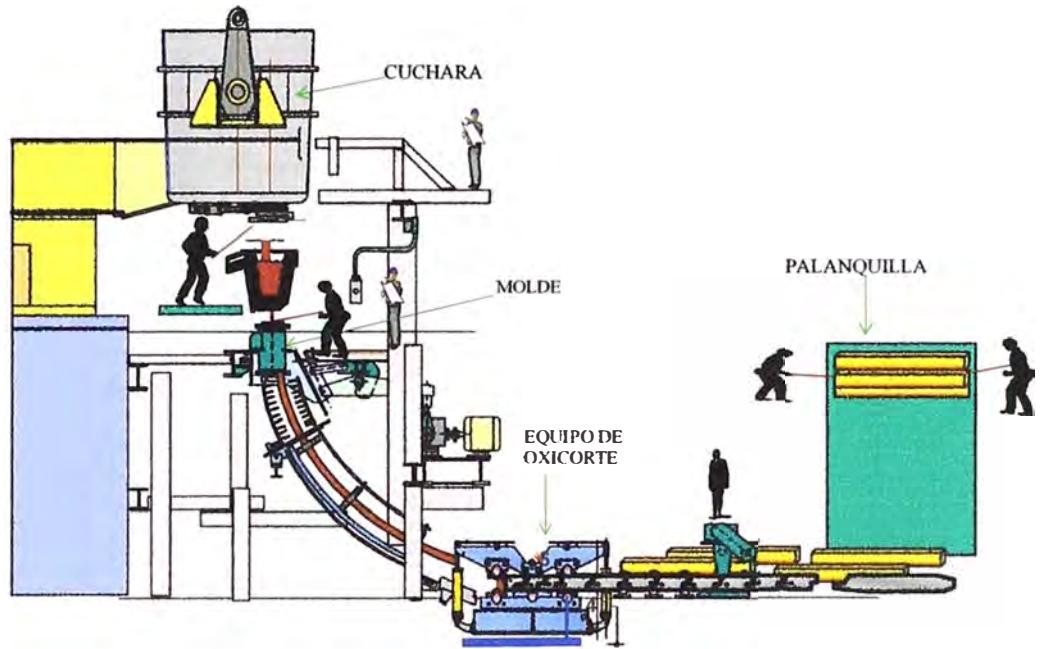


Figura 2.32: Esquema del proceso de colada continua

2.6 Proceso de laminación en caliente

Consiste en hacer pasar un material (palanquilla) entre dos rodillos o cilindros, que giran a la misma velocidad y en sentido contrario, para reducir su espesor mediante la presión ejercida. Dado que el volumen permanece constante, el material experimentará un alargamiento que será directamente proporcional a la disminución de espesores entre la entrada y la salida. El proceso de laminado en caliente permite la obtención de productos tales como: barras corrugadas, ángulos, cuadrados, tees, redondos lisos, alambrones, barras helicoidales (véase figura 2.33).

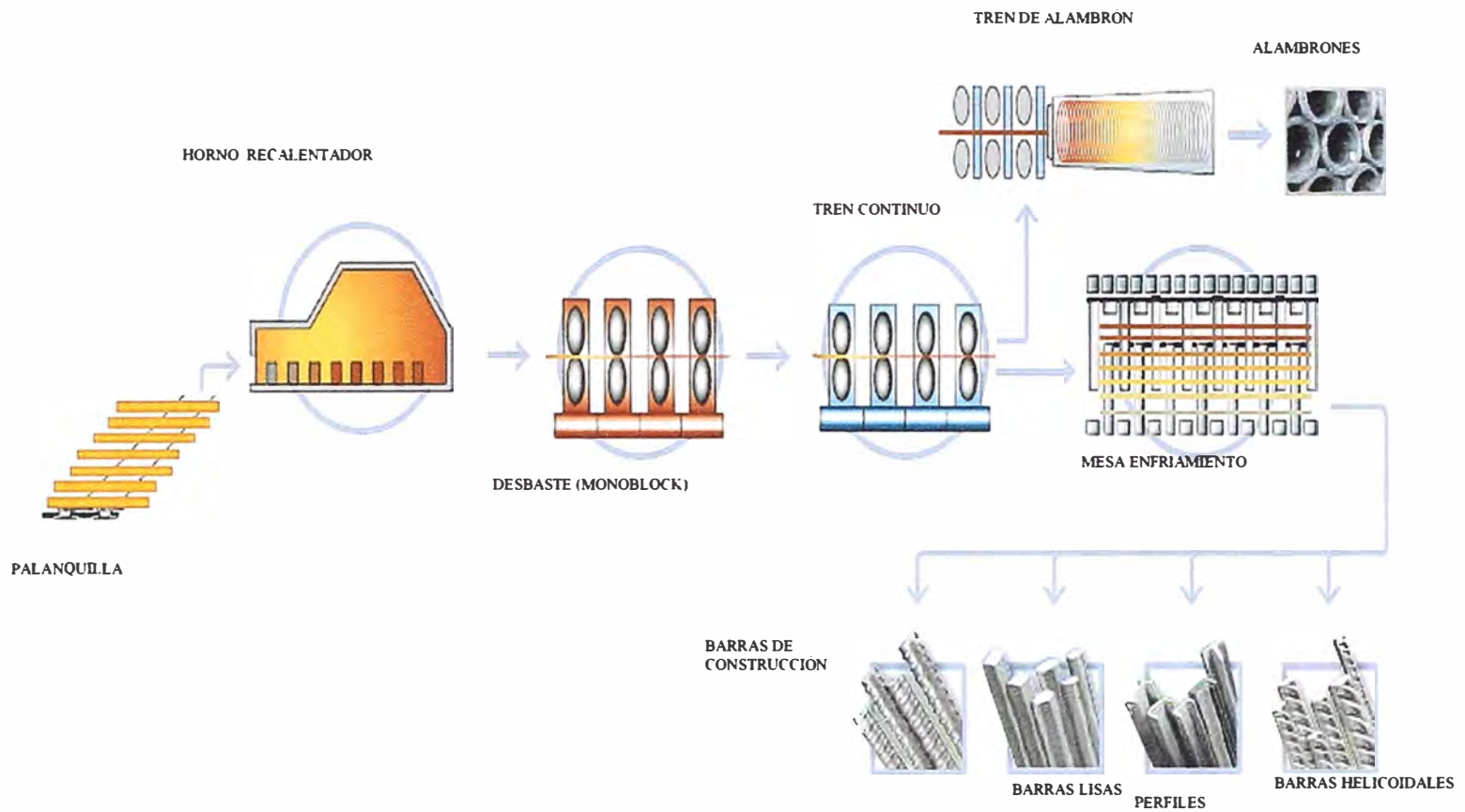


Figura 2.33: Esquema del proceso de laminación

III.DESARROLLO DEL TEMA

3.1 Aspectos ambientales en la producción de acero a través de las diferentes rutas (*integrada* y *minimill*).

Las actuales proyecciones de crecimiento de la producción mundial de acero hacen prever que las emisiones inevitablemente superaran los niveles actuales; por lo que debe buscarse un enfoque global del sector siderúrgico a fin de afrontar este desafío.

Los avances tecnológicos en los últimos 25 años han permitido alcanzar los siguientes resultados:

- Reducciones sustanciales de emisiones de CO₂.
- Una mayor eficiencia energética del proceso de fabricación de acero.
- Tasas más altas de reciclaje y utilización de productos de acero.
- Mayor reciclaje de los subproductos siderúrgicos.
- Mejores técnicas de protección ambiental.

No obstante a las tecnologías eficientes aplicadas por la industria siderúrgica moderna, aún le falta avanzar hacia una mayor reducción de las emisiones de CO₂, por lo que uno de los objetivos de dicha industria debe ser el desarrollo de nuevas tecnologías y optar por aquellas cuyo impacto sea mínimo.

3.1.1. Reciclaje

Según una publicación hecha por la Steel Recycling Institute (2008 The Inherent Recycled Content of Today's Steel) el consumo de la chatarra en la industria siderúrgica depende de la ruta que se sigue para la obtención de acero siendo estas: La **ruta integrada** usa a través del convertidor (BOF) el 25 a 35 por ciento de chatarra para hacer acero nuevo en tanto que la **ruta *minimill*** hace uso de la chatarra en el horno de arco eléctrico (EAF) en una proporción igual al 80%.

