

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Química

**LA REDUCCION DIRECTA EN EL DESARROLLO
TECNICO-ECONOMICO DEL PAIS**

304

T E S I S

Que para obtener el grado de

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

p r e s e n t a

SERGIO DE MIGUEL AGUERO

México, D. F.

1976



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS Tesi
LIBRO 1976
FECHA 1976
PROG 164
I S 296



QUIMICA

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA:

PRESIDENTE: Profesor Alberto Obregón Pérez.
V O C A L : Profesor Fernando Maldonado Mendoza.
SECRETARIO: Profesor Mario Ramírez y Otero.
1er. SUPLENTE: Profesor Humberto Malagón Romero.
2o. SUPLENTE: Profesor Alfonso Franyutti Altamirano.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Secretaría de la Presidencia.

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

Sergio De Miguel Aguero.

NOMBRE DEL ASESOR DEL TEMA:

Fernando Maldonado Mendoza.

NOMBRE DEL SUPERVISOR TECNICO:

Eduardo E. Flores Magón y López.

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	i
I. INTRODUCCION	1
II. ANTECEDENTES	3
III. FUNDAMENTOS DE LA REDUCCION DIRECTA	12
IV. PROCESOS DE REDUCCION DIRECTA	20
V. PROCESO HYL	33
VI. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	48
APENDICE I.- GLOSARIO DE TERMINOS	57
APENDICE II.- LINEAMIENTOS PARA LA ELABORACION DE UN ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SOBRE UN PROYECTO SIDERURGICO PARA LA PRODUCCION DE HIERRO PRIMARIO	61
APENDICE III.- ALGUNOS DE LOS PROCESOS CONOCIDOS DE REDUCCION DIRECTA	65
APENDICE IV.- ALGUNAS PROPIEDADES TERMODINAMICAS DE LOS OXIDOS DE HIERRO	70
APENDICE V.- COSTO ESTIMADO COMPARATIVO DE LA FABRICACION DE ACERO SEGUN LA RUTA ALTO HORNO-CONVERTIDOR AL OXIGENO VERSUS REDUCCION DIRECTA-HORNO ELECTRICO DE ARCO	71
BIBLIOGRAFIA	72

AGRADECIMIENTOS

Hago patente mi aprecio y cariño para todas aquellas personas, que de una u otra manera han contribuido para la primera culminación de los esfuerzos, presentados en este trabajo, de un hombre que ha tratado día a día a continuar su superación.

Quiero resaltar una dedicación especial para mi madre, que sin pedir u obtener nada a cambio, me ha entregado todo cuanto existe, con el más grande de los sacrificios y el más sencillo de los amores. Así pues, te digo que lo que en la actualidad soy, te lo debo a tí madre. A los demás miembros de mi familia, abuela, tía y tío, les agradezco la ayuda moral y económica recibida en todo momento.

También dedico, el presente trabajo, a mis compañeros y amigos de facultad, pilares incomparables de mi estructura, a los maestros Drs. Dora y Adolfo Grinberg e Ing. Alberto Obregón por sus incalculables consejos, la tolerancia hacia a mí en los problemas difíciles causados por mi ignorancia, en fin, a su inapreciable ayuda; a mis compañeros de trabajo que en los momentos de estructurar y escribir finalmente el presente documento, colaboraron en una forma desinteresada, valiosa y creativa, como son los casos del Dr. José Luis Aburto, Ing. Luis Morales, y las Sritas. Rita Asaya y María Elena Bustamante.

Para finalizar agradezco muy especialmente al Dr. Eduardo E. Flores Magón y al M.C. Fernando Maldonado, consejeros y guías, su interés personal hacia mí, recordándoles que siempre, y durante toda mi existencia, aunque la vida nos separe, estarán en mi mente, como la imagen misma de la nobleza y el desinterés de unos verdaderos AMIGOS.

Gracias mil a todos.

I. INTRODUCCION

La metalurgia, en términos generales, ha sido considerada un arte a lo largo de la historia del hombre, pero a través del tiempo y con la aplicación del conocimiento adquirido por los metalurgistas y la integración de los físicos y químicos al estudio de los problemas aparecidos en ella, han logrado transformarla paso a paso hasta hacerla una ciencia.

En la industria metalúrgica ferrosa ó siderúrgica, se han realizado un sin número de avances, en las técnicas empleadas y en el desarrollo de nuevos procesos; este es el caso de la reducción directa, que a últimas fechas, ha sido uno de los procesos estudiados con gran interés a nivel mundial; teniendo como finalidad, lograr el mayor y más eficiente aprovechamiento de los recursos materiales (gas natural, mineral de carbón no coquizable y chatarra) disponibles en cada país o región, para la fabricación de acero.

Las razones que motivaron el presente trabajo fueron múltiples y variadas; entre ellas sobresalen, la falta de información sobre reducción directa, en los programas de estudio de la carrera de ingeniero químico metalúrgico (1970 - 1974), la no muy clara toma de decisión para el autor, de la construcción del complejo siderúrgico michoacano Lázaro Cárdenas - Las Truchas, S. A., descartando a to -

dos los procesos a escala comercial de reducción directa y al desconocimiento, también, por parte del autor, de la participación en la producción de hierro primario nacional de los procesos de reducción directa.

El presente trabajo consta de seis capítulos. En el Capítulo dos se mencionan una serie de comentarios sobre características y disponibilidad, en México, de los insumos básicos para la producción de hierro primario. Los fundamentos en que se basa la reducción directa son comentados brevemente en el Capítulo tres. En los Capítulos cuatro y cinco se explican algunas de las características principales de los procesos de reducción directa, que a la fecha presentan la mayor capacidad instalada en el mundo, dejando al proceso mexicano HYL como un capítulo exclusivo.

En el Capítulo seis se exponen breves comentarios sobre el futuro de la reducción directa, ciertas consideraciones técnicas y económicas sobre los procesos de reducción directa - horno eléctrico de arco y alto horno - convertidor al oxígeno, ventajas y desventajas del uso del hierro esponja y se comentan algunas consideraciones sobre el proyecto de la siderúrgica Lázaro Cárdenas - Las Truchas, S. A.

Algunas ideas complementarias a los temas tratados en el trabajo se resumen en cinco apéndices.

II. ANTECEDENTES

Debido a las necesidades económicas, de aprovechamiento de materias primas siderúrgicas de baja ley y de uso eficiente de energéticos, se han venido investigando y desarrollando una serie de procesos que podrían al menos suplantar parcialmente al procedimiento clásico de la tecnología del alto horno. A estos procesos se les ha denominado con el nombre de reducción directa, principalmente por la evolución de la tecnología siderúrgica y por que el reductor, para actuar como tal, no requiere de ninguna transformación en el reactor.^{1/}

Ya que durante las décadas de los cincuentas y sesentas, la evolución tecnológica de los procesos de reducción directa no presentaba un desarrollo acorde a una escala comercial, a que la disponibilidad de materias primas de mejor calidad era accesible y a que el mercado de la chatarra era bastante confiable y predecible, los procesos de reducción directa no presentaban el incentivo de ser investigados y desarrollados con rapidez. Sin embargo, las condiciones de la presente década, cambiaron por completo el panorama establecido anteriormente, logrando con esto una popularidad mundial de los procesos productores de hierro esponja y prereducidos.

En México, la participación en la producción total de hierro primario del hierro esponja ha sido de 28.69 % a 31.64 % durante el período de 1970 a 1974⁽³⁵⁾.

^{1/} Ver Apéndice I.

Para la finalidad del presente trabajo se van a tener que definir ciertos conceptos, los cuales podrán ser localizados en el glosario de términos, en el Apéndice número I, siendo éstos de los más aceptados dentro del lenguaje tecnológico siderúrgico común.

Como la disponibilidad de las materias primas propias o de importación representan la primera parte importante para la instalación de una planta de producción de hierro primario^{1/}, expondremos en forma breve los recursos de hierro.

El hierro es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, constituye alrededor del cuatro por ciento del contenido total de ésta. Aunque se encuentra en casi todas las regiones del mundo mucho de este hierro no es explotable, económica y técnicamente en la actualidad.

La exploración geológica debe ser muy bien realizada con el propósito de determinar la calidad, forma y magnitud del cuerpo del mineral; así como para obtener la información litológica y estructural de las rocas que rodean el depósito.

Dado que el mineral de hierro es cuantitativa y cualitativa^umente muy importante para la industria del acero se han efectuado muchos estudios sobre él, y se ha visto que existen un gran número de

^{1/} Ver Apéndice II.

minerales que lo contienen, sin embargo, el hierro puede obtenerse de solo unos cuantos. El hierro en su estado natural se encuentra en forma de carbonatos, sulfuros, silicatos y óxidos; siendo estos últimos su principal fuente de obtención. En el Cuadro # 1 se dá una descripción somera de algunos de ellos.

En México existen algunos depósitos de hierro, los cuales muestran un contenido en reservas^{1/} que fluctúan entre uno y ciento treinta millones de toneladas. Las reservas positivas son de 454 millones de toneladas y las totales incluyendo las probadas y posibles son estimadas en 1 007 millones de toneladas ⁽³⁵⁾, con un contenido promedio de hierro total del 57%. Los principales depósitos están formados por hematitas, magnetitas, goethitas^{2/} y cantidades menores de pirite (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2). Se presentan en forma de masas irregulares, formando vetas en rocas de tipo ígneo y sedimentario, así como reemplazando a las calizas (CaCO_3) en estos yacimientos. Son relativamente resistentes a los fenómenos de erosión y ocurren cubriendo montañas y colinas. La hematita se encuentra en forma abundante en la superficie terrestre y en áreas cercanas a ésta, mientras que la magnetita se encuentra a mayores profundidades de los yacimientos. (Ver Cuadro # 2).

1/ Ver Apéndice I.

2/ Ver Cuadro # 1.

PRINCIPALES DEPOSITOS DE MINERAL DE HIERRO EN LA REPUBLICA MEXICANA (18)

ESTADO	DEPOSITO	HIERRO TOTAL (% en peso)	TIPO DE MINERAL	ESTIMACION DE RE- SERVAS POSITIVAS (10 ⁶ tons)
Baja California	1. Santa Ursula	-	M ^{1/}	30
	2. El manzano	-	M	6
	3. Cerro Blanco	-	M	2
	4. Santa Catarina	-	M	<2
	5. Guadalupe y Solís	-	M	<2
	6. Trinidad	-	M	<2
	7. El Salto	-	M	<2
	8. La Cachalosa	-	M	<2
	9. El Taraicito	-	M	<2
	10. La Grulla	-	M	<2
Chihuahua	1. La Perla	60	HM ^{2/}	59
Coahuila	1. Hércules	63	-	44
	2. La Perla	62	-	2
Colima	1. Peña Colorada - Mamey	56	HM	131
	2. El Hierro	56	HM	30
Durango	1. Cerro del Mercado	62	HM	70
		30	HG ^{3/}	5
	2. Yacimiento sin nombre	57	HM	4
Guerrero	1. Chutla-Tepetate-Tibor	58	HM	1
	2. La Calera - El Calvario	63	-	1
Jalisco	1. El Encino	67	HM	17
	2. La Huerta	50	-	8
	3. Cihuatlán	57	-	2
Michoacán	1. Las Truchas	-	HO ^{4/}	74
	2. La Guayabera	-	-	20
	3. Los Pozos	-	-	12
Oaxaca	1. Zaniza	65	MG ^{5/}	31
	2. Las Esperanzas	59	-	16
	3. Totalapilla	65	-	7
	4. Recibimiento	65	-	1
Sinaloa	1. Los Vasitos - Leopoldo	67	HG	1
Sonora	1. El Volcán	62	H ^{6/}	8
Tamaulipas	1. San José	-	-	1.5
Veracruz	1. Almagres	33	HG	8
	2. Las Minas - Tatatila	59	-	8
Zacatecas	1. Sol y Luna	63	HM	2
	2. La Carmen	66	HM	1

1/ M.- Magnetita.

