



INFORME:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE DUCTOS DE EXTRACCIÓN DE GASES
PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.

MODALIDAD DE TITULACIÓN:

“EXPERIENCIA PROFESIONAL”

ALUMNO:

JESÚS ARTEMIO MONTOYA PÉREZ

NÚMERO DE CUENTA:

09710284

CARRERA:

INGENIERIA MECÁNICA

ASESOR:

DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

AÑO: 2014

*Con cariño y agradecimiento
dedico este trabajo a mis padres
Beatriz y Manuel*

NOMBRE DE LA EMPRESA: SIEMENS S.A. de C.V.



DISEÑO DE UN SISTEMA DE DUCTOS DE EXTRACCIÓN DE GASES PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.



Figura 1. Acería Carinox, Bélgica. Horno de arco eléctrico Siemens con una capacidad de producción de 160 toneladas por colada.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	11
CAPÍTULO II. OBJETIVO Y DESCRIPCIÓN DEL PUESTO.....	14
CAPÍTULO III. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS GENERALES.....	16
3.1 Balance de masa y energía.....	16
a. Cantidad de calor.....	17
b. Análisis térmico.....	17
3.2 Circuitos hidráulicos.....	18
a. Circuitos en serie.....	18
b. Circuitos en paralelo.....	19
3.3 Velocidad y pérdida de carga del fluido.....	19
CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	22
4.1 Objetivos del proyecto.....	24
4.2 Ingeniería Básica del Sistema.....	25
CONCLUSIONES.....	31
ANEXO I. FABRICACIÓN DEL ACERO.....	35
I. Historia del acero.....	35
II. Métodos modernos para la fabricación del acero.....	37
a. Ciclo integral.....	37
b. Acería.....	42
Bibliografía.....	46
Índice de ilustraciones.....	47
Índice de tablas.....	48
Índice de ecuaciones.....	48

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es el resultado de mi labor en la Empresa Siemens México, en la cual presté mis servicios profesionales durante veintiún meses. Su visión es ser pioneros en la eficiencia energética, productividad industrial, cuidado de la salud y soluciones inteligentes en infraestructura industrial y de servicios. Cuenta con una gran cobertura internacional, ya que tiene presencia en más de 190 países.

La empresa se fundó en 1847, bajo la dirección de Werner von Siemens, quien dejó su legado y filosofía que aun perdura actualmente en la compañía: “Hemos contribuido para crear valor sostenible en todo el mundo, ofreciendo soluciones y servicios que brindan a nuestros clientes seguridad e innovación en áreas estratégicas dentro de los sectores de industria, energía y salud”.

La finalidad del informe es demostrar mis conocimientos para obtener el grado de Ingeniero Mecánico mediante la opción de titulación por Trabajo Profesional. En la empresa diseñé un sistema de ductos de extracción de humos, para un horno de arco eléctrico en una acería; el ducto es refrigerado por agua. A lo largo de la exposición explico el sistema.

Las actividades aquí descritas fueron realizadas en la División de Soluciones y Servicios Industriales, en el área de tecnología de metales. Ahí desempeñé el puesto de especificaciones técnicas en el departamento de ingeniería, en donde usé mis capacidades técnicas y competencias profesionales afines a la ingeniería mecánica.

A continuación presento un listado de las actividades más representativas que realicé:

- Elaboración y revisión de ingeniería básica, ingeniería de detalle, modelado 3D (figura 2) y dibujos de fabricación de infraestructura para la industria siderúrgica, entre los que destacan hornos de arco eléctrico o *Electric Arc furnace* (EAF, ver figura 3); horno olla de refinado o *Ladle Furnace* (LF, ver figura 4); ollas de chatarra (ver figuras 5 y 6); carros de transferencia (ver figura 7); ductos de extracción de gases e inyectoras de cal y carbón.