Según las estimaciones del International Iron and Steel Institute (publicación: El Acero y Tú), a octubre del año 2007 se habían reciclado 20 mil millones de toneladas de acero. El acero puede ser reciclado en un 100% e infinitamente sin que pierda su calidad. Es uno de los pocos materiales que no pierde sus propiedades cuando es reciclado. ^[13]

La creación de nuevo acero a partir de acero reciclado en lugar de mineral de hierro reduce las emisiones de CO₂. En 2006, el acero reciclado representó más de un 40% (o 496 millones de toneladas métricas) de los 1240 millones de toneladas de acero producido, por lo que dejaron de emitirse aproximadamente 894 millones de toneladas métricas de CO₂. El acero reciclado es tan resistente y durable como el acero nuevo fabricado a partir de mineral de hierro. ^[14]

Reciclar acero ahorra energía y recursos naturales. En otra de sus publicaciones la Steel Recycling Institute (Publicación: BUY RECYCLEDWITH RECYCLABLE STEEL) En un año la industria del acero ahorro el equivalente de energía para abastecer cerca de 18 millones de hogares de familia por un año. Cuando una tonelada de acero es reciclado, 2 500 lb de mineral de hierro, 1 400 lb de carbón y 120 lb de caliza son conservados. Al hacer reciclaje a en la industria del acero se incentiva a la recolección y venta de dicho material. Cada año mas del 62% de acero domestico producido es reciclado.

Las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 muestran como ha ido evolucionando la tasa de reciclaje de la chatarra de las diferentes industrias.

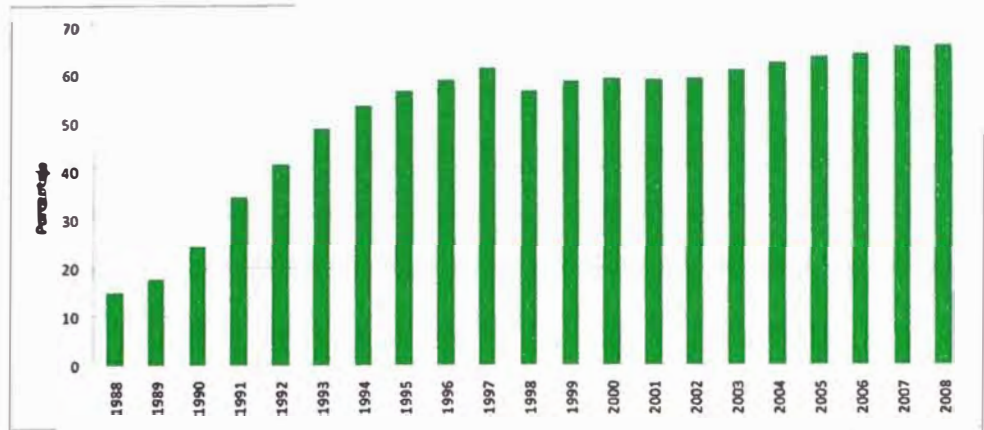


Figura 3.1: Tasa de reciclaje de en la industria del automóvil (%)

Fuente:Steel Recycling Rates at Glance^[15]

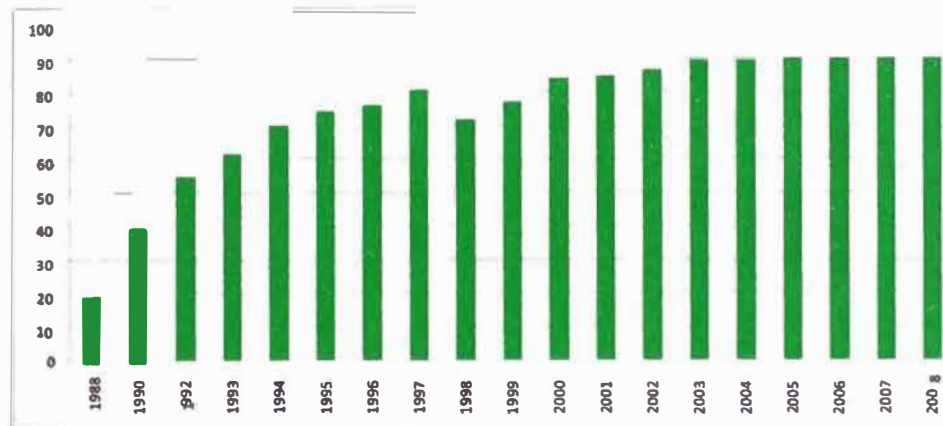


Figura 3.2: Tasa de reciclaje de embases metálicos (%)

Fuente:Steel Recycling Rates at Glance^[15]

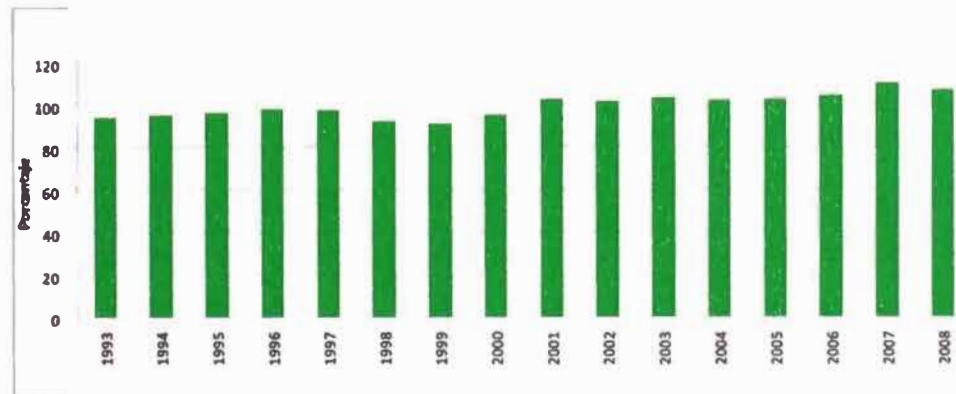


Figura 3.3: Tasa de reciclaje de artefactos metálicos (%)

Fuente:Steel Recycling Rates at Glance^[15]

3.1.2. Consumo de Energía

El consumo de energía forma parte importante de los costos de manufactura del acero razón por la cual muchas empresas han conseguido mejorar la eficiencia y logrado bajar su consumo dentro sus procesos, a pesar de esto y tal como lo muestra la figura 3.4 el consumo de energía vía la ruta integrada sigue siendo mucho mayor a la ruta *minimill*.

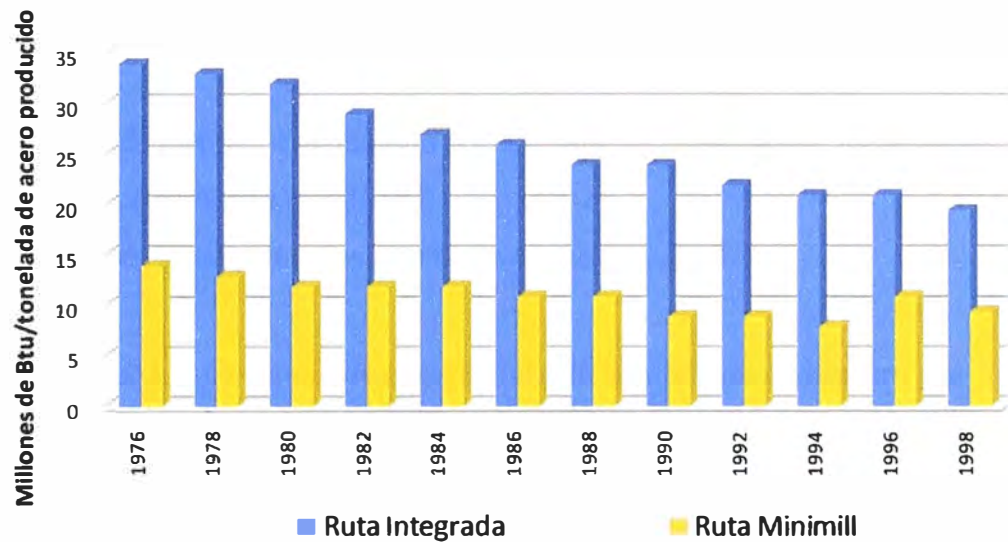


Figura 3.4: Consumo Promedio de Energía en la ruta integrada y *minimill*

Fuente: Energy and Environmental Profile of the U.S. Iron and Steel Industry^[16]

Según el American Iron and Steel Institute (AISI) y tal como lo muestra la figura 3.5, la industria siderúrgica de los Estados Unidos logró bajar su consumo anual de energía en mas de 60%. Esto se consiguió principalmente por una mayor producción de acero en los Hornos de Arco Eléctrico (ruta *minimill*) y un mayor reciclaje de acero en las acerías de Hornos Básicos de Oxígeno (mayor consumo de chatarra).