2/ HM.- Hematita - Magnetita.

3/ HG.- Hematita - Goethita.

4/ HO.- Hematita y óxidos hidratados.

5/ MG.- Magnetita - Goethita.

6/ H.- Hematita.

CUADRO No. 1

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS OXIDOS DE HIERRO ^{(5), (8)}

NOMBRE MINERALOGICO	COMPOSICION QUIMICA DEL MINERAL PURO (% EN PESO)	FORMULA QUIMICA	DESIGNACION QUIMICA	COLOR	GRAVEDAD ESPECIFICA	CARACTERISTICAS
Hematita	Fe - 69.94 O - 30.06	Fe ₂ O ₃	Oxido férrico	de gris acero a rojo brillante	de 4.26 a 5.23	Es una especie ampliamente distribuida. Se encuentra en depósitos ígneos, metamórficos, sedimentarios o como resultado del intemperismo, principalmente de la magnetita.
Magnetita	Fe - 72.40 O - 27.60	Fe ₃ O ₄	Oxido ferroso-férrico	de gris oscuro a negro	de 5.16 a 5.18	Presenta propiedades magnéticas y en caso de poseer polaridad actúa como un imán natural. Se encuentra en depósitos de origen ígneo, metamórfico o sedimentario. La mayoría de las veces se le encuentra con pequeñas cantidades de titanio.
Ilmenita	Fe - 36.80 O - 31.63 Ti - 31.57	FeTiO ₃	Oxido de hierro - Titanio	negro	4.5	Ocurre como un componente adicional en muchos tipos de rocas ígneas, tomando el lugar de la magnetita. Generalmente se usa como fuente de obtención de titanio y se recupera el hierro como subproducto.
Goethita	Fe - 62.85 O - 36.02 H - 1.13	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	Oxido de hierro hidratado	amarillento, rojizo o negruzco	4.28	Se encuentra asociada con limonita y raras veces con hematita. Tiene menor cantidad de agua que la limonita.
Lepidrocrocita	Fe - 62.85 O - 36.02 H - 1.13	FeO(OH)	Oxido de hierro hidratado	amarillento, rojizo o negruzco	4.09	Igual a la goethita sólo que presenta propiedades ópticas más débiles.
Limonita	Fe - 59.83 O - 38.56 H - 1.61	2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	Oxido de hierro hidratado	amarillo ocre	3.6 a 4	Es de origen secundario como resultado de la alteración de otras menas o minerales de hierro. Generalmente es usada para denotar óxidos no identificados pero que contienen o absorben agua.

México en la actualidad es prácticamente autosuficiente en mineral de hierro, sin embargo en opinión del autor, el índice económico de exploración minera para el encuentro de nuevos yacimientos es muy bajo y no va de acuerdo con la tasa anual de crecimiento de los requerimientos de mineral de hierro en la industria siderúrgica.

Los reductores representan el segundo aspecto de mayor importancia para la producción de hierro primario, ya que justifican el tipo de proceso que se va a utilizar, e influyen significativamente en la determinación de la localización y el tamaño de la planta.

En términos generales los agentes reductores son: el gas natural, el carbón y los gases derivados del petróleo. Dependiendo de la disponibilidad de éstos, cada país estudiará las opciones posibles.

En el caso de México en donde se tienen tanto reductores gaseosos como reductores sólidos, se deberá efectuar un balance de costos, tomando en cuenta las condiciones reductoras y la disponibilidad que ofrecen los distintos tipos de carbón y de gas.

Siendo Petróleos Mexicanos (PEMEX) la única empresa capacitada y autorizada para manejar las reservas de petróleo y de gas natural, se deberán de considerar sus proyecciones de exploración y explotación con el objeto de conocer su capacidad y posibilidad de entrega de los re-

cursos antes mencionados. El Cuadro # 3 nos muestra la producción total de gas natural y el porcentaje obtenido por zona en el país, en los años de 1972 a 1974.

CUADRO No. 3

PRODUCCION TOTAL DE GAS NATURAL EN LA REPUBLICA MEXICANA ^{(23), (24)}

AÑO	PRODUCCION TOTAL (10 ⁶ m ³)	PARTICIPACION POR ZONAS (%)		
		N O R T E	POZA RICA	S U R
1972	18 696	-	-	-
1973	19 164	33.3 %	12.7 %	54.0 %
1974	21 087	28.5 %	10.7 %	60.8 %

Con respecto al carbón mineral que procede de las minas mexicanas se puede mencionar que es de mala calidad ya que tiene un bajo contenido de carbón fijo (45 a 50 %). Solo existen dos áreas carboníferas productoras de carbón coquizable que en la actualidad son objeto de explotación encontrándose ambas en el estado de Coahuila. Existen además, yacimientos en los estados de Sonora y Oaxaca pero éstos son principalmente de carbón no coquizable.

El agotamiento de las reservas de carbón mineral, obligará en un futuro a los productores, a explorar nuevas regiones, a explorar los mantos de carbón a profundidades mayores de los 300 metros y también a aumentar las perspectivas de importar carbón o coque.

La cuantificación de las reservas totales de carbón mineral insitu de México quedan descritas en el Cuadro # 4.

CUADRO No. 4

RESERVAS DE CARBÓN MINERAL DE MEXICO ⁽²¹⁾
(10⁶ toneladas)

RESERVAS	COQUIZABLE ^{1/}	%	NO COQUIZABLE ^{2/}	%	TOTAL	%
Positivas	330.784	17.06	58.852	43.61	389.636	18.79
Probables	105.658	5.45	32.208	23.87	137.866	6.65
Posibles	<u>1 502.135</u>	<u>77.49</u>	<u>43.898</u>	<u>32.52</u>	<u>1 546.033</u>	<u>74.56</u>
	1 938.577	100.00	134.958	100.00	2 073.535	100.00

1/ Cuenca de Sabinas y Cuencas adyacentes, Coahuila

2/ Río Escondido, Coah., Sonora y Oaxaca

La disponibilidad y las características del mineral de hierro y de los reductores deberán considerarse durante una primera fase de la

selección del proceso. Será necesario examinar otras opciones de acuerdo con las mejoras técnicas y económicas de los demás factores. (Ver Anéndice II).

III. FUNDAMENTOS DE LA REDUCCION DIRECTA

Los aspectos fundamentales en que se basa la reducción directa son cuatro principalmente, y solo mediante un estudio exhaustivo de éstos, se podrá obtener una eficiente operación de los diferentes procesos.

1. PREPARACION DEL MINERAL DE HIERRO. El mineral de hierro en México se explota a partir de minas a cielo abierto; se utiliza el método denominado de grandes voladuras para la remoción del encapado^{1/} y del mineral, mediante la explosión de barrenos dispuestos en línea paralela con el frente de bancos^{1/}. Además, se emplean máquinas perforadoras de tipo rotatorio y de percusión, palas mecánicas y cargadores frontales para cargar los camiones mineros que transportan el mineral a granel, en tamaños que varían entre 76.2 y 101.6 cm., a la planta de trituración y molienda.

La trituración y la molienda de los minerales son procesos que se efectúan con el objeto de obtener una granulometría^{1/} homogénea para alcanzar las características químicas, físicas o fisicoquímicas requeridas para la concentración o beneficio de los minerales; permitiendo obtener procesos metalúrgicos eficientes.

^{1/} Ver Apéndice I.

La trituración se lleva a cabo normalmente por compresión y en una quebradora de quijadas. La molienda normalmente se efectúa en dos etapas; una primaria en molinos de barras y otra secundaria en molinos de bolas.

El beneficio se realiza en concentradores magnéticos, ciclos o mediante técnicas de flotación.

Para terminar con esta sección de preparación del mineral de hierro para su empleo, el mineral se puede aglomerar de cuatro diferentes formas: nodular, en briqueta, sinterizado y peletizado. Las dos últimas son las más empleadas y se describen a continuación brevemente.

La sinterización es un proceso en donde el producto obtenido, llamado sinter, es formado por finos de mineral de hierro y fundentes, lográndose aglomerar éstos a temperaturas cercanas a los 1300°C. Dichas temperaturas son producidas por la combustión del carbón del coque, elemento que es esencial para la formación del sinter.

El proceso moderno de aglomeración del mineral es el llamado peletizado que consiste en tratar de agrupar partículas que tienen un diámetro menor a 0.074 mms. y/o minerales de hierro de baja ley. El proceso se realiza en dos etapas, la primera que es donde se forman los llamados pelets verdes, crudos u oxidados^{1/} mediante la adición de agua y

^{1/} Partículas esféricas con un diámetro que fluctúa entre 10 y 30 mms.

algún aglutinante (bentonita, cal, y/o materiales orgánicos) al mineral beneficiado. Esto se efectúa, por medio de un boleado ocasionado en un disco rotatorio. Al finalizar se criba el producto y se hace pasar a la segunda etapa, la cual consiste de cinco secciones: la de carga al horno, secado, cocimiento, enfriamiento y descarga del horno. En la segunda etapa se controlan las propiedades físicas, como la resistencia mecánica deseada, detalle muy importante para su manejo, carga y utilización posterior.

2. BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA. En todo proceso químico se debe tener en mente, las leyes de conservación, de la materia y de la energía. Es por esto que en nuestro caso se deba dar una importancia primordial al análisis de las reacciones entre los óxidos de hierro, bien sea, partiendo de hematita (Fe_2O_3) o de magnetita - (Fe_3O_4). En la reducción directa los reductores usuales son el carbono, el hidrógeno, el monóxido de carbono o una mezcla de estos dos últimos. En la Tabla # 1 se mencionan las necesidades teóricas energéticas y de reductores para cada reacción fundamental. En dicha tabla se puede constatar que el consumo del reductor en el caso de la magnetita es mucho menor que para la hematita.

TABLA No. 1.

NECESIDADES TEORICAS ENERGETICAS Y DE REDUCTORES REQUERIDAS
PARA REACCIONES DE REDUCCION DIRECTA

REACCION	CANTIDAD DE REDUCTOR (ton/ton de Fe. reducido)	AH (Kcal/mol) ^{1/}
1.- $Fe_m O_n + nC \rightarrow mFe + nCO$		
$Fe_2 O_3 + 3C \rightarrow 2 Fe + 3 CO$	0.3223 C.	+ 117.3
$Fe_3 O_4 + 4C \rightarrow 3 Fe + 4 CO$	0.2864 C.	*
2.- $Fe_m O_n + nCO \rightarrow mFe + n CO_2$		
$Fe_2 O_3 + 3 CO \rightarrow 2 Fe + 3 CO_2$	0.7520 CO.	-6.3
$Fe_3 O_4 + 4 CO \rightarrow 3 Fe + 4 CO_2$	0.6684 CO.	*
3.- $CO_2 + C \rightarrow 2 CO$		+41.2
4.- $Fe_m O_n + nH_2 \rightarrow m Fe + nH_2O$		
$Fe_2 O_3 + 3 H_2 \rightarrow 2 Fe + 3 H_2O$	0.0537 H ₂	+23.4
$Fe_3 O_4 + 4 H_2 \rightarrow 3 Fe + 4 H_2O$	0.0477 H ₂	*

^{1/} AH > 0 reacción endotérmica.

AH < 0 reacción exotérmica.

* Valor desconocido

La cantidad de óxido de hierro que se logra reducir al emplear carbón como agente reductor, como se muestra en la reacción número uno, es relativamente poco, pero su importancia radica en que es la que provoca el inicio de las reacciones número dos y número tres. Esto ha sido demostrado por varios estudios experimentales⁽¹³⁾. Después de ser el carbón, el iniciador de las reacciones reductoras su importancia en la carga, es debida a que produce a través de la "reacción de Boudouard" (reacción # 3) el CO requerido para continuar con el proceso de reducción.

Cuando el reductor es una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, se producen las reacciones con uno y otro, en las proporciones que las situaciones del equilibrio químico y la cinética determinen. Se puede observar también que la reducción con hidrógeno se efectúa mediante la reacción número cuatro y requiriendo menos energía que para la reducción con carbón.

3. ALGUNOS ASPECTOS TERMODINAMICOS EN LA REDUCCION DE LOS OXIDOS DE FIERRO⁽⁴²⁾

Como en cualquier reacción metalúrgica la reducción, se encuentra condicionada por el equilibrio químico y la cinética de la reacción. Estos conceptos son calculados a partir de varios datos termodinámicos.

La constante de equilibrio, que está íntimamente ligada a la energía libre de una reacción, se calcula a partir de los valores de las actividades de los reactivos y productos presentes en la reacción. Para obtener dicha constante, es necesario conocer o en su defecto hacer suposiciones sobre las soluciones que entran en el cálculo.

Consideremos como ejemplo el equilibrio existente entre el hierro, la magnetita, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono a temperaturas menores de los 560° C. (A esta temperatura la magnetita es un óxido estable). Esto puede ser representado por la ecuación:



en donde:

Fe es hierro en su fase α

CO y CO₂ son gases, y

Fe₃O₄ es el óxido de hierro denominado magnetita

Supondremos que se conoce un valor numérico para ΔG° y que la presión total es de una atmósfera.

Si definimos

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K. \quad \dots (2)$$

el valor de la constante de equilibrio (K) puede ser encontrada fácilmente.

De la reacción número uno se puede ver que

$$K = \frac{a_{\text{Fe}}^3 a_{\text{CO}_2}^4}{a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} a_{\text{CO}}^4} \quad \dots (3)$$

En cualquier momento en que se aplique la constante de equilibrio a un problema específico, es necesario tener conocimiento o, hacer suposiciones sobre la naturaleza de las soluciones que se estén estudiando. En este caso supondremos que las soluciones gaseosas se comportan idealmente, de aquí, que las actividades de CO y CO₂ puedan reemplazarse por sus presiones parciales.

A la temperatura de interés, la solubilidad del carbón y del oxígeno en el hierro metálico y la magnetita puede ser ignorada. De aquí, que sus actividades sean iguales a la unidad, ya que debido a la solubilidad restringida la composición de estas fases permanece constante bajo las condiciones de presión y temperatura en consideración.

Se tiene entonces que

$$K = \frac{P_{\text{CO}}^4}{P_{\text{CO}_2}^4} \quad \dots (4)$$

$$\delta \quad K^{\frac{1}{4}} = \frac{P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}_2}} \quad \dots (5)$$

Para obtener los valores de P_{CO} y P_{CO_2} sabemos que:

$$P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} = 1 \quad \dots (6)$$

con lo que solucionamos nuestro problema.

4. CINÉTICA.

El estado final de una reacción puede ser predicho por métodos termodinámicos, más esto no nos proporciona información sobre la velocidad con que la reacción se aproxima al equilibrio. A temperatura ambiente muchas reacciones son muy lentas, esto se refleja en el hecho de que la mayoría de los metales pueden ser utilizados en contacto con el aire, de otra manera si se estableciera un equilibrio químico los metales se transformarían en sus óxidos. La cinética es, por tanto, responsable del hecho de que los productos metalúrgicos puedan ser utilizados. La cinética también afecta a los procesos de extracción de metales.

Para determinar la velocidad con que se va a desarrollar un proceso de reducción influyen muchos factores, dentro de los cuales se mencionan:

- 1) la reducibilidad del mineral
- 2) la temperatura de reducción
- 3) la granulometría y la permeabilidad
- 4) la concentración de los reductores.

En el Apéndice IV se muestran algunas propiedades termodinámicas de los óxidos de hierro.

IV. PROCESOS DE REDUCCION DIRECTA

Debido al deseo de emplear minerales de hierro de baja concentración y minerales de carbón no coquizables, así como a la búsqueda de mayores economías en los procesos siderúrgicos utilizados, se ha ido realizando a partir de la década de los cincuenta, una intensa investigación para desarrollar procesos que al menos parcialmente puedan sustituir al alto horno como fuente de suministro de hierro primario; surgiendo de esta manera los procesos de reducción directa.

A partir de lo anterior, muchos procesos se han propuesto combinando una gran variedad de agentes reductores, equipos y productos. En un trabajo reciente⁽³⁶⁾ se llegaron a tabular ochenta y un diferentes procesos.

En el Apéndice III se mencionan algunos de los procesos de reducción directa y su clasificación de acuerdo con el tipo de reductor empleado, así como también la capacidad instalada y la ubicación por país de aquéllos que se encuentran operando a escala comercial, en las dos últimas columnas.

A continuación se describen cuatro de los procesos considerados más importantes en el momento actual debido principalmente a que tienen la mayor capacidad instalada. En el Capítulo V se hace mención

exclusiva del proceso HYL debido a que fue el primero establecido a escala industrial, es el de mayor capacidad instalada mundialmente, con un gran futuro por delante y a que fue desarrollado completamente en México.

ARMCO

A partir de 1952, la ARMCO Research, E.U.A., comenzó a investigar la posibilidad de producir hierro mediante el método de reducción directa. En 1966 se hicieron públicas nuevas técnicas de reformación del gas natural en química industrial, información que condujo a la selección de hornos reformadores catalíticos de fuego directo para la generación de gas reductor caliente para inyección directa al horno de cuba en lugar del proceso empleado anteriormente (hornos de guijarros). Esta decisión fue tomada con base en la economía y simplicidad de operación del nuevo tipo de reformadores. Ya para 1969 se completó un estudio que confirmaba la conveniencia de construir una gran planta de reducción directa, escogiendo la ciudad de Houston, Texas, como el lugar más apropiado para levantar la nueva planta por razones de bajo costo, disponibilidad de gas natural y una creciente escasez de chatarra en dicha área.

La planta, en 1975, pasó por el período denominado de pueta en marcha.

La planta por su operación se divide en cuatro áreas principales:

1) Reformadores y líneas de transformadores de calor. El único y más importante aspecto del sistema de reformación del gas empleado en el proceso, es que se mantiene en condiciones estequiométricas^{1/}, específicamente la relación vapor/carbón que es entre 1.4 y 1.5; logrando con esto la producción de un gas reductor que contiene un 90% de H₂. Este gas reductor puede ser alimentado directamente en el horno de cuba, sin necesidad de recalentamientos o enfriamientos con la finalidad de quitar el exceso de agua que es característico en el uso de relaciones altas de vapor/carbón.

Ya que todos los reformadores son sensibles a la contaminación del azufre, el gas natural aunque bajo en contenido en dicho elemento, en el área de Houston, se pasa primeramente a través de desulfurizadores que trabajan a base de carbón activado, logrando con esto bajar su contenido de azufre a menos de 0.2 ppm.

Con algunas excepciones como el apagado debido a las reparaciones o pérdidas de vapor, la operación de las líneas de transformación de calor (calderas) ha sido adecuada. Se prevee que las operaciones de inspección y mantenimiento de las calderas se puedan efectuar durante los paros programados.

^{1/} Ver Apéndice I.

2) Horno de cuba. En este tipo de horno el mineral en trozos y/o los pelets empleados fluyen por gravedad, a partir de los tubos alimentadores de una tolva de almacenamiento ubicada en la parte alta del horno, hacia el interior del horno en donde son calentados, reducidos y enfriados por una contracorriente del gas reductor.

El inicio del procedimiento se realiza cargando el horno, purgándolo con nitrógeno e introduciendo el gas reductor a la temperatura deseada. Se requieren aproximadamente cuarenta y dos horas para alcanzar la temperatura adecuada del horno, con el fin de obtener un producto reducido y con la calidad requerida.

3) Compresor de gas superior. Este dispositivo se encarga de la recirculación del gas reductor hacia la parte baja del horno de cuba con el fin de que éste preste utilidad como gas enfriante, o sirva a los quemadores del reformador como combustible. Este dispositivo es de tipo lóbulo helicoidal y desplazamiento positivo, funcionando por medio de una turbina de vapor.

4) Limpieza del gas y tratamiento con agua. En esta área, el gas reductor ya usado es enfriado por contacto y limpiado por dispersión de agua antes de ser enviado a la sección de compresión.

Misceláneos

I) Análisis del gas reductor^{1/}:

<u>Constituyente</u>	<u>% en Volumen</u>
H ₂	68.3
CO	20.2
CO ₂	2.0
CH ₄	1.0
N ₂	0.1
H ₂ O	8.4

II) Características finales del producto obtenido^{2/}:

i) Propiedades químicas:

<u>Constituyentes</u>	<u>% en Peso</u>	
	<u>Pelet</u>	<u>Mineral</u>
Hierro total	90.9	95.4
O ₂	2.4	1.8
C	2.4	1.6
SiO ₂	3.2	0.7
Al ₂ O ₃	0.6	0.4
Otros	0.5	0.1

ii) Otras propiedades:

Metalización (%)	91	95
------------------	----	----

^{1/} A 871°C de temperatura de salida (Noviembre de 1974)

^{2/} Considerando cargas de pelets de Pea Ridge, E.U.A., y mineral en trozo de Brasil.