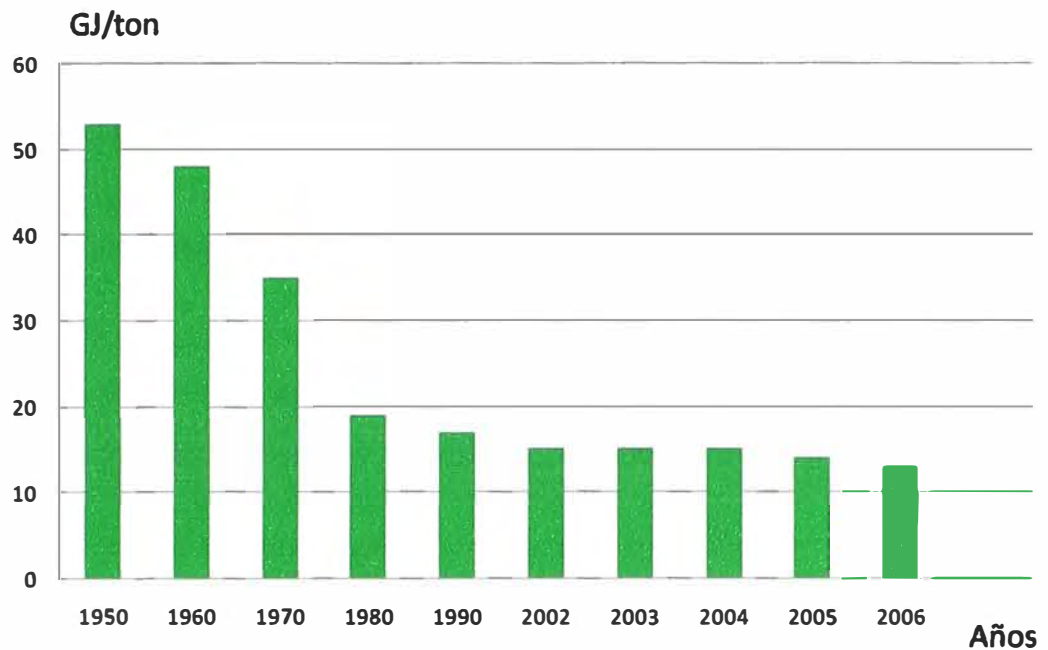


Figura 3.5: Consumo de energía por tonelada de acero despachada por la industria siderúrgica en EE.UU.

Fuente: 2008 Sustainability Report of the world steel industry^[3]

Tabla 3.1: Consumo de energía durante la producción de acero por etapas a través de la ruta integrada.

<i>Procesos</i>	<i>Consumo de energía (MBtu/ton de acero producido)</i>
<i>Producción de Hierro en el alto horno</i>	<i>14,88</i>
<i>Producción de acero/Colada</i>	<i>1,42</i>
<i>Laminación en caliente</i>	<i>0,33</i>
<i>Laminación en frío</i>	<i>1,05</i>
<i>Plate/Structural</i>	<i>0,45</i>
<i>Galvanizado por inmersión en caliente.</i>	<i>1,32</i>
<i>Electro galvanizado</i>	<i>0,42</i>
<i>Revestimiento de protección</i>	<i>0,55</i>
<i>Otros</i>	<i>0,24</i>
<i>Consumo total por la producción de una tonelada de acero.</i>	<i>20,66</i>

Fuente: Energy use in the U.S. Steel Industry: An Historical Perspective and Future Opportunities ^[17]

De acuerdo al Departamento de Energía de los Estados Unidos el consumo de energía en la ruta integrada es en promedio 20,66 MBtu/t de acero producido siendo la etapa de mayor consumo la producción de hierro en los altos hornos con un total de 14,88 MBtu/t (véase tabla 3.1).

En tanto que en la ruta *minimill* el consumo promedio es de 9.51 MBtu/t, presentando un mayor consumo en la etapa de fusión en el horno de arco eléctrico con un total de 7.44 MBtu/t (ver tabla 3.2).

Tabla 3.2. Consumo de energía durante la producción de acero por etapas a través de la ruta *minimill*.

<i>Procesos</i>	<i>Consumo de energía (MBtu/ton de acero producido)</i>
<i>Producción de acero en horno de arco electrico/Afino en horno cuchara/colada</i>	<i>7,44</i>
<i>Laminación en caliente</i>	<i>0,7</i>
<i>Laminación en frio</i>	<i>0,32</i>
<i>Tratamiento especial</i>	<i>0,85</i>
<i>Galvanizado</i>	<i>0,2</i>
<i>Consumo total por la producción de una tonelada de acero.</i>	<i>9,51</i>

Fuente: Energy use in the U.S. Steel Industry: An Historical Perspective and Future Opportunities^[17]

3.1.3. Emisiones de gases contaminantes

La producción de acero viene acompañado por la generación de gases que contribuyen al llamado efecto invernadero siendo el mas relevante el CO₂. Se estima que por cada tonelada de acero producido se emite un promedio 1,7 toneladas de dióxido de carbono. (Fuente: 2008 Sustainability Report of the world steel industry).^[3]

Según la International Energy Association (IEA), la industria del hierro y del acero es responsable de aproximadamente un 4% - 5% del total de las emisiones mundiales de CO₂.^[3]

Más de un 90% de las emisiones de CO₂ de la siderurgia provienen de la producción de acero en nueve países o regiones: Brasil, China, la Unión Europea, India, Japón, Corea, Rusia, Ucrania y EE.UU.

Es de esperarse que el efecto que tendrá las regulaciones ambientales en la industria del acero esté en función a la cantidad de CO₂ emitida, el cual a su vez variara teniendo en cuenta que existen dos rutas para la obtención del acero. Las emisiones generadas tanto en la ruta Integrada como en la ruta *minimill* son mostradas en la tabla 3.3. Tal como puede observarse cada ruta a su vez esta constituida por una serie de etapas, en lo referente a la ruta integrada la etapa de reducción del mineral de hierro en los altos hornos es la que genera la mayor cantidad de monóxido de carbono. En tanto que en la ruta *minimill* lo es en los hornos de arco eléctrico.

Tabla 3.3. Generación promedio de CO₂ durante la producción de acero a través de sus diferentes rutas (integrada y *minimill*)

<i>Procesos</i>	<i>Ruta integrada</i>		<i>Ruta minimill</i>	
	lbs CO ₂ /ton steel	metric ton CE/ metric ton steel	lbs CO ₂ /ton steel	metric ton CE/ metric ton steel
Sinterización	69	0,009	N/A	N/A
Coquificación	102	0,014	N/A	N/A
Producción de hierro en el alto horno	2000	0,273	N/A	N/A
Producción de acero en el convertidor (BOF)	490	0,067	N/A	N/A
Producción de acero en el horno de arco eléctrico	N/A	N/A	1012	0,138
Afino en el horno cuchara	78	0,011	141	0,019
Colada continua	39	0,006	39	0,006

Fuente: Energy and Environmental Profile of the U.S. Iron and Steel Industry^[16]

Una visión más global de la cantidad de CO₂ que pueden generar cada una de estas rutas lo muestra la figura 3.6, Según esto la ruta minimill (reducción directa – horno de arco eléctrico) sería la que generaría una menor cantidad de este contaminante de manera directa (durante el proceso)

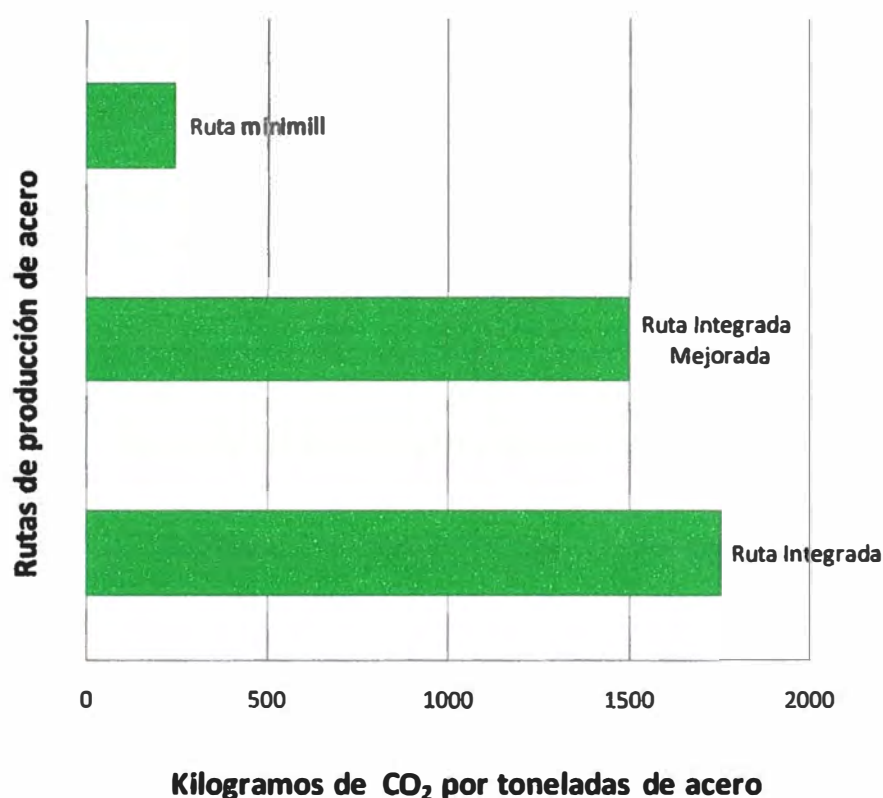


Figura 3.6: Emisiones de CO₂ por tonelada de acero

Fuente: Sectoral approaches to greenhouse gas mitigation Exploring issues for heavy industry^[18]

Otros de los contaminantes que acompañan la producción de acero son: óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado, así como también los llamados compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Las emisiones de SO_x provienen principalmente del azufre contenido en los concentrados de mineral de hierro y el carbón. Las emisiones de NO_x provienen sobre todo por el proceso de combustión en los hornos de coque, las plantas de sinterización y los hornos de recalentamiento de los

laminadores. El agua se usa principalmente para enfriamiento. La tabla 3.4 muestra de manera detallada un estimado de los diferentes contaminantes generados durante la producción de acero siguiendo la ruta integrada. Si comparamos estos datos con los mostrados en la tabla 3.5 (ruta minimill) notamos que los contaminantes generados en la primera ruta superan a la segunda, siendo la reducción del hierro en el alto horno la etapa de mayor generación.