Reducción (%)	94	96
Temperatura de Salida (°C)	38	38
III) Consumo de energía:		
i) gas natural	455 Nm ³ /ton de hierro esponja	
ii) electricidad	37 KWH/ton de hierro esponja	
iii) vapor de agua	266 kg/ton de hierro esponja	
IV) Mano de obra:		
i) operación	5 hombres - operador	
		ayudante de operador
		cargador
		tamizador
		operador de tolva
ii) mantenimiento	3 hombres - mecánico	
		ayudante de mecánico
		electricista

MIDREX

El desarrollo del proceso Midrex principió con la escalación de una planta piloto de laboratorio en 1967 con fondos de la Midland - Ross Corporation, E. U. A.

El proceso Midrex es de tipo continuo. La reducción de mineral de hierro en forma de trozos o de pelets se efectúa en un horno de cuba vertical, cilíndrico, dividido en dos zonas: la parte superior (zona de reducción) y la inferior (zona de refrigeración). La zona de reducción, se carga por medio de varios conductos alimentadores, en ella, la materia prima desciende y se va calentando a la temperatura del proceso, aproximadamente 760°C, en seguida se reduce y se carburiza. A plena capacidad, el tiempo de permanencia en la zona de reducción es de alrededor de seis horas.

El gas reductor obtenido a partir de la reformación (por medio de un catalizador y gas reductor previamente utilizado en el horno de cuba, pero limpio)^{1/} del gas natural o nafta, penetra al horno de cuba, a una temperatura y análisis controlados. Este proceso lo realiza a través de numerosas aberturas equidistantes localizadas en la periferia del horno, extrayendo el oxígeno contenido por la carga. Este gas al dejar el horno es enfriado y lavado, condensando el vapor de agua y removiendo las partículas de polvo.

El material metalizado caliente que desciende a la zona de refrigeración se enfría por medio de un circuito cerrado de gas enfriante. Entre las dos zonas del horno existen dispositivos que impiden que el gas de enfriamiento pueda afectar a la reducción en la parte alta del horno.

^{1/} Ya que se emplea el gas reductor para reformar al gas natural, el contenido de azufre del mineral debe ser menor de .009%; de lo contrario el catalizador será envenenado.

La carga y descarga del horno de cuba se efectúan mediante un dispositivo mecánico patentado en el cual, tanto el tope como la salida, están provistos de sellos de gas inerte o esclusas dinámicas en equilibrio con los gases reductores en un caso y con los de enfriamiento en el otro.

Misceláneos:

I) Análisis del gas reductor:

<u>Constituyente</u>	<u>% en Volumen</u>
H ₂	70
CO	20
Otros	10

II) Características finales del producto obtenido:

i) Propiedades químicas:

<u>Constituyente</u>	<u>% en Peso</u>	
	<u>Pelet</u>	<u>Mineral</u>
Hierro total	93.97	96.41
P	0.01	0.05
C	0.79	0.77
Otros	5.23	2.77

ii) Otras propiedades:

	<u>Pelet</u>	<u>Mineral</u>
Metalización (%)	96.3	95.2
Temperatura de salida (° C)	40	40

SL / RN

Es un proceso para producir hierro esponja en un horno rotatorio con reductores sólidos, basado principalmente en la flexibilidad del uso de minerales de hierro en toda la gama de formas y dimensiones, y la disponibilidad a largo plazo del carbón como principal reserva energética. Surgió de una iniciativa conjunta entre The Steel Company of Canada Ltd., Lurgi Chemie und Huttentechnik GmbH y la Republic Steel Corporation, N. L. Industries, Inc.

La uniformidad de las propiedades físicas y químicas, así como el control de la alimentación de las materias primas son al igual que para todos los demás procesos, un requisito para una operación óptima.

La mezcla de mineral y de reductor se carga al horno, pasando primero por la zona de secado y precalentamiento, después a la zona de reducción, en la cual se realiza la eliminación del oxígeno contenido por los óxidos de hierro en forma gradual, dependiendo del aumento de la

temperatura alcanzada por el lecho del material. El aumento en el espesor del lecho desde la entrada hasta la salida del horno, debido a la congestión del material corresponde a los requisitos básicos del sistema.

En la zona de entrada existe un reducido espesor del lecho, sin embargo con el aumento del espesor del lecho causado por la inclinación del horno y la temperatura, las condiciones de reducción mejoran poco a poco.

Las temperaturas del horno se controlan mediante tubos de entrada de aire que están distribuidos a todo lo largo del horno, soplando aire en volúmenes controlados dentro del espacio libre y hacia el eje central de éste, con lo que se obtiene la combustión del monóxido de carbono que sube de la carga y de los componentes volátiles pertenecientes al carbón. Estos tubos de aire pueden tomar forma de quemadores de gas o de petróleo, si se llega a requerir.

El proceso SL/RN se caracteriza por el tipo de material de hierro que se va a emplear ya sea trozo, pellet, concentrados, finos o sinter ya que de ello dependerá la variante del proceso a utilizar:

- i) horno rotatorio recto;
- ii) parrilla de pre-endurecimiento combinada con horno rotatorio;
- iii) parrilla de endurecimiento combinada con horno rotatorio.

La mayoría de los reductores sólidos de mineral de carbón

sirven en este proceso, desde los ligníticos, hasta los antracíticos y/o cualquier mezcla de ellos. Dependiendo del contenido de materias volátiles, el reductor se puede alimentar parcialmente al horno junto con el mineral, también se puede inyectar por el extremo de descarga, o realizar una combinación de ambos. Para desulfurizar generalmente se utiliza óxido de calcio (CaO).

Al igual que para los demás procesos los almacenes de hierro esponja se deben proteger contra el calor por radiación, convección, conducción, etc., ya que si se llegan a producir temperaturas superiores a los 200° C y hay suficiente flujo de aire, habrá una rápida reoxidación. En algunas ocasiones se realiza una "pasivación" del hierro esponja, que es la aplicación de una película protectora anticorrosiva como puede ser la espuma de poliuretano.

HIB (High Iron Briquettes)

Se encuentra actualmente operando una sola planta perteneciente a la Orinoco Mining Co. en Ciudad Guayana, Venezuela. Fue diseñada para producir anualmente un millón de toneladas métricas de briquetas con un 75 % de reducción. El proceso es de lecho fluidizado y sus principales etapas son cuatro:

- 1) Preparación del mineral. Mediante la cual la mezcla

del mineral de hierro se pasa por un tipo de malla, se seca para facilitar su manejo, se tritura y se tamiza en un circuito cerrado para obtener finos pasantes por malla número diez.

II) Pre calentamiento y reducción del mineral. Aquí los finos del mineral son calentados aproximadamente a 870°C en un precalentador de lechos fluidizados de dos etapas, y la reducción se realiza a unos 700°C en un reductor de dos etapas de lecho fluidizado usando gas natural procesado, como reductor. En el reductor número 1, el mineral es reducido aproximadamente al nivel de 30 % por fluidización con gas de reducción parcialmente consumido del reductor número 2. En el reductor número 2 el mineral reducido parcialmente es fluidizado con gas de reducción nuevo y caliente para elaborar un producto de 75 % de reducción. El gas que sale del reductor es depurado por vía húmeda antes de entrar al distribuidor de gas combustible.

III) Briquetación. El mineral reducido se transfiere por medio de un elevador neumático al depósito de compensación colocado directamente encima de las prensas de briquetación. De este depósito, alimentadores sin fin transportan, precompactan y alimentan a presión el material entre los cilindros de briquetación. Fuerzas compresoras transmitidas a los cilindros por un sistema hidráulico dan al polvo caliente la forma de largas tiras que pasan al quebrador de tiras colocado debajo de los cilindros. Existe un tanque enfriador en donde las briquet

tas se enfrían por medio del gas inerte proveniente de los precalentadores y son transportadas hacia el lugar donde serán almacenadas.

IV) Producción de gas. En esta sección se recibe el gas natural que se va a emplear en el proceso. Primero se hace pasar a través de un tanque que es deshidratador y que también elimina impurezas, después se reforma catalíticamente y se enfría. Este gas contiene de 70 a 75 % de hidrógeno, se precalienta a una temperatura de 455°C y luego entra al recalentador de gas, donde nuevamente se calienta aproximadamente a 850°C . Este gas es el que suministra al reductor número 2.

V. PROCESO HYL

El proceso HYL fue el primer proceso de reducción directa que resultó económico a escala industrial, de ahí que sea un foco principal para la industria siderúrgica mundial. Todo comenzó en 1955 y se manifestó en 1957 con la instalación de la primera planta industrial de setenta y cinco mil toneladas anuales de hierro esponja, en la empresa Hojalata y Lámina, S. A., de donde tomó su nombre el proceso por haber sido ésta, con sus profesionales, técnicos y obreros, la creadora del mismo.

Tomando en cuenta que la principal materia prima es el mineral de hierro y que sus propiedades físicas y químicas varían inmensamente, afectando con ello los ritmos de producción de los equipos siderúrgicos, se han realizado amplios estudios para determinar la mejor utilización de este insumo.

Es el pelet una de las formas de aglomeración de mayor empleo en los grandes complejos siderúrgicos debido a sus múltiples cualidades. Los procesos necesarios para la formación de estos pelets son:

- 1) Extracción del mineral
- 2) Trituración
- 3) Molienda

- 4) Concentración $\left\{ \begin{array}{l} \text{magnética} \\ \text{por flotación} \\ \text{magnética y por flotación} \end{array} \right.$
- 5) Peletización^{1/}

A continuación se mencionan y se ejemplifican las características que se deben tener en consideración sobre los pelets verdes ⁽⁴⁾.

I) Temperatura de salida: 149°C

II) Propiedades Químicas:

i) Composición química (% en peso)

Oxidos de hierro	94.08
P	0.05
S	0.02
CaO	1.79
MgO	0.75
Al ₂ O ₃	1.03
Si ₂ O ₃	1.28
Otros	1.00

$$\text{ii) Basicidad} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2} = 1.10\%$$

III) Propiedades Físicas:

i) Peso volumétrico	ton/m ³	2.1
ii) Densidad aparente	ton/m ³	3.6

^{1/} Ver Capítulo II

iii) Resistencia a la compresión	kg/cm ²	237 a 437
iv) Índice de abrasión	Según ASTM ^{1/}	4.42
v) Granulometría	Δ 2.22 cm (> 7/8")	1 %
	Δ 1.59 cm (> 5/8")	17 %
	Δ 0.95 cm (> 3/8")	80 a 97 %
	Δ 0.32 cm (> 1/8")	100 %
	▲ 0.32 cm (< 1/8")	0 %
vi) Porosidad		24.92 %

El proceso HYL obtiene hierro metálico mediante una reducción sólida del mineral a granel, pelets o mezcla de ambos, operando a temperaturas inferiores a la temperatura de fusión del hierro y de sus óxidos.

Para lograr esta reducción, el proceso hace uso de una mezcla de gases reductores, compuestos en su mayor parte por hidrógeno y monóxido de carbono, obtenidos mediante la reformación catalítica de gas natural o de cualquier otro hidrocarburo reformable por vía termocatalítica.