Tabla 3.4. Emisión de contaminantes a través de la ruta integrada.

<i>Procesos</i>	<i>Contaminantes (lbs/ton steel)</i>				
	SOx	NOx	CO	Partículas	VOCs
Sinterización	0,676	0,258	0,083	0,194	0,001
Coquificación	--	--	--	--	--
Producción de hierro en el alto horno.	26,470	10,270	3,267	7,624	0,062
Producción de acero en el convertidor	0,320	0,165	0,050	0,089	0,003
Refinación el horno cuchara	0,469	0,220	0,067	0,130	0,003
Colada continua	0,421	0,160	0,051	0,116	0,001

Fuente: Energy and Environmental Profile of the U.S. Iron and Steel Industry^[16]

Tabla 3.5. Emisión de contaminantes a través de la ruta *minimill*.

<i>Procesos</i>	<i>Contaminantes (lbs/ton steel)</i>				
	SOx	NOx	CO	Partículas	VOCs
Producción de acero en el horno de arco eléctrico.	6,638	2,546	0,813	1,832	0,020
Refinación en el horno cuchara	1,407	0,548	0,174	0,388	0,004
Colada continua	0,421	0,160	0,051	0,116	0,001

Fuente: Energy and Environmental Profile of the U.S. Iron and Steel Industry^[16]

3.1.4. Escoria

La escoria generada durante la producción de acero ha conseguido diversas aplicaciones industriales siendo utilizada en carreteras, cemento y agricultura principalmente.

En la ruta integrada la generación de escoria se presenta en dos etapas uno es la reducción del hierro en los altos hornos la cual genera en promedio 460 lb por tonelada neta de hierro fundido y otro es en los convertidores (BOF) en la que se produce 200 a 440 lbs de escoria por cada tonelada de acero producido.

La escoria de los altos hornos tiene un bajo contenido de hierro y encuentra gran utilización en una amplia variedad de aplicaciones comerciales (mayormente en la manufactura de cemento, concreto y construcción de caminos aunque hay algunas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta con relación a su contenido de azufre).

En tanto las escorias de los convertidores (BOF) son utilizadas en las operaciones de sinterización y en los altos hornos sin embargo su uso es restringido por límites de requerimiento de niveles de fósforo en el metal fundido. Como un resultado las plantas con instalaciones de sinterización consumen el 40% de escoria generada en los convertidores BOF. También encuentra aplicaciones como agregados en la construcción de camino y en la manufactura de cemento Portland.

La escoria del BOF ha tenido un uso comprobado en agricultura en el Oeste de Europa y ha sido encontrado que tiene un valor neutralizante equivalentes a la caliza, pero con beneficios adicionales atribuidos a la presencia de P_2O_5 y algo de elementos y trazas de elementos (EC Report 1988).

Una potencial aplicación es usar la escoria como un ingrediente en la fabricación de vidrio.

El otro camino que conduce a la producción de acero es la **“ruta *minimill*”** la cual genera escoria en el horno de arco eléctrico; se estima por cada tonelada de acero producido en el horno de arco eléctrico, cerca de 125 a 200 libras de escoria son generados. Estas escorias son algo diferentes de aquellos generados en los BOF en términos de composición, opciones de uso comercial y propósitos de reciclaje.

Hay una falta de oportunidades de re-uso dentro de la misma planta, pero una parte de esta escoria actualmente encuentra aplicaciones en la industria y la construcción. Conforme a lo mencionado anteriormente, hay ejemplos de uso de la escoria de los hornos de arco eléctrico en plantas de cemento con ahorros impresionantes en costos de energía (10 a 15%). Además el valor de la escoria se incrementa en 20 veces, con respecto a su valor al ser usado en la construcción de caminos y por ultimo se consigue una importante ventaja en la reducción de dióxido de carbono durante la producción del cemento (proceso CemStar).

La tabla 3.6 muestra que la ruta integrada genera una cantidad mayor de escoria que la ruta *minimill*. Asimismo en lo que respecta a la ruta integrada la escoria generada en la etapa de alto horno consigue ser reutilizada casi al 100% en tanto en el convertidor la tasa es menor al 50%.

Tabla 3.6: Generación de Escoria durante la Producción de Acero

	<i>Producción de escoria</i>	<i>Tasa de uso</i>	<i>Aplicación industrial</i>
<i>Ruta Integrada</i>			
<i>Alto Horno</i>	<i>460 libras por tonelada neta de arrabio</i>	<i>Se reusa cerca del 100% de escoria</i>	<i>Industria del cemento, concreto y construcción de caminos</i>
<i>Convertidores (BOF)</i>	<i>200 a 400 lb por tonelada neta de acero</i>	<i>Se reusa menos del 50%</i>	<i>Planta de sinterización, altos hornos, construcción de carreteras e industria del cemento</i>
<i>Ruta minimill</i>			
<i>Horno de Arco Eléctrico (EAF)</i>	<i>125 a 200 lb por tonelada neta de acero</i>	<i>Se reusa en el 50-70%</i>	<i>Industria del cemento y construcción.</i>

Fuente: Steel Industry Technology Roadmap ^[19]

3.2 Efecto de las Regulaciones Ambientales en la industria siderúrgica.

Desde la entrada en vigor del protocolo de Kioto (acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de gases que causan el calentamiento global) el 16 febrero del 2005, los países firmantes (industrializados) están haciendo uso de herramientas administrativas para el control de emisiones de gases de efecto invernadero y poder cumplir con los compromisos asumidos.

Cabe mencionar que para los países en desarrollo el Protocolo no exige bajar sus emisiones, aunque si deben dar señales de un cambio en su industria.

La aplicación de los instrumentos de control mencionados esta teniendo un impacto en las diferentes industrias; claro ejemplo es la industria siderúrgica europea en la cual se están aplicando los llamados Sistema de Comercio de

Emisiones (EU-ETS). El cual esta basado en límites máximos e intercambio comercial. Esto significa que si las emisiones de una instalación determinada superan el límite máximo establecido, la instalación tendrá que comprar cuotas de emisión en el mercado.

La evaluación del impacto de las EU-ETS en la competitividad en la industria del acero requiere la distinción entre las principales rutas (la ruta integrada y la ruta *minimill*).

La ruta integrada con un total de 2 toneladas de CO₂ por toneladas de acero, esta mas expuesta a estas regulaciones que la ruta *minimill*, la cual tiene un total de emisiones de alrededor de 0,4 toneladas de CO₂ por tonelada de acero siendo casi el 100% de tipo indirectas (tabla 3.7).

La mayoría de las emisiones de la ruta integrada son emisiones directas del proceso, por ejemplo de un total de 2 toneladas de CO₂ generado 1,8 toneladas de CO₂ son emisiones directas en tanto que 0,2 toneladas indirectas.

Tabla 3.7. Emisión de Monóxido de Carbono en la Producción de Acero
(Toneladas de CO₂ por tonelada de acero)

<i>Industria</i>	<i>Emisiones Indirectas de CO₂</i>	<i>Emisiones Directa de CO₂</i>	<i>Total de Emisiones de CO₂</i>
<i>Integrada</i>	0,22	1,80	2,00
<i>Minimill</i>	0,35	0,05	0,40

Fuente: Report on International Competitiveness^[6]

En tanto que la mayoría de las emisiones en la ruta *minimill* son emisiones indirectas producto del consumo de electricidad en el proceso de fusión en el horno de arco (0,35 toneladas de CO₂ por tonelada de acero producido). El restante son emisiones de CO₂ directamente del proceso, causadas por el

ánodo en el Horno de Arco Eléctrico (0,05 toneladas de CO₂ por toneladas de acero producido).

Tal como se muestra en la figura 3.7 a un precio de CO₂ de 20 Euros/ton la ruta integrada presenta un incremento en sus costos de 40 Euro/ton de acero (17,3%) en el corto y mediano plazo, de los cuales 36 Euros (15,3%) es un incremento de costo de manera directa y 4 Euros (2%) es el incremento en costo de manera indirecta (2 Euros en refractarios y 2 Euros de incremento en electricidad).

En tanto que en la figura 3.8 puede apreciarse como la ruta *minimill* enfrenta un incremento en el costo total de 7 Euros/ton de acero (2,9%) en el corto y mediano plazo, del cual 6 Euros/ton de acero (2,5%) es de manera indirecta causado por el incremento en el precio de la electricidad y 1 Euro/ton (0,4%) es de manera directa.

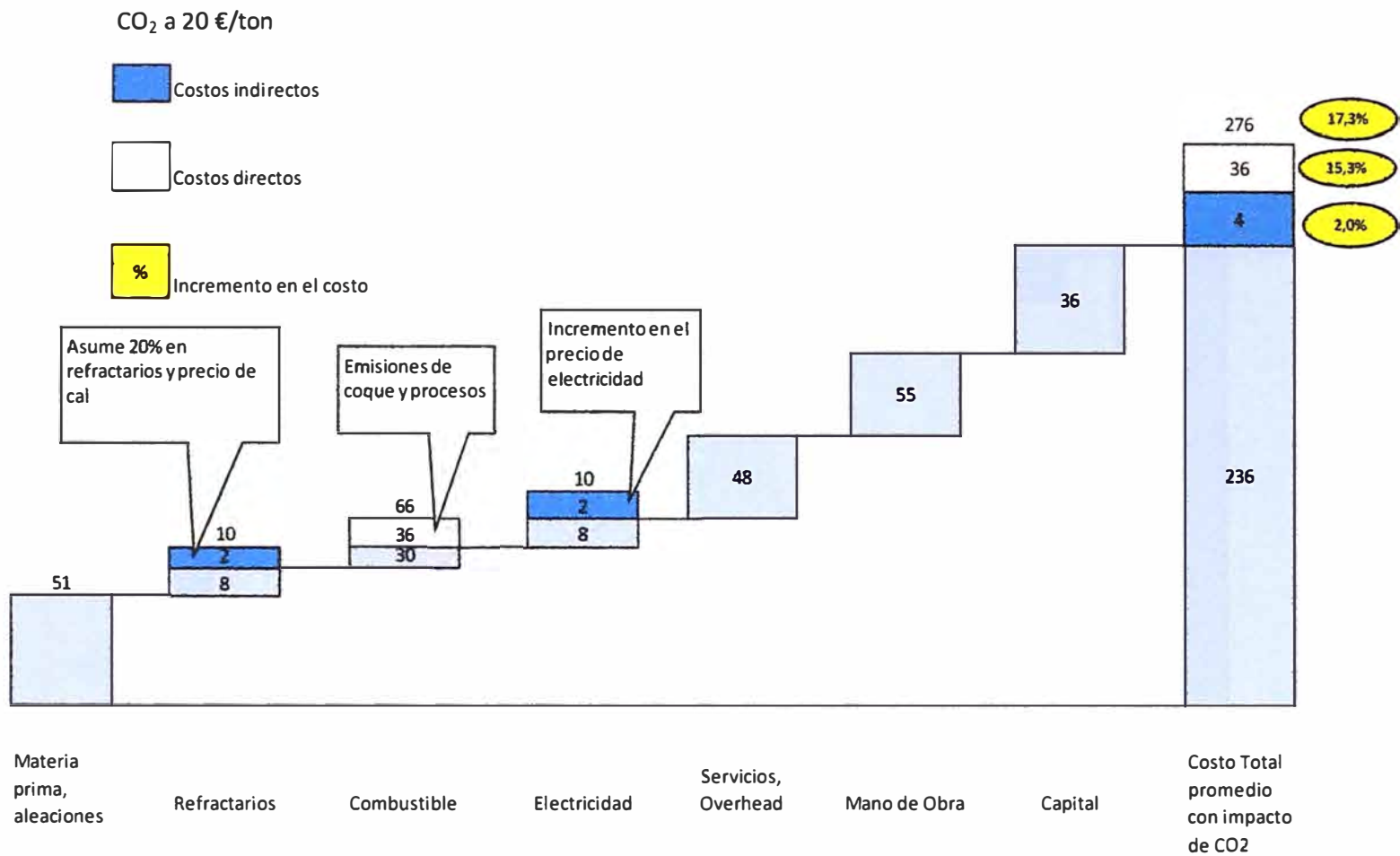


Figura 3.7: Potencial impacto en el costo a mediano y corto plazo del ETS en la industria del acero – Ruta Integrada

Fuente: Report on International Competitiveness^[6]

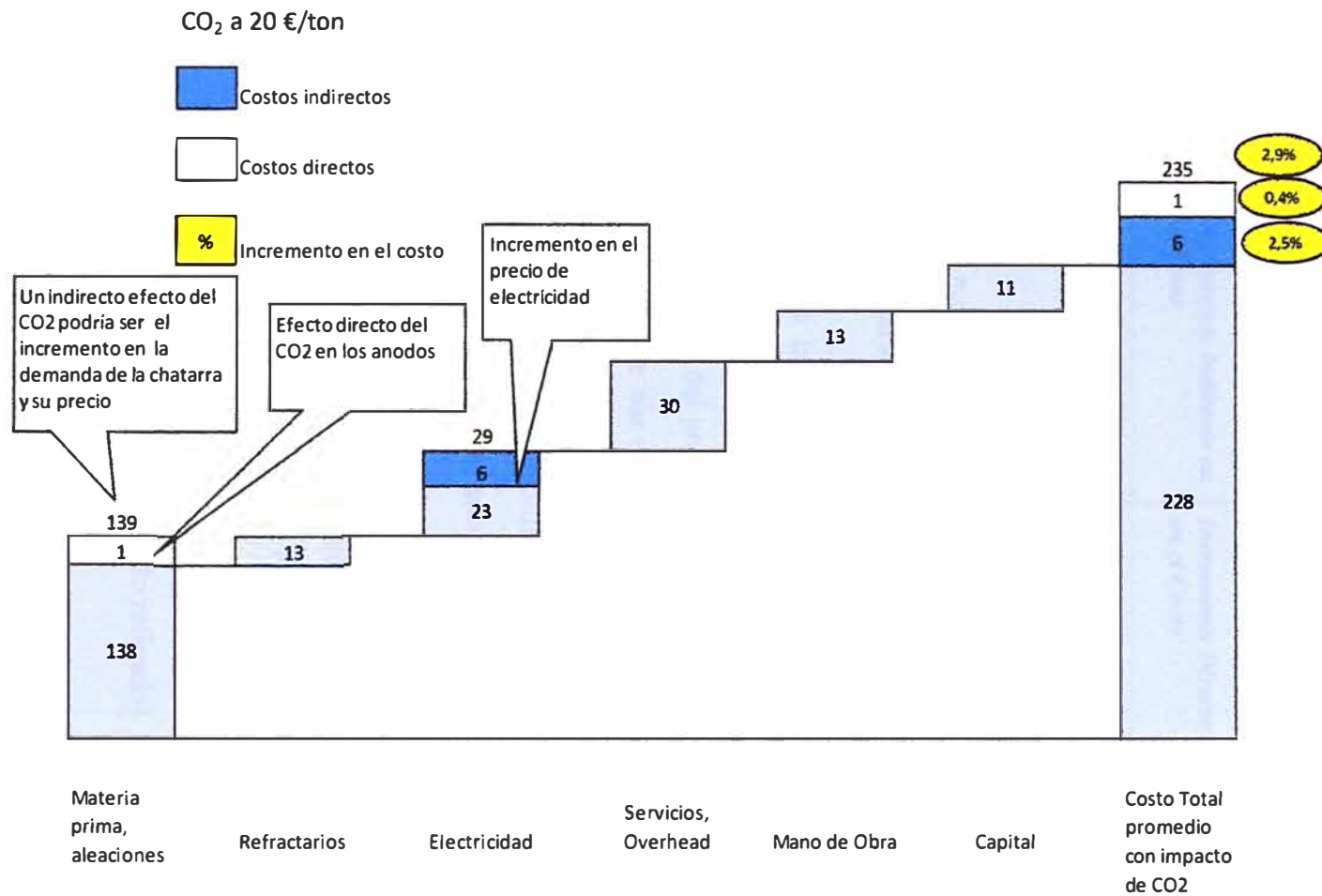


Figura 3.8: Potencial impacto en el costo a mediano y corto plazo del ETS en la industria del acero – Ruta *Minimill*