Se ha distinguido el proceso por ser de lecho fijo, o sea que el material durante el ciclo de reducción permanece estático; característica en la cual se apoya la confiabilidad operacional, ya que no se pre-

^{1/} ASTM. American Society for Testing Materials (E. U. A.)

sentan los problemas de generación de finos por abrasión, arrastre de finos, falta de uniformidad del tiempo de residencia de las partículas, canalización del flujo gaseoso, sinterización parcial o total, etc., como en todos aquellos procesos de lechos fluidizados o móviles. Podemos también mencionar que existe una eficiencia térmica muy considerable debido al excelente aprovechamiento de los gases reductores y que el sistema de inyección de aire al gas reductor antes de que éste entre en los reactores y en contacto con el mineral, tenga un máximo nivel térmico, incorpore nitrógeno al torrente gaseoso, que se traduce en una mayor capacidad de transferencia térmica y realice una pequeña combustión de hidrocarburos residuales.

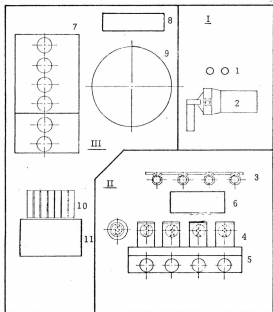
DESCRIPCION DEL PROCESO

Una planta de hierro esponja HYL, está constituida por tres áreas: reformación, reactores y auxiliares. (Ver Figura 1).

Area de Reformación.- El uso de un gas como reductor es indispensable en este proceso. El gas natural necesario para efectuar su propia transformación ha presentado las siguientes propiedades^{1/}:

^{1/} Se tomaron dos muestras, una de ellas en la zona norte del país (Monterrey), otra en la zona sur (Veracruz), y se analizaron con los resultados aquí reportados.

FIGURA No. 1: PLANTA DE HIERRO ESPONJA HYL.



I. AREA DE REFORMACION

- 1. Desulfurizadores.
- 2. Caldera Auxiliar.

II. AREA DE REACTORES

- 3. Enfriadores.
- 4. Precalentadores.
- 5. Reactores.
- 6. Cuarto de Control.

III. AREA DE AUXILIARES

- 7. Torre de enfriamiento.
- 8. Tratamiento de aguas.
- 9. Clarificador.
- 10. Condensador.
- 11. Caseta de compresores.

P R O P I E D A D E S	Z O N A	
	NORTE	SUR
i) <u>Químicas</u> (% en peso)		
Metano. CH_4	96.54	95.85
Etano. C_2H_6	2.58	3.01
Propano. C_3H_8	0.12	0.49
Butano y Otros. C_4H_{10} y C_nH_{2n+2}	0.01	0.02
Bióxido de Carbono. CO_2	0.40	-
Nitrógeno. N_2	0.31	-
Licuable	0.04	0.63
ii) <u>Físicas</u>		
Peso Específico kg/Nm^3	0.574	0.572
Poder Calorífico $Kcal/Nm^3$	8690	8770

Este gas pasa a unos desulfurizadores que trabajan a base de carbón activado. Este proceso se realiza en forma alterna cada setenta y dos horas.

En caso de que exista alguna contaminación en cualquiera de los desulfurizadores se hace pasar a través de ellos una contracorriente de vapor y aire durante cuarenta y dos horas continuas aproximadamente.

El gas ya desulfurizado, pasa a un horno reformador en donde es preparado como reductor por medio de una conversión termo-catalítica. El gas desulfurizado se mezcla con vapor de agua y es precalentado para pasar por una serie de filas de tubos de acero inoxidable que contienen un catalizador a base de níquel. Los tubos son calentados a fuego directo y dentro de ellos tiene lugar la conversión. La reacción es:



Los componentes químicos del catalizador se mencionan a continuación:

NiO.	Oxido de níquel
CaO.	Oxido de calcio
MgO.	Oxido de magnesio
Al ₂ O ₃ .	Oxido de aluminio

El contenido de níquel en el catalizador es de aproximadamente un 25 %.

El horno de conversión catalítica tiene una elevada eficiencia térmica ya que se aprovecha el calor residual de los gases de combustión para generar el vapor de agua requerido por el proceso y para el precalentamiento de la mezcla a reformar. El gas reformado presenta la siguiente composición (% en peso):⁽⁴⁾

CH ₄	-	3.0
CO	-	14.0
CO ₂	-	8.0
H ₂	-	75.0

y posteriormente pasa a través de un intercambiador de calor, donde parte de su calor es usado para producir vapor de agua. Este también es producido, durante el enfriamiento de los gases combustibles, en la sección de convección del horno reformador. El vapor de agua total producido es usado en la operación del reformado y en el suministro de potencia para la turbina que maneja el compresor de aire, bombas y diversos equipos.

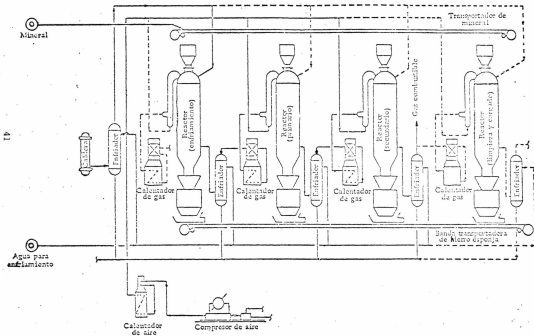
Area de Reactores.- (Ver Figura 2). El mineral a granel o los pellets de hierro verdes son conducidos mediante un sistema de bandas transportadoras, que los depositan en tolvas de almacenamiento situadas por encima de los reactores, desde donde éstos reciben su carga por gravedad.

El ciclo de reducción se efectúa en cuatro etapas:

1. Descarga del hierro esponja y carga de pellets y/o minerales.

2. Reducción secundaria en la cual el mineral es calentado y parcialmente reducido por los gases calientes que proceden de otro reactor.

FIGURA No. 2: AREA DE REACTORES.



3. Reducción primaria, en la cual el mineral reducido parcialmente (en la segunda etapa) prosigue su proceso de reducción por medio de un gas reductor llamado fuerte.

4. Enfriamiento, en el cual el hierro esponja caliente (de la primera etapa) es enfriado por contacto con gas reductor fresco. Este paso completa el proceso de reducción y permite el control del carbón, el cual puede ser variado entre 1.5 y 2.8 % en peso.

Contando con un diseño de planta de cuatro reactores el ciclo total se completa en 12 hrs., lo que representa un lapso de 3 hrs. para cada etapa; así pues, en cualquier instante cada uno de los cuatro reactores se encuentra en una de las cuatro etapas, como se observa en el Cuadro # 5.

CUADRO No. 5

ETAPAS DE OPERACION DE REACTORES EN EL PROCESO HYL

REACTOR	E T A P A S			
	PRIMERA	SEGUNDA	TERCERA	CUARTA
# 1	Secundaria	Primaria	Enfriamiento	Limpieza y Carga
# 2	Limpieza y Carga	Secundaria	Primaria	Enfriamiento
# 3	Enfriamiento	Limpieza y Carga	Secundaria	Primaria
# 4	Primaria	Enfriamiento	Limpieza y Carga	Secundaria

Cada unidad reductora consta de:

i) Un horno de precalentamiento donde el gas reductor es calentado hasta la temperatura de trabajo requerida (entre 700° y 816°C).

ii) Un horno que calienta una corriente de aire simultáneamente y casi a la misma temperatura que el horno anterior; de ahí, se toma una cantidad controlada y se inyecta a la corriente del gas reductor, causando esto una combustión parcial de dicho gas, el calor generado hace que la mezcla de gases alcance una temperatura entre 982° y 1232°C . Esta temperatura deberá de ser lo suficientemente alta para alcanzar los requerimientos de reducibilidad del mineral en el reactor.

iii) Un reactor de lecho fijo en el cual el gas fluye a través del pelet o mineral reaccionando con el oxígeno del mismo.

iv) Un enfriador de contacto en donde el gas es enfriado repentinamente para, de esta manera, remover el agua que se haya formado por la reacción del hidrógeno y el oxígeno.

Al terminar la reducción, el pelet o mineral se carburiza y se enfría hasta temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. El hierro esponja se descarga por el fondo del reactor y se envía por banda a una tolva de almacenamiento y homogenización. El producto metalizado obtenido está listo para su uso y presenta en forma ejemplificada las

siguientes características ⁽⁴⁾:

I) Temperatura de salida: de 35° a 90° C.

II) Propiedades químicas:

i) Metalización.- 85.1 % a 90.0 %

ii) Composición química (% en peso).

Hierro total.- 87.2 a 88.1

Ganga.- 4.3 a 4.4

Cal agregada.- 1.9 a 2.0

Oxígeno.- 2.5 a 3.7

Carbón.- 1.5 a 2.8 en forma de Fe_3C ^{1/}

III) Propiedades físicas:

i) Peso volumétrico ton/m³ 1.6

ii) Densidad aparente ton/m³ 2.6

iii) Resistencia a la compresión Kg/cm² 50

iv) Granulometría

> 2.22 cm (> 7/8")	1 %
> 1.59 cm (> 5/8")	49 %
> 0.95 cm (> 3/8")	83 %
> 0.64 cm (> 1/4")	90 %
> 0.48 cm (> 3/16")	95 %
< 0.48 cm (< 3/16")	5 %

^{1/} De esta cantidad sólo del 0.10 al 0.15 % aparece como grafito.

Al descargar un reactor se realiza el proceso de limpieza, denominado barrido, con un flujo de gas inerte formado por dióxido de carbono y nitrógeno. Después, se tapa el fondo del reactor y se procede a cargarlo nuevamente, cerrándolo completamente, el reactor es purgado otra vez con gas inerte. Se presuriza con gas natural en preparación, para volver al proceso en la etapa secundaria.

Esta área fue diseñada para obtener un alto grado de flexibilidad en su operación, haciendo con esto posible que el personal de la planta pueda ajustar las condiciones del proceso de acuerdo con las variaciones en la calidad de mineral con que va a trabajar. El ritmo de producción de cualquiera de estas plantas, varía de acuerdo con la calidad y reducibilidad de los pelets oxidados o del mineral a granel abagtecido.

Área de Auxiliares.- La forman todos los equipos auxiliares necesarios para el proceso, a saber:

- i) Torre de enfriamiento.
- ii) Clarificador - instalación que sirve para separar los finos del mineral del agua empleada.
- iii) Planta de tratamiento de aguas.
- iv) Condensador.
- v) Compresores de aire.

- vi) Tanques de gas inerte.
- vii) Bombas.

A continuación, y como comentario adicional, se describirán las normas de seguridad empleadas en el proceso HYL:

1) Las normas para el diseño, la ingeniería y la selección de los materiales que intervienen en la fabricación de los equipos de las plantas de reducción directa se rigen por los códigos de E.U.A. de la ASTM (American Society for Testing Materials), ASM (American Society of Metals) y AISI (American Iron and Steel Institute).

2) Dispositivos de seguridad para prevenir fallas humanas de operación, e. g. evitar la apertura de un reactor que no sea el seleccionado para ser descargado.

3) Dispositivos de protección de los equipos e. g. un sistema de alarmas de control remoto que están convenientemente distribuidas en los principales puntos de la planta.

4) Equipo de seguridad para el personal de la planta.

5) Todos los servicios (agua, vapor, gas inerte, etc.) cuentan con 2 bombas, una operando y otra parada, para prevenir cualquier falla y asegurar su disponibilidad en la planta.