Fuente: Report on International Competitiveness^[6]

Tabla 3.8. Incremento en el costo a mediano y corto plazo en la Industria del Acero (Porcentajes del costo total)

<i>Industria</i>	<i>Incremento Indirecto en el Costo</i>	<i>Incremento Directo en el Costo</i>	<i>Incremento en el Costo Total</i>
<i>Integrada (planos)</i>	2,0	15,3	17,3
<i>Minimill (largos)</i>	2,5	0,4	2,9

Fuente: Report on International Competitiveness ^[6]

3.3 Evaluación Financiera

Este capítulo evalúa la viabilidad financiera de las diferentes tecnologías mencionada en capítulos anteriores; En vista de que el etapa de reducción directa es solo una parte del proceso global para la producción de acero y que dada la interacción entre sus diferentes etapas su rentabilidad no puede ser analizada o comparada de manera aislada pues las etapas que la anteceden o preceden también presentan modificaciones dependiendo la tecnología elegida. Por tanto la evaluación económica será para el proceso global de producción de acero. Los parámetros de evaluación considerados incluyen:

- Costo de Capital (en \$/tonelada métrica anual de Acero Líquido producido).
- Costo de Operación para Producir Acero Líquido Refinado (en \$/tonelada métrica de acero líquido refinado)
- Tasa Interna de Retorno (todos los Costos de Capital fueron invertidos en el primer año y la producción arrancó a plena capacidad a partir del año 2 hasta el 21)

3.2.1 Costo de Capital

El Costo de Capital estimado para la producción de acero fueron desarrolladas usando los costos de las diferentes operaciones unitaria necesarias para la producción acero (peletización, reducción, fusión en el horno de arco eléctrico, afino en el horno cuchara), dentro de lo que es la etapa de reducción directa se tomó en cuenta las diferentes alternativas tecnológicas (Midrex, HyL, SL/RN). Información proporcionado por la consultora LOOKWOOD GREEN así como datos suministrados por el proveedor fueron usados para sentar las bases de estimaciones mas recientes o donde no se contaba con información disponible.

Los costos fueron actualizados tomando como base el año 2 000 y para que la evaluación fuera uniforme para las diferentes alternativas se tomo como punto de partida la producción de un millón de toneladas métricas de acero líquido refinado por año. Las diferencias específicas de cada proceso en particular fueron tomados en cuenta en las diferentes operaciones unitarias que conforman el proceso total de producción de hierro y acero.

El detalle de los costos de capital (en\$/ tonelada métrica de producción) para las diferentes alternativas tecnológicas son mostrados en las tablas 3.9, 3,10 y 3.11.

Tabla 3.9: Costo de capital usando la tecnología Midrex

	Bases para costo	Capacidad en millones de toneladas de unidades producidas por año (MMtm Unid/año)	Costo de la instalación (MMS)	Costo por toneladas métricas de unidades producidas (\$/tm Unid)	Toneladas de unidades por toneladas de acero líquido (tm Unid tm de acero líquido)	Costo por tonelada de acero líquido (\$ tm acero líquido)	Costo de capital (\$/tm acero líquido)
1.-TECNOLOGIA MIDREX							
Hierro de alimentación	Concentrado y entrega a planta de peletización	1,4652					
Producción de pellets	Compuesto por cuatro cotizaciones del vendedor	3,3000	135,0	40,91	1,7807	83,19	365,36
		3,5000	155,0	44,29			
		4,2000	175,0	41,67			
		5,0000	<u>300,0</u>	<u>60,00</u>			
			Promedio	46,72			
Horno de Cuba Midrex	Compuesto por tres cotizaciones del vendedor	4,5000	670,0	148,89	1,0450	151,77	
		4,0000	565,0	141,25			
		4,5000	<u>655,0</u>	<u>145,56</u>			
			Promedio	145,23			
Horno de Arco eléctrico para la producción de acero y Horno cuchara para el afino	Compuesto por tres cotizaciones del vendedor	4,9200	410,0	83,33	1,0549	85,41	
		4,9200	385,0	76,25			
		4,9200	<u>400,0</u>	<u>81,23</u>			
			Promedio	80,96			
Fuera de los límites de batería	Incluye: Hierro concentrado, almacenamiento, servicio de agua, disposición de residuos, tratamiento de emisiones, oficinas, laboratorios, etc	4,000	180,0	45,00	1,0000	45,00	

Fuente: Ironmaking Process Alternatives Screening Study^[20]

Tabla 3.10: Costo de capital usando la tecnología HyL

	Bases para costo	Capacidad en millones de toneladas de unidades producidas por año (MMtm Unid/año)	Costo de la instalación (MMS)	Costo por toneladas métricas de unidades producidas (\$/tm Unid)	Toneladas de unidades por toneladas de acero líquido (tm Unid/tm de acero líquido)	Costo por tonelada de acero líquido (\$/tm acero líquido)	Costo de capital (\$/tm acero líquido)
2.-TECNOLOGIA HyL							
Hierro de alimentación	Concentrado y entrega a planta de peletización	1,4650					362,60
Producción de pellets	Compuesto por dos cotizaciones del vendedor	3,3000	135,0	40,91	1807,7	83,19	
		3,5000	155,0	44,29			
		4,2000	175,0	41,67			
		5,0000	<u>300,0</u>	<u>60,00</u>			
		Promedio	46,72				
Horno de Cuba Midrex	Compuesto por dos cotizaciones del vendedor	4,2000	612,0	145,71	1,0450	149,05	
		2,8000	<u>390,8</u>	<u>139,56</u>			
		Promedio	142,84				
Horno de Arco eléctrico para la producción de acero y Horno cuchara para el afino	Compuesto por tres cotizaciones del vendedor	4,9200	410,0	83,33	1,0543	85,36	
		4,9200	385,0	76,25			
		4,9200	<u>400,0</u>	<u>81,23</u>			
			Promedio	80,96			
Fuera de los límites de batería	Incluye: Hierro concentrado, almacenamiento, servicio de agua, disposición de residuos, tratamiento de emisiones, oficinas, laboratorios, etc	4,000	180,0	45,00	1,0000	45,00	

Fuente: Ironmaking Process Alternatives Screening Study^[20]

Tabla 3.11: Costo de capital usando la tecnología SL/RN

	Bases para costo	Capacidad en millones de toneladas de unidades producidas por año (MMtm Unid/año)	Costo de la instalación (MMS)	Costo por toneladas métricas de unidades producidas (\$/tm Unid)	Toneladas de unidades por toneladas de acero líquido (tm Unid/tm de acero líquido)	Costo por tonelada de acero líquido (\$/tm acero líquido)	Costo de capital (\$/tm acero líquido)
3.-TECNOLOGIA SL/RN							
Hierro de alimentación	Finos de mineral de hierro recibidos en las pilas con sistemas de recuperación de pellets verde.	1,3560					344,39
Producción de pellets	Compuesto por cuatro cotizaciones del vendedor	0,3020	14,1	46,62	2,0137	93,88	
Reducción de finos en reactor de lecho fluidizado	Basado en cotizaciones del vendedor	2,8000	350,0	125,00	0,9365	117,06	
Horno de Arco eléctrico para la producción de acero y Horno cuchara para el afino	Basado sobre estimaciones de Lookwood Greene(cosultora)	4,9200 4,9200 4,9200	410,0 385,0 400,0 Promedio	83,33 76,25 81,23 80,96	1,0543	85,36	
Fuera de los limites de batería	Incluye: Hierro concentrado, almacenamiento, servicio de agua, disposición de residuos, tratamiento de emisiones, oficinas, laboratorios, etc.	4,000	180,0	45,00	1,0000	45,00	
Recepción y manipulación de chatarra	Incluye recepción de chatarra manipuleo, almacenamiento, servicio de agua, disposición de residuos, tratamiento de emisiones, oficinas, laboratorios, etc solamente para el horno eléctrico y horno cuchara.	4,000	80,0	20,00	0,1544	3,09	

Fuente: Ironmaking Process Alternatives Screening Study^[20]

3.2.2 Costo de Operación

Todos los costos han sido determinados tomando como base la producción de un millón de toneladas métricas de acero líquido. Las consideraciones tomadas para el cálculo del Costo de Operación son las siguientes:

Los requerimientos han sido calculados por los balances de masa y energía.

El consumo de energía eléctrica ha sido obtenido en base a experiencia o información suministrada por el proveedor.

La mano de obra fue estimada de la información de Horas-hombre/tonelada métrica suministrada por el proveedor o de experiencias con similares procesos.

El costo de transporte son incluidos dentro del costo de los materiales.

La asignación para el mantenimiento y suministros de materiales están basados sobre factores proporcionados por el vendedor.