La empresa empleada en la ingeniería es Swindell-Dressler, la cual es una división de la Pullman Incorporated (E.U.A.). En la construcción las que se emplean son, Swindell-Dressler (E.U.A.) y Bufete Industrial, S. A. (México).

VI. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Las perspectivas de los procesos de reducción directa a futuro dependerán de una serie de factores tales como el aumento en los costos de las materias primas básicas, su disponibilidad y el número de usos que se les encuentre al hierro esponja y a los prereducidos.

Para países en vías de desarrollo con disponibilidad de recursos energéticos, e.g. gas natural, electricidad y algunos otros hidrocarburos ligeros, los procesos de reducción directa aparecen como un medio muy atractivo para la producción de acero. Aunado ésto, a la aparente escasez de carbón coquizable, chatarra, escala de producción, y el elevado costo de capital de las plantas utilizando alto horno - convertidor al oxígeno es razonable pensar que, en el futuro existirá una mayor cantidad de plantas que utilicen reducción directa - horno eléctrico para la producción de acero.

Ya que las comparaciones económicas son esenciales al decidir entre las distintas opciones para fabricar acero, debe enfatizarse que las cifras no siempre muestran el panorama completo. En los casos en que varias opciones tecnológicas aparecen relativamente similares desde el punto de vista de costos de producción^{1/}, deben tomarse en cuenta los intangibles como la confiabilidad y la flexibilidad. El horno eléctrico de arco proporciona un proceso que ha probado ser confiable para ope

^{1/} Ver Apéndice V.

raciones de cierto tonelaje siendo su máximo de 150 toneladas por colada. El equipo es resistente y tiene larga vida, esto se demuestra ya que existen hornos que han estado en operación desde hace 40 ó 50 años. En los casos de deterioro en el refractario no es tardado instalarlo nuevamente, e iniciar de nueva cuenta operaciones, logrando con ésto que las pérdidas de producción sean pequeñas. La mayoría de las acerfas con alto horno, requieren cuando menos de dos hornos con el fin de tener metal caliente disponible cuando un horno sufre una descompostura que requiera una reparación importante de varios meses de duración y con un costo considerable.

La flexibilidad del horno eléctrico de arco es bien conocida ya que utiliza una variedad extensa de materias primas y produce una versátil gama de productos. Además en el supuesto caso de que alguno de los procesos posteriores en la producción de acero, i.e. colada continua o lingoteado, sufriese algún percance y por tal motivo se contemple la necesidad de un paro, se puede decir que desde el punto de vista económico es más atractivo el horno eléctrico de arco que el convertidor al oxígeno con respecto al tiempo y al volumen de ambos.

Si observamos el período de aprendizaje en el manejo del equipo de los procesos que se mencionan anteriormente, se ha observado una ganancia considerable en tiempo y al corto plazo en dinero en la ruta de

reducción directa - horno eléctrico de arco, sobre la ruta del alto horno - convertidor al oxígeno. Se puede mencionar como un ejemplo promedio de este punto, el arranque de la planta # 3 de hierro esponja y el taller de aceración eléctrica de Monterrey, Nuevo León, debido a que logró producir a su capacidad de diseño en 30 días^{1/}; el proceso empleado es el de la misma compañía (HYL).

En el Cuadro # 6 se muestran las ventajas y desventajas observadas hasta el momento, con el empleo de hierro esponja. Sin embargo, y debido a la forma en que se presenta la información en el cuadro antes mencionado, se pierden otras ventajas tecnológicas, de los procesos de laminación en caliente, estirado en frío y fabricación de tubo de acero sin costura. Estas son obtenidas, si y sólo si, el acero empleado como insumo para estos procesos procede de hornos eléctricos de arco.

La causa fundamental de estas últimas ventajas, radica en que el acero fabricado a partir de hierro esponja, a comparación con el de chatarra, presenta un contenido de elementos residuales menor, como en los casos de los contenidos de cobre y estaño⁽³⁴⁾.

Las ventajas se pueden resumir en los siguientes puntos:

^{1/} Si consideramos exclusivamente la planta de hierro esponja, ésta logró producir a su capacidad de diseño en 9 días.

USOS DEL HIERRO ESPONJA

USADO EN EQUIPO DE:	LA FUNCION QUE DESEMPEÑA ES DE:	VENTAJAS	DESVENTAJAS	OBSERVACIONES
1. Obtención de Cobre	Precipitar ^{1/}	<ul style="list-style-type: none"> i) Reemplaza a la chatarra ii) Facilidad de transporte iii) Sirve para dosificar la cantidad requerida 		<ul style="list-style-type: none"> i) No se requieren características específicas como grado de metalización y/o contenido de impurezas
2. Cubilote	Carga	<ul style="list-style-type: none"> i) Puede substituir a la chatarra en un 40% para producir hierro dúctil o gris, sin crear efectos adversos en la operación ii) No presenta elementos residuales iii) Composición química conocida y consistente 		<ul style="list-style-type: none"> i) El grado de metalización requerido es de 80% ii) Hay que tener cuidado en el control de la insuflación de aire, pues se podría presentar el fenómeno de segregación (diferencias de concentraciones) iii) Control sobre la cantidad de fósforo y azufre en el hierro esponja, pues esto tiene fuertes repercusiones en el producto
3. Alto Horno	Carga	<ul style="list-style-type: none"> i) Incremento en la productividad ii) Disminución en el consumo de coque 		<ul style="list-style-type: none"> i) Grado de metalización requerido de 46 a 53 %
4. Hornos de Hogar abierto	Carga	<ul style="list-style-type: none"> i) Puede ser usado con un alto porcentaje de finos sin afectar la productividad ii) Reduce el tiempo de carga 	<ul style="list-style-type: none"> i) No poder usar cargas con un porcentaje mayor a 30%, debido a que se obtienen resultados ineficientes 	<ul style="list-style-type: none"> i) Grado de metalización promedio empleado en los experimentos 85.3% ii) La carga que mostró resultados óptimos fue de arrabio 75% y hierro esponja 25%
5. Convertidores al oxígeno	Carga y principalmente como agente refrigerante	<ul style="list-style-type: none"> i) Menor tiempo de carga ii) Mejor composición química iii) Control más exacto de la temperatura iv) Alarga la vida del refractario v) Mayor productividad vi) Posibilidad de automatización vii) Favorece la formación de escoria 	<ul style="list-style-type: none"> i) Uso de mayor cantidad de arrabio por diferencia de volumen 	<ul style="list-style-type: none"> i) Grado de metalización requerido de 90 a 95%
6. Hornos Eléctricos	Carga	<ul style="list-style-type: none"> i) Incremento en la productividad ii) Reducción en el tiempo de refinación y fundido iii) No presenta elementos residuales iv) Ayuda a diluir los residuos procedentes de la chatarra empleada en la carga v) Logra un arco más estable vi) Composición química conocida y consistente vii) Obtiene un producto más homogéneo 		<ul style="list-style-type: none"> i) Se aumenta ventajas si se logra alimentar continuamente el hierro esponja al horno

^{1/} En los procesos de beneficio o de concentración del cobre existe uno llamado LPF (Lixiviación - Precipitación - Flotación) en donde los óxidos de este metal son transformados a cobre metálico, el cual responde rápidamente a la flotación. El hierro esponja se usa para precipitar el cobre antes de la flotación.

i) Obtención de una mayor reducción en los castillos de los trenes de laminación, logrando aumentar el peso de los lingotes y por con siguiente un aumento en la producción.

ii) Disminución en el número de tratamientos térmicos, ahorrando energéticos y aumentando la productividad.

iii) Lograr fabricar tubos de acero sin costura con superficies exteriores e interiores más lisas, con fisuras menos numerosas y defectos menos profundos.

Las economías de escala son muy significativas y de mucha consideración en los procesos de RD-HEA y AH-CAO, como lo indica - Cockerill⁽¹²⁾, ya que es necesario operar un alto horno de 3 millones de toneladas anuales para aprovechar todas sus economías de escala disponibles. Este punto debe de estudiarse profundamente, ya que el alto horno de mayor tamaño en operación en 1974, está instalado en Fukuyama, Japón; produciendo 10 mil toneladas diarias de arrabio y la planta de reducción directa de mayor escala produce únicamente mil trescientas toneladas diarias de hierro esponja.

Al analizar la información recabada por el autor, sobre el complejo siderúrgico Lázaro Cárdenas - Las Truchas, S. A., se pueden

comentar las siguientes consideraciones:

i) Uno de los principios en que está basado el proyecto SICARTSA, es la demanda, y esto es uno de los elementos económicos más problemático de analizar, debido a la complejidad y cantidad de las variables que influyen sobre ella. Esto último ha provocado diversos métodos de pronóstico y por tanto una serie de errores de clasificación y cuantificación. En el Cuadro # 7 se muestran algunas proyecciones de la demanda de aceros, planos y no planos livianos; realizados por distintas instituciones. En él se observan diferencias consi-derables entre la proyección más optimista y la más conservadora, principalmente en los años de 1975 y 1980. Estas diferencias podían por ellas mismas provocar el éxito o el fracaso de una nueva planta, razón por la cual se deseaba ver si la instalación de este complejo, en sus dos etapas es realmente deseable y adecuado.

ii) Otro de los principios en que se fundamenta el proyecto, es el del mercado internacional, debido a que se encuentra ubicado en la costa del pacífico. Sin embargo, el programa de ventas al exterior tendrá que ser competitivo con el japonés, ya que éstos son los que marcan la pauta del mercado en esa zona. Esta situación se nota peligrosa.

CUADRO No. 7

PROYECCIONES DE LA DEMANDA DE ACEROS, PLANOS Y NO PLANOS LIVIANOS,
 REALIZADAS POR DISTINTAS INSTITUCIONES ⁽³⁸⁾
 (10³ TONS)

CONCEPTO	AÑO	INSTITUCIONES		
		NACIONAL FINANCIERA, S.A.	HOJALATA Y LAMINA, S.A.	ALTOS HORNO DE MEXICO, S.A.
I. Aceros planos	1975	2 383	2 240	2 010
	1976	2 580	2 420	2 150
	1977	2 800	2 620	2 300
	1978	3 040	2 840	2 480
	1979	3 300	3 080	2 600
	1980	3 610	3 340	2 770
	II. Aceros no planos livianos	1975	2 026	1 820
1976		2 246	1 980	1 850
1977		2 465	2 160	1 980
1978		2 685	2 350	2 100
1979		2 904	2 560	2 240
1980		3 124	2 780	2 490

iii) En cuanto a los costos de capital y producción, se obtuvieron cifras para los primeros, comparando a los tres procesos considerados para el establecimiento del complejo, como se muestra a continuación:

PROCESO	INVERSION ESTIMADA. (10 ⁶ \$ M.N.) ^{1/}
Alto horno - convertidor al oxígeno	2 145.6
HYL - horno eléctrico de arco	1 994.3
SLRN - horno eléctrico de arco	1 994.8

Se puede ver que existe un ahorro de 151 millones de pesos (moneda nacional) con el empleo de los procesos de reducción directa, pero se argumenta que dicha diferencia desaparece al realizar el estudio de los costos de producción para cada proceso⁽³⁹⁾.

No fue posible obtener por parte del autor, ninguna publicación en donde se mencione el estudio de los costos de producción de los tres procesos en forma detallada, y por consiguiente asegurarse de lo anteriormente aseverado.

^{1/} Se consideraron también los equipos auxiliares. Se tomó como base de cambio 1 U.S. dólar = \$12.50.

Analizando los requerimientos de personal para el complejo, sobresalió un detalle curioso, es menor el requerido por las opciones de reducción directa ⁽⁴¹⁾.

De todo lo expuesto en este capítulo, se puede deducir que, en la selección de alguna opción para fabricar acero no debe pasarse por alto ningún detalle y que cada uno de los procesos existentes a escala comercial, debe ser evaluado detenidamente y con toda seriedad, ya que es una decisión compleja que se debe de tomar basada en las circunstancias particulares de cada caso.

APENDICE I.

GLOSARIO DE TERMINOS

Banco.- Macizo de mineral que presenta dos caras descubiertas, una horizontal superior y otra vertical.

Condiciones estequiométricas.- Indican la relación en peso de las sustancias que participan en una reacción.

Consumo energético.- Es todo aquel insumo que tiene como función generar calor. En el caso de plantas de reducción directa se debe de mencionar tanto el empleado en el área de reactores como el utilizado en elementos auxiliares, empezando desde el patio de minerales y finalizando en el área de despacho del producto reducido.

Criadero.- Agregado de sustancias inorgánicas de útil explotación que naturalmente, se halla entre la masa de un terreno.

Encapado.- Aplícase a la mina cuando el criadero no asoma a la superficie.

Grado de metalización (M).- Es la relación existente entre el hierro metálico (Fe_m) del producto reducido y el hierro total (Fe_t) de la composición química del mineral empleado. El grado de metaliza-

ción suele ser expresado en forma porcentual.

$$\% M = \frac{Fe_m}{Fe_t} \times 100$$

El hierro residual que no alcanzó a ser totalmente reducido a hierro metálico, va a ser encontrado en grados de oxidación menor. Es por esta razón que, el grado de reducción es siempre mayor que el de metalización.

Grado de reducción (R).- Es la relación que existe entre el oxígeno desplazado (O_p) de los óxidos de hierro y el oxígeno total (O_t) en éstos, antes de efectuar la reducción. El grado de reducción suele ser expresado en forma porcentual.

$$\% R = \frac{O_r}{O_t} \times 100$$

Granulometría.- Es la técnica mediante la cual se obtiene un tamaño de partícula adecuado en los minerales, para lograr una eficiente operación posterior.

Reactor.- Instalación destinada a la producción y regulación de escisiones nucleares mediante los neutrones liberados en las mismas.

Este término, comunmente se maneja como horno, y es el significado que ha sido adoptado en el presente trabajo.

Reducción.- Es una reacción química en donde algún elemento presenta su número de valencia algebraicamente disminuido.

Reducción directa.- Es cuando en un proceso de reducción, ésta se efectúa sin llegar a la fusión del mineral. En el caso que nos interesa, la reducción en la industria siderúrgica, la función radica en la eliminación del oxígeno de los óxidos de hierro. Durante este proceso no ocurre ninguna refinación, por lo que el producto, será un reflejo del tipo de mineral que se utilice como insumo. La reducción del hierro no es difícil de llevar a cabo. Lo que a través de los años se ha tratado de lograr es un proceso que reduzca selectivamente, sea confiable, barato y se efectúe en un corto período.

La reducción en el estado sólido no se efectúa en su totalidad, debido a restricciones del tipo económico. Los productos industriales más comunes en la reducción directa se denominan, hierro esponja y prerreducidos. Se le suele llamar hierro esponja al mineral de hierro reducido en un mínimo del 85 % ó más, conservando su forma original, pero con una mayor porosidad. Se llama prerreducido al mineral de hierro cuyo grado de reducción es menor al 85 %. El límite del 85 % se ha fijado por razones económicas⁽⁹⁾.

Reducibilidad⁽³⁷⁾. - La facilidad con que el oxígeno puede ser removido de un material. Una de las características más importantes son la textura física y la composición química del material.

Reductor. - Se le llama así a toda substancia química que dona o pierde electrones.

Reservas. - Las reservas se clasifican generalmente de 3 maneras⁽²¹⁾:

a) Positivas. - es aquella cantidad de mineral que aparece en un yacimiento, mediante el cálculo de los afloramientos, zanjas, labores mineras y barrenos; con una separación máxima de 250 metros entre cada punto informativo.

b) Probadas. - es la cantidad de mineral calculado en parte por medidas directas y en parte proyectando los mismos datos en distancias razonables de acuerdo con evidencias geológicas. En general la distancia entre los puntos de observación es entre 250 metros y 4 kilómetros.

c) Posibles. - es la cantidad de mineral que no se encuentra clasificada debido a que la línea de afloramiento no se ha determinado con exactitud, o donde no se ha demostrado la existencia del mineral con toda la información disponible, teniendo opciones de existencia.

APENDICE II.

LINEAMIENTOS PARA LA ELABORACION DE UN ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SOBRE UN PROYECTO SIDERURGICO PARA LA PRODUCCION DE HIERRO PRIMARIO.

Los factores que se deben de tomar en cuenta para decidir sobre la instalación y selección de procesos de una planta para producir hierro primario pueden ser agrupados de la siguiente manera:

1.- Factores técnicos relacionados con las materias primas:

1.1. Disponibilidad de minerales de hierro, condiciones de reducibilidad, características y accesibilidad.

Dado que el mineral de hierro representa uno de los insumos básicos e indispensables, su disponibilidad, accesibilidad y otras características son condiciones fundamentales al examinar la factibilidad de algún proyecto siderúrgico para la producción de hierro primario.

Otras características del mineral que deben ser estudiadas son:

- i) granulometría
- ii) reducibilidad
- iii) porosidad
- iv) composición química
- v) identificación de impurezas.

Así como también, un análisis del tipo de proceso que se piensa emplear para el beneficio.

1.2. Disponibilidad de reductores. Los reductores en el mundo contemporáneo van a mostrar una gran influencia sobre la elección de procesos, así como sobre el tamaño y la localización de las plantas. Tal influencia parte del conocimiento de la magnitud y características de las reservas de los reductores.

De lo comentado sobre el mineral de hierro y los reductores, en el Capítulo II, se observa claramente que no podrá recomendarse un proceso de reducción directa de acuerdo con la disponibilidad de éstos, sin antes efectuar una serie de pruebas técnicas de compatibilidad entre ellos. Los resultados obtenidos de esta manera promoverán la confiabilidad del proceso que haya sido seleccionado.

1.3. Disponibilidad de energía eléctrica, agua y otros insumos.

2.- Factores técnicos relacionados con la localización:

2.1. Accesibilidad a las materias primas y a los mercados.

2.2. Infraestructura física disponible.- Transporte, comunicaciones y servicios generales.

2.3. Recursos humanos.- Disponibilidad de técnicos, investigadores y mano de obra.

2.4. Externalidades económicas derivadas de la concentración industrial.- Los beneficios reportados por la existencia de industrias auxiliares en la región.

3.- Factores relacionados con el tamaño de la planta:

3.1. Estudio de los mercados: regional, doméstico o de exportación.

3.2. Perspectivas de crecimiento.

3.3. Presencia de economías de escala en las tecnologías bajo estudio.

4.- Factores económicos y financieros:

4.1. Valor de la inversión total.

4.2. Disponibilidad de recursos financieros y términos crediticios.

4.3. Costo de producción.

4.4. Costos de licencia y asistencia técnica.

5.- Factores relacionados con la confiabilidad de la planta:

- 5.1. Experiencias existentes y probadas.
- 5.2. Simplicidad de diseño y de operación.
- 5.3. Tiempo de instalación y puesta en marcha.
- 5.4. Versatilidad en el empleo de materias primas.
- 5.5. Garantías otorgadas.

6.- Otros factores:

- 6.1. Opciones de diseño, construcción y montaje de la planta, fabricación de la maquinaria y equipo, nacionales o extranjeras.
- 6.2. Posibilidades de adiestramiento y capacitación del personal.
- 6.3. Aspectos de la contaminación ambiental.
- 6.4. Políticas nacionales relacionadas con el desarrollo de la región.

ALGUNOS DE LOS PROCESOS CONOCIDOS DE REDUCCION DIRECTA

PROCESO	TIPO DE REDUCTOR	PLANTA	PAIS	CAPACIDAD (10 ³ TONS. DE Fe TOTAL)
KRUPP - RENN	sólido	Dunswart	Sudáfrica	150
SL/RN	sólido	Glenbrook	Nueva Zelanda	150
		Inchon	Corea	150
		Sudbury	Canadá	300
		Piratini	Brasil	65
		Witbank	Sudáfrica	750
Kawasaki	sólido	Chiba	Japón	110
		Mizushima	Japón	240
		Muroran	Japón	43
Bassett	sólido			
Sturzelberg	sólido			
Domnarfvet	sólido			

...

PROCESO	TIPO DE REDUCTOR	PLANTA	PAIS	CAPACIDAD (10 ³ TONS. DE Fe TOTAL)
Horney Wills	sólido			
Maier-Mococo	gaseoso			
Azincourt	gaseoso			
Scortecci	gaseoso			
Hoganas	sólido			
Chenot	sólido			
Larkins	sólido			
Dupuy	sólido			
Lang	sólido			
Wiberg	gaseoso			
Norks - Stall	gaseoso			
U.S. Bureau of mines	gaseoso			
Skinner Multiple-Hearth	gaseoso			
Cape - Brassert	gaseoso			
United verde	gaseoso			

PROCESO	TIPO DE REDUCTOR	PLANTA	PAIS	CAPACIDAD (10 ³ TONS. DE Fe TOTAL)
Norwegian H - Iron	gaseoso			
Galluser	gaseoso			
Tysland - Hole	sólido			
Lubatti	sólido			
Elek trometall	sólido			
Dwight-Lloyd-McWane	sólido			
Strategic - Udy	sólido			
Edwin - Elektrokewisk	sólido			
HIB	gaseoso	Ciudad Guayana	Venezuela	1 000
H - Iron	gaseoso			
Fior	gaseoso			
Stalling	gaseoso			
Bubble - hearth	gaseoso			
Novalfer	gaseoso			
Madaras	gaseoso			

PROCESO	TIPO DE REDUCTOR	PLANTA	PAIS	CAPACIDAD (10 ³ TONS. DE Fe TOTAL)
HYL	gaseoso	Monterrey	México	75
		Monterrey	México	190
		Monterrey	México	420
		Veracruz	México	190
		Puebla	México	250
		Matanzas	Venezuela	225
		Bahía	Brasil	330
Ongree - Liege	sólido			
Demag - Humboldt	sólido			
Weber	sólido			
Rudolph - Laudin	sólido			
Leckie	sólido			
Gerhardt	sólido			
Ontario Research Foundation	gaseoso			
O. R. F. Direct Steel	gaseoso			