Los costos de otros requerimientos incluyen: asignaciones para instalaciones y elementos auxiliares fuera del límite de batería, pagos por patente, mantenimiento, suministro de repuestos, etc. Los cuales están basados en estudios de factibilidad recientes de LOOKWOOD GREENE para procesos similares.

El detalle de los costos de capital en \$/ tonelada métrica de acero líquido para las diferentes alternativas tecnológicas son mostrados en las tablas 3.12, 3.13 y 3.14.

Tabla 3.12: Costo de operación usando la tecnología Midrex

	<i>Costo por Unidad</i>	<i>Unidades Requeridas</i>	<i>Costo por año</i>	<i>Costo por tonelada de acero</i>
	<i>(\$/tm)</i>	<i>(MM tm/año)</i>	<i>(\$/año)</i>	<i>(\$/tm Acero Líquido)</i>
Mineral de Hierro:				
<i>Entrega de concentrado de mineral de hierro(\$/tm)</i>	43,89	1,4652	6430650	64,31
PELETIZACIÓN				
<i>Pellets para horno de cuba</i>		1,7807		
<i>Mano de obra para peletización (MN-HR/tm pellets)</i>	2,8565	1,7807	5090195	5,09
<i>Aglomerante para peletización (\$/tm binder)</i>	90,02	0,0118	1063663	1,06
<i>Dolomita para peletización(\$/mt Cal/Dolomita)</i>	77,83	0,0402	3127885	3,13
<i>Otros insumos (\$/tm pellets)</i>	2,36	1,7807	4202507	4,2
<i>Energía eléctrica(MM kWh/año)</i>	0,033	128,0051	4224167	4,22
<i>Combustible gas natural (\$/tm)</i>	124,45	0,0514	6392588	6,39
SUB-TOTAL PELETIZACION			24101105	24,10
REDUCCION DIRECTA EN HORNO DE CUBA				
<i>DRI para horno electrico (1%C)</i>		1,0450		
<i>Mano de Obra (MN-HR/tm DRI)</i>	1,54385	1,0450	1611721	1,61
<i>Otros(\$/tm DRI)</i>	11,39	1,0450	11902822	11,90
<i>Requerimientos de energía eléctrica(MM kWh/año)</i>	0,033	141,5137	4669951	4,67
<i>Gas natural a DRI (\$/tm)</i>	124,45	0,25555	31802440	31,60
SUB-TOTAL PRODUCCION DE DRI			49986934	49,99
PRODUCCIÓN DE ACERO EN EL HORNO ELECTRICO				
<i>Acero refinado para en el horno cuchara</i>		1,0549		
<i>Chatarra de Acero (100% DRI, revertirse solamente)</i>	10,00	0,0648	647911	0,65
<i>Aditivos (promedio \$/tm)</i>	1076,24	0,0070	7580000	7,58
<i>Acero C. (Carga + escoria)</i>	58,15	0,0120	698201	0,70
<i>Electrodos (\$/tm)</i>	1031,03	0,0038	3939447	3,94
<i>Cal cargada</i>	77,10	0,0124	952588	0,95
<i>Oxigeno a Horno de Arco Eléctrico (MM Nm3/año)</i>	0,042	11,0000	462000	0,46
<i>Mano de Obra para Horno de Arco Eléctrico(H-H/tm acero liq.</i>	4,48525	1,0000	4485000	4,49
<i>Otros (\$/tm de Acero Líquido)</i>	16,83	1,0000	16830000	16,83
<i>Requerimientos de Energía(MM kWh/año)</i>	0,033	736,0265	24288878	24,29
<i>Gas Natural a EAF</i>	124,45	0,0023	288656	0,29
SUB-TOTAL PRODUCCION DE ACERO EN HORNO DE ARCO ELECTRICO			60172682	60,17
REFINACION EN HORNO CUCHARA				
<i>Acero líquido para colada continua</i>		1,0000		
<i>Cal en polvo para refinación en horno cuchara-(\$/tm)</i>	169,40	0,0053	892991	0,89
<i>Escoria/alambre desulfurador a horno cuchara</i>	700,00	0,0004	258303	0,26
<i>Gas argón(MM Nm3/año)</i>	0,240	0,0633	15182	0,02
<i>Otros-(\$/tm acero líquido)</i>	4,498	1,0000	4497600	4,50
<i>Energía eléctrica requerida (MM kWh/año)</i>	0,033	34,8973	1151610	1,15
SUB-TOTAL PRODUCCION DE ACERO EN HORNO DE ARCO ELECTRICO			6815685	6,82
Costo de Operación:			206382946	205,38

Fuente: Ironmaking Process Alternatives Screening Study^[21]

Tabla 3.13: Costo de operación usando la tecnología HyL

	<i>Costo por Unidad</i> <i>(\$/tm)</i>	<i>Unidades Requeridas</i> <i>(MM tm/año)</i>	<i>Costo por año</i> <i>(\$/año)</i>	<i>Costo por tonelada de acero</i> <i>(\$/tm Acero Líquido)</i>
Mineral de Hierro:				
<i>Entrega de concentrado de mineral de hierro(\$/tm)</i>	43,89	1,4652	64306540	64,31
PELETIZACIÓN				
<i>Pellets para horno de cuba</i>		1,7807		
<i>Mano de obra para peletizacion (MN-HR/tm pellets)</i>	2,8567	1,7807	5090195	5,09
<i>Aglomerante para peletizacion (\$/tm binder)</i>	90,02	0,0118	1063663	1,06
<i>Dolomita para peletizacion(\$/mt Cal/Dolomita)</i>	77,83	0,0402	3127985	3,13
<i>Otros insumos (\$/tm pellets)</i>	2,36	1,7807	4202507	4,20
<i>Energia eléctrica(MM kWh/año)</i>	0,033	128,0051	4224167	4,22
<i>Combustible gas natural (\$/tm)</i>	124,45	0,0514	6392588	6,39
SUB-TOTAL PELETIZACION			24101105	24,10
REDUCCION DIRECTA EN HORNO DE CUBA				
<i>DRI para horno electrico (1%C)</i>		1,0450		
<i>Mano de Obra (MN-HR/tm DRI)</i>	1,54385	1,0450	1611721	1,61
<i>Otros(\$/tm DRI)</i>	11,39	1,0450	11902822	11,90
<i>Requerimientos de energia eléctrica(MM kWh/año)</i>	0,033	108,8567	3592270	3,59
<i>Gas natural a DRI (\$/tm)</i>	124,45	0,2062	25656170	25,66
SUB-TOTAL PRODUCCION DE DRI			49986934	49,99
PRODUCCIÓN DE ACERO EN EL HORNO ELECTRICO				
<i>Acero refinado para en el horno cuchara</i>		1,0549		
<i>Chatarra de Acero (100% DRI, revertirse solamente)</i>	10,00	0,0648	647911	0,65
<i>Aditivos (promedio \$/tm)</i>	1076,24	0,0070	7580000	7,58
<i>Acero C. (Carga + escoria)</i>	58,15	0,0084	489310	0,49
<i>Electrodos (\$/tm)</i>	1031,03	0,0038	3939447	3,94
<i>Cal cargada</i>	77,10	0,0124	952588	0,95
<i>Oxigeno para Horno de Arco Eléctrico (MM Nm3/año)</i>	0,042	44,0000	1848000	1,84
<i>Mano de Obra para Horno de Arco Eléctrico(H-H/tm acero liq)</i>	4,48525	1,0000	4485000	4,49
<i>Otros (\$/tm de Acero Líquido)</i>	16,83	1,0000	16830000	16,83
<i>Requerimientos de Energia(MM kWh/año)</i>	0,033	639,2210	21094291	21,09
<i>Gas Natural a EAF</i>	124,45	0,0023	288656	0,29
SUB-TOTAL PRODUCCION DE ACERO EN HORNO DE ARCO ELECTRICO			58155505	58,16
REFINACION EN HORNO CUCHARA				
<i>Acero líquido para colada continua</i>		1,0000		
<i>Cal en polvo para refinación en horno cuchara-(\$/tm)</i>	169,40	0,0053	892991	0,89
<i>Escoria/alambre desulfurador a horno cuchara</i>	700,00	0,0004	258303	0,26
<i>Gas argón(MM Nm3/año)</i>	0,240	0,0633	15182	0,02
<i>Otros-(\$/tm acero líquido)</i>	4,498	1,0000	4497600	4,50
<i>Energia eléctrica requerida (MM kWh/año)</i>	0,033	34,8973	1151610	1,15
SUB-TOTAL PRODUCCION DE ACERO EN HORNO DE ARCO ELECTRICO			6815685	6,82
Costo de Operación:			196141518	196,14

Fuente: Ironmaking Process Alternatives Screening Study^[21]