PROCESO	TIPO DE REDUCTOR	PLANTA	PAIS	CAPACIDAD (10 ³ TONS. DE Fe TOTAL)
Flame - smelting	gaseoso			
Twyman	gaseoso			
Purofer	gaseoso	Oberhausen	Alemania	150
Armco	gaseoso	Houston	E. U. A.	330
Midrex	gaseoso	Portland	E. U. A.	440
		Georgetown	E. U. A.	350
		Hamburgo	Alemania	400
		Montreal	Canadá	400
Nuevo Proceso (NP)	sólido	Legazpia	España	20

APENDICE IV

ALGUNAS PROPIEDADES TERMODINAMICAS DE LOS OXIDOS DE HIERRO ⁽²⁶⁾

N O M B R E	FORMULA QUIMICA	CONTENIDO DE CALOR A 25° C (Cal/mol)	ENTROPIA A 25° C (Cal/mol)	PUNTO DE FUSION NORMAL (°C)	CALOR DE FUSION (Cal/mol)	PUNTO DE TRANSICION (°C)	TEMPERATURA DE DESCOMPOSICION (°C)
Oxido ferroso	$Fe_{0.95}O$	-63,800	13.74	1,377	7,490	-	-
Tetraóxido férrico	Fe_3O_4	- 267,800	35.00	1,597	33,000	627	-
Trióxido férrico	Fe_2O_3	- 196,800	21.50	-	-	677	1,457

APENDICE V

COSTO ESTIMADO COMPARATIVO DE FABRICACION DE ACERO SEGUN LA RUTA
ALTO HORNO - CONVERTIDOR AL OXIGENO VS. REDUCCION DIRECTA - HORNO ELECTRICO DE ARCO (27)

CONCEPTO	AH - CAO			RD - HEA		
	Costo Unitario (\$)	Unidades/ton. métrica	Costo/ton. métrica (\$/ton.)	Costo Unitario (\$)	Unidades/ton. métrica	Costo/ton. métrica (\$/ton.)
I. - Hierro Primario						
Materiales:						
i) Pelets (66 %)	231.00	1.0 ton.	231.00	231.00	1.5 ton	346.50
ii) Mineral (55 %)	139.63	0.6 ton.	83.75			
iii) Coque	562.50	0.6 ton.	337.50			
iv) Piedra caliza	18.75	0.1 ton.	1.88			
v) Aceite	0.30	0.15 lt.	4.50			
vi) Gas				0.18	509.7 m ³	91.75
Subtotal			658.63			438.25
Costo Directo:						
i) Mano de obra	71.38	0.2 HH.	14.28	71.38	0.3 HH	21.41
ii) Energía Eléctrica	0.10	100.0 Kwh.	10.00	0.10	8.0 Kwh.	0.80
iii) Refractarios			15.63			1.25
iv) Reparación y mantenimiento			18.75			18.75
v) Refacciones			2.50			5.00
vi) Gastos generales			6.25			12.50
Subtotal			67.41			59.71
Costo Fijo a 20 %			100.00			87.50
Subtotal			100.00			87.50
Costo total por tonelada de hierro primario			826.04			585.46
II. - Acero						
Materiales:						
i) Metal líquido	826.04	0.7 ton.	578.23	585.46	0.7 ton.	409.82
ii) Chatarra	475.00	0.3 ton.	142.50	475.00	0.3 ton.	142.50
iii) Aditivos	2 750.00	0.01 ton.	27.50	2 750.00	0.01 ton.	27.50
Subtotal			748.23^{1/}			579.82^{1/}
			850.26^{2/}			623.46^{3/}
Costo Directo:						
i) Mano de obra	71.38	0.5 HH	35.69	71.38	0.6 HH	42.83
ii) Oxígeno	125.00	0.075 ton	9.38	450.00	0.04 ton	18.00
iii) Energía Eléctrica	0.10	0.13 Kwh.	0.01	0.10	600.00 Kwh.	60.00
iv) Electrodo				10 000.00	0.005 ton.	50.00
v) Refractarios			18.75			21.88
vi) Fundentes	225.00	0.073 ton.	16.43	225.00	0.073 ton.	16.43
vii) Reparación y mantenimiento			12.50			10.00
viii) Refacciones			7.50			7.50
ix) Servicios			5.63			5.00
x) Gastos generales			12.50			12.50
Subtotal			118.39			244.14
Costo Fijo a 20 %			55.00			62.50
Subtotal			55.00			62.50
Costo total por tonelada de Acero			1 023.65			930.10

- 1/ Subtotal considerado a un rendimiento ideal de 100 %.
2/ Subtotal considerado a un rendimiento práctico de 88 %.
3/ Subtotal considerado a un rendimiento práctico de 93 %.

NOTAS:

- 1) Se consideró para la elaboración del cuadro, que todos los insumos fueron comprados.
2) Los costos unitarios utilizados se basaron en precios de E. U. A.
3) Los cargos de transportación no están incluidos.
4) Se consideró una carga metálica en la acería de arrabio o hierro esponja de 70 % con un 30 % de chatarra.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- AHMSA: "Informe del Grupo Industrial", México, 1973.
- 2.- Ing. Alfonso González C.: "La planta de peletización de parrilla - circular en la mina La Perla, de AHMSA". Revista ILAFA Núm. 171. Julio 1974.
- 3.- United States Department of the Interior: "Prerduced Iron Ore Pellets: Preparation, Properties, Utilization". Bureau of Mines. Bulletin Núm. 651. E.U.A., 1970.
- 4.- Ing. Juan Celada S.: "El proceso HYL de reducción directa de minerales de hierro". Seminario de ILAFA, México, Noviembre, 1973.
- 5.- Edward S. Dana y William E. Ford: "Tratado de Mineralogía". C.E.C.S.A. Diciembre, 1971.
- 6.- James W. Neumann and Gerald R. Curtis: "El proceso de reducción de Armco". Seminario de ILAFA, México, Noviembre 1973.
- 7.- P. J. Thomas: "La Metalurgia". Ediciones Martínez Roca, S. A. Barcelona, 1969.
- 8.- H. V. Anderson: "Chemical Calculations". Mc. Graw-Hill Paperbacks. 1955.
- 9.- Fernando Aguirre T. y René Barbis D.: "La Reducción directa de los minerales de hierro y su aplicación en América Latina". Seminario de ILAFA, México, Noviembre 1973.
- 10.- Kenneth A. Jackson: "HYL Direct Reduction Past, Present, - Future". Swindell-Dressler. 1974.
- 11.- HYLSA: "Las Encinas S. A.". México. 1973.
- 12.- A. Cockerill: "The Steel Industry. International Comparisons of Industrial Structure and Performance". Cambridge University Press. 1974.
- 13.- Jacques Astier.: "Los aspectos científicos de la reducción directa". Seminario de ILAFA, México, Noviembre 1973.

- 14.- United States Steel Corp.: "The Marking, Shaping and Treating of Steel". Eight Edition. 1964.
- 15.- Phillipe P. Borthayre: "The Role of Direct Reduction in the development of the Latin American Steel Industry". Congreso de ILAFA. Colombia, Octubre 1974.
- 16.- Eric R. Morgan: "Reducción directa continua de los óxidos de hierro por el proceso Midrex". Seminario de ILAFA. México, No viembre 1973.
- 17.- Ing. Lawrence Amaya D.: "La Reducción directa HYL y el horno eléctrico". Primera reunión bienal de la Industria Siderúrgica Mexicana. Agosto, 1974.
- 18.- Editors of EM/J: "North American Iron Ore—Launching a rescue mission for a steel-short economy". Engineering and Mining Journal. November and December, 1974.
- 19.- Gerhard Reuter: "La Reducción directa de los minerales de hierro. Su aplicación en América Latina". Seminario de ILAFA. México, Noviembre 1973.
- 20.- Swindell-Dressler Engineering Information Series: "HYL Direct reduction process ready for big leap forward". February 1973.
- 21.- Comisión Nacional de Energéticos: "El carbón mineral". SEPANAL. 1974.
- 22.- Gunter Meyer and Uwe Bongers: "Proceso Krupp". Seminario de ILAFA. México, Noviembre 1973.
- 23.- Petróleos Mexicanos: "Memoria de Labores". 1973.
- 24.- Petróleos Mexicanos: "Memoria de Labores". 1974.
- 25.- Ing. Gunther H. Muller: "Perfil tecnológico futuro de la industria siderúrgica mexicana". Seminario de ILAFA. México, No viembre 1973.
- 26.- C. E. Wicks and F. E. Block: "Thermodynamic properties of 65 elements—their oxides, halides, carbides and nitrides". Bureau of Mines. Bulletin Núm. 605. E.U.A., 1963.
- 27.- J. W. Brown: "El aspecto económico en la producción de acero". Union Carbide Mexicana, S. A. 1972.

- 28.- Terkel Rosenquist. "Principles of extractive metallurgy". Mc. Graw-Hill. 1974.
- 29.- Henry G. Chlalá: "BF-LD versus DR-EL". M. B. Monthly. August 1971.
- 30.- United Nations: "Survey of World Iron Ore Resources". 1974.
- 31.- Dr. Ing. Heinz Dieter Pantke: "Proceso Purofer". Seminario de ILAFA, México, Noviembre 1973.
- 32.- Donald C. Violleta: "FIOR, el sistema para producir materiales altamente metalizados para aceración". Seminario de ILAFA, México, Noviembre 1973.
- 33.- J. H. Gross, Jerónimo Feinman and W. L. Davis Jr. "Briquetación del mineral de hierro de alto tenor por el proceso de reducción directa en lechos fluidizados". Seminario de ILAFA, México, Noviembre 1973.
- 34.- Hugo Enrique Wilthew Boscan: "Ventajas del uso del fierro esponja en la fabricación de tubos de acero sin costura". Seminario de ILAFA, México, Noviembre 1973.
- 35.- Aburto, De Miguel, Flores Magón, Morales y Pozas. "La Industria Siderúrgica Integrada de México en el período de 1970 a 1974 y sus perspectivas al año de 1978". Secretaría de la Presidencia, Diciembre 1975.
- 36.- A. J. Stone, G. R. St. Pierre and H. W. Lowrie. "Blast Furnace Theory and Practice". Ed. Strassburger et al. Gordon and Breach, N. York., 1969.
- 37.- D. F. Ball, J. Dartnell, J. Davison, A. Grieve and R. Wild. - "Agglomeration of Iron Ores". American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 1973.
- 38.- José L. López Léautaud. "Los riesgos en el proyecto siderúrgico Lázaro Cárdenas - Las Truchas". Revista Comercio Exterior. Junio 1973.
- 39.- Armando Orive. "Apreciaciones sobre un estudio de factibilidad para una planta siderúrgica integrada". Revista ILAFA, Noviembre 1971.



- 40.- Revista Técnica SICARTSA, Número 1, 1975.
- 41.- Revista Técnica SICARTSA, Número 2, 1975.
- 42.- Darken and Gurry: "Physical Chemistry of Metals". Mc. Graw-Hill Book Company, 1953.