Tabla 3.14: Costo de operación usando la tecnología SL/RN

	Costo por Unidad (\$/tm)	Unidades Requeridas (MM tm/año)	Costo por año (\$/año)	Costo por tonelada de acero (\$/tm Acero Líquido)
MINERAL DE HIERRO				
Entrega de concentrado de mineral de hierro(\$/tm)	21,19	1,3560	28733640	28,73
PELETIZACION				
Pellets Verde		2,0137		
Mano de obra para peletizacion (MN-HR/tm pellets)	2,8567	2,0653	5903673	5,09
Carbon calibrado (\$/tm pellets)	40,71	0,7024	28295091	28,60
Aglomerante para peletizacion (\$/tm binder)	90,02	0,0937	8430373	8,43
Otros insumos (\$/tm pellets)	2,36	2,0653	4874121	4,87
Energia eléctrica(MM kWh/año)	0,033	38,4560	<u>1269048</u>	<u>1,27</u>
SUB-TOTAL PELETIZACION			49072305	49,07
REDUCCIÓN DIRECTA EN EL HORNO ROTATORIO				
DRI para horno electrico (1%C)		0,9365		
Mano de Obra (MN-HR/tm DRI)	1,54385	0,9365	2437335	2,44
Otros(\$/tm DRI)	11,39	0,9365	10666735	10,67
Requerimientos de energia eléctrica(MM kWh/año)	0,033	52,7222	1739832	1,74
Combustible DRI (\$/tm)	124,45	0,0440	<u>5470822</u>	<u>5,47</u>
SUB-TOTAL PRODUCCION DE DRI			20314724	20,31
PRODUCCION DE ACERO EN EL HORNO ELECTRICO				
Acero refinado para en el horno cuchara		1,0032		
Chatarra de Acero (86.5% DRI)	140,00	0,1181	16530376	16,53
Revertir la chatarra a su condición anterior (86.5% DRI)	10,00	0,0369	362919	0,36
Aditivos (promedio \$/tm)	490,53	0,0155	7580000	7,58
Acero C. (Carga + escoria)	58,15	0,0130	753636	0,75
Electrodos (\$/tm)	1031,03	0,0045	4639655	4,64
Cal cargada	77,10	0,0243	1872407	1,87
Oxigeno para Horno de Arco Eléctrico (MM Nm3/año)	0,042	52,5985	2209137	2,21
Mano de Obra para Horno de Arco Eléctrico(H-H/tm acero liquid)	4,48525	1,0032	4499202	4,50
Otros (\$/tm de Acero Líquido)	16,83	1,0032	16883291	16,88
Requerimientos de Energia(MM kWh/año)	0,033	686,2000	22644600	22,64
Gas Natural a EAF	124,45	0,0023	<u>288705</u>	<u>0,29</u>
SUB-TOTAL PRODUCCION DE ACERO EN HORNO DE ARCO ELECTRICO			78263927	78,26
REFINACION EN HORNO CUCHARA				
Acero liquido para colada continua		1,0000		
Cal en polvo para refinación en horno cuchara-(\$/tm)	169,40	0,0053	893142	0,89
Escoria/alambre desulfurador para horno cuchara	700,00	0,0038	2660000	2,66
Gas argón(MM Nm3/año)	0,240	0,0633	15184	0,02
Otros-(\$/tm acero líquido)	4,498	1,0000	4497600	4,50
Energia eléctrica requerida (MM kWh/año)	0,033	30,0950	<u>993135</u>	<u>0,99</u>
SUB-TOTAL PRODUCCION DE ACERO EN HORNO DE ARCO ELECTRICO			9059062	9,06
Costo de Operación:			185443658	185,44

3.2.3 Tasa Interna de Retorno

La tabla 3.15 muestra de manera resumida los costos para las diferentes tecnologías así como su rentabilidad. En lo que se refiere a la tecnología SL/RN presenta la mayor tasa interna de retorno haciéndola mas atractiva en comparación a la otras.

Tabla 3.15: Tasa Interna de Retorno

Costo por TM de Acero Líquido Producido (Base:\$140/tm de chatarra de acero)			
TECNOLOGIAS	Costo de Capital (\$/tm de Acero Líquido)	Costo de Operación (\$/tm de Acero Líquido)	Tasa Interna de Retorno
1.-TECNOLOGIA MIDREX	365,36	205,39	10,57%
2.-TECNOLOGIA HyL	362,60	196,15	13,72%
3.-TECNOLOGIA SL/RN	344,39	185,46	18,06%

Fuente: Ironmaking Process Alternatives Screening Study^[22]

IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. La producción mundial de acero tiene una tendencia creciente, observándose que los volúmenes de producción se han cuadruplicado desde 1959.
2. La actual demanda de acero en el Perú no es cubierta por la producción nacional, existe la necesidad de importar acero en sus diferentes formas.
3. La producción de acero a través de la ruta *minimill* ofrece mejores ventajas que la ruta integrada. Estas ventajas son:
 - Permite reciclar grandes cantidades de chatarra, lo cual contribuye a ahorrar grandes cantidades de energía y recursos naturales (óxido de hierro), y reducir los volúmenes de emisión de dióxido de carbono.
 - El consumo de energía es prácticamente la mitad del consumo en la producción de acero a través de la ruta Integrada.
 - Los gases de efecto invernadero así como otras emisiones son generados en una proporción menor, siendo los volúmenes de CO₂ la quinta parte al de la ruta integrada. Además la mayor parte del CO₂ no son del proceso mismo sino de manera indirecta es decir de centrales térmicas que proporcionan la energía eléctrica.
 - Genera una menor cantidad escorias durante la producción de acero la cual presenta una alta tasa de reutilización.
 - Las regulaciones ambientales producto de la firma de acuerdos internacionales tendrá un menor impacto en sus costos.

4. La etapa de reducción del mineral de hierro a través de la tecnología SL/RN tiene una rentabilidad mayor que la tecnología Midrex ó HYLSA.

4.2 Recomendación

Bajo las actuales tendencias los inversionistas que decidan incursionar en la industria siderúrgica deben optar aquel proceso que siga la ruta *minimill*, ya que tendrá menor impacto en sus costos por efecto de futuras regulaciones ambientales y que la etapa en la cual se lleve a cabo la reducción directa del mineral sea a través de la tecnología SL/RN ya que permite generar mayor rentabilidad a todo el proceso.

V BIBLIOGRAFÍA

Publicaciones Institucionales:

- [2]. World Steel Association, World crude steel output decreases by -8.0% en 2009, 2010, pag 1-3
- [3]. World Steel Association, 2008 Sustainability Report of the world steel industry, 2008, pag. 3,9,12
- [4]. World Steel Association, Crude steel production-December 2009, 2010, pag. 2,
- [5]. World Steel Association, Steel Statistical Yearbook 2008, 2009, pag 3-5,22,91
- [7]. United States Government, Ironmaking Process Alternatives Screening Study,2000, Volumen 1, Sección 3, pag 2
- [8]. Midrex Technologies, Inc., World Direct Reduction statistics,2008, pag 6-7
- [12]. Steel Recycling Institute, The Inherent Recycled Content of Today's Steel, 2008, pag 1
- [13]. International Iron and Steel Institute, El Acero y Tú, 2008, pag.4
- [14]. Steel Recycling Institute, Buy Recycled whit Recyclable Steel, 2008, pag 1
- [15]. Steel Recycling Institute, Steel Recycling Rates at a Glance, 2008, pag 1-2,
- [20]. U nited States Government, Ironmaking Process Alternatives Screening Study,2000,Volumen 2, Apendice F5, pag 100-105
- [21]. United States Government, Ironmaking Process Alternatives Screening Study, 2000, Volumen 2, Apendice F2,pag 24-80
- [22]. United States Government, Ironmaking Process Alternatives Screening Study, 2000, Volumen 2, Apendice F6,pag 90-112

Publicaciones por Autor:

- [1]. Vergara J. , Información financiera consolidada auditada al 31 de diciembre de 2008 por Class & Asociados, 2009, pag 6-7
- [6]. Buchner B., Report on International Competitiveness, 2006, pag. 23,24,27,28

- [10]. Quintero R., Avances en el Proceso HYL III de Reducción Directa,1995 , pag 3-4
- [11]. Leyva O., Termodinámica de la reducción de los óxidos de hierro con óxidos de carbono, 2003, pag 73-74
- [16]. Margolis N., Energy and Environmental Profile of the U.S. Iron and Steel Industry, 2000, pag.13,19,21,22
- [17]. Stubbles J., Energy use in the U.S. Steel Industry: An Historical Perspective and Future Opportunities, 2000, pag.13
- [18]. Baron R., Sectoral approaches to greenhouse gas mitigation Exploring issues for heavy industry, 2007, pag.56
- [19]. McBee D., Steel Industry Technology Roadmap, 2001, pag.61-65/2001

Paginas Web:

- [9]. Midrex Technologies, Inc.:
http://www.midrex.com/handler.cfm?cat_id=101