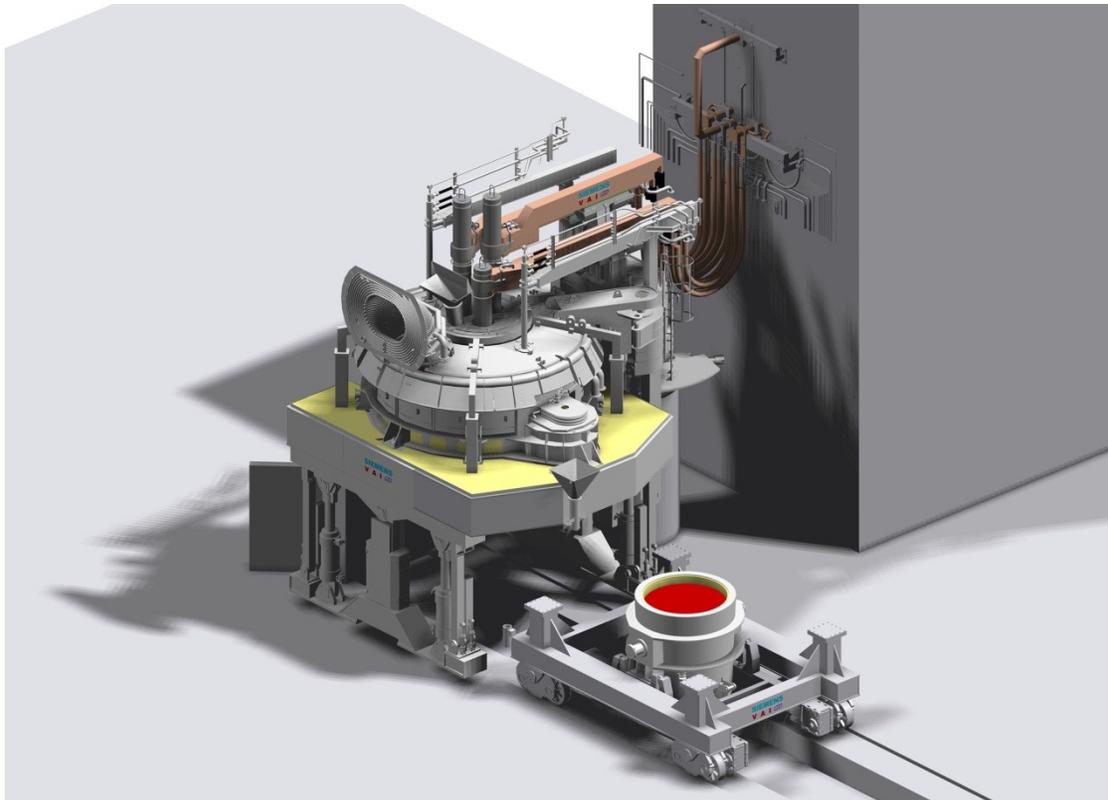


Figura 2. Modelo CAD 3D de una acería.



Figura 3. Horno de arco eléctrico (EAF).

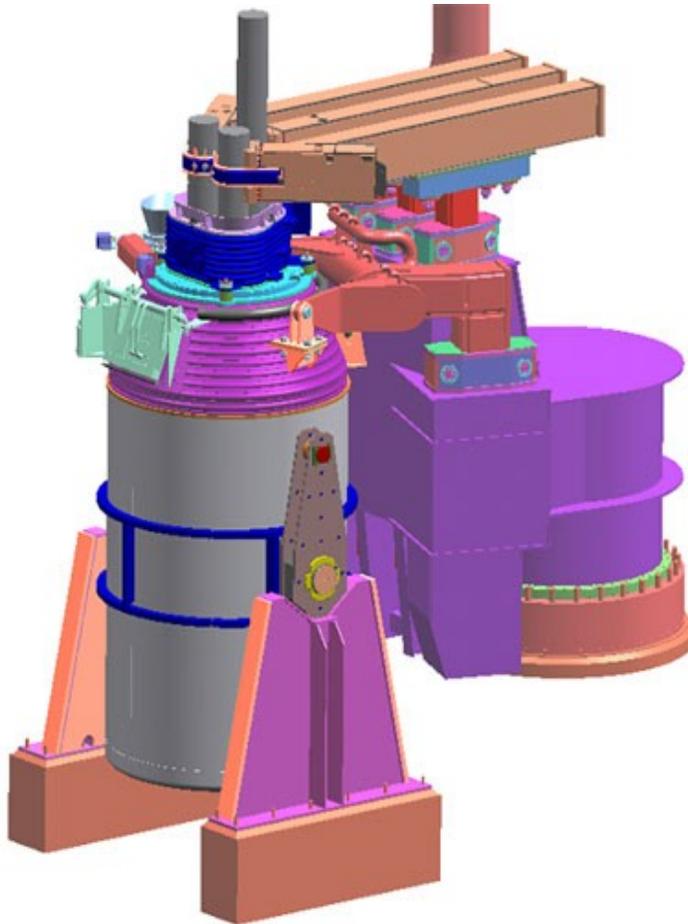


Figura 4. Modelo 3D de un horno olla de refinado.



Figura 5. Olla de chatarra a punto de ser descargada en un EAF.



Figura 6. Olla de chatarra cargando material.



Figura 7. Carro de transferencia con olla de colada de LF.

- Validación y diseño de elementos estructurales mediante modelado por elemento finito *finite element analysis* (FEA), tales como estructuras para inyectoras de cal, orejas de levante (figura 8) y silletas para soporte de ductos de extracción y elementos de refuerzo, por mencionar algunos.

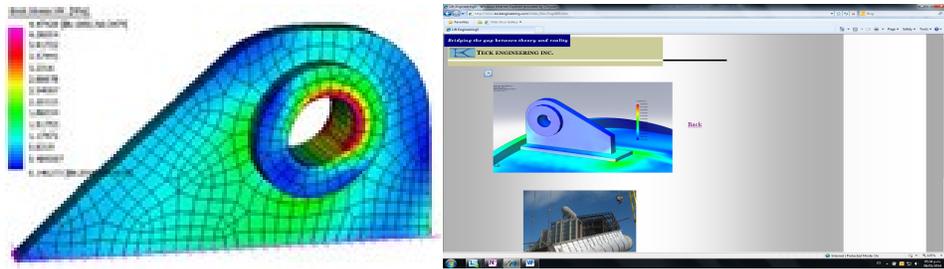


Figura 8. Modelado FEA de orejas de levante.

- Implementación de un sistema de administración de vida de producto *Product Life Managment* (PLM), en un entorno de elaboración de ingeniería de detalle con un sistema CAD 3D.
- Especificación técnica de la base de datos de materiales en un sistema de planificación de recursos empresariales o *Enterprise Resource Planning* (ERP).
- Elaboración de memorias de cálculo: transferencia de calor, balanceo hidráulico, cálculo de caudal y caída de presión de calor en ductos de extracción de gases y de paneles enfriados por agua para hornos de arco eléctrico (EAF, ver figura 9 y 10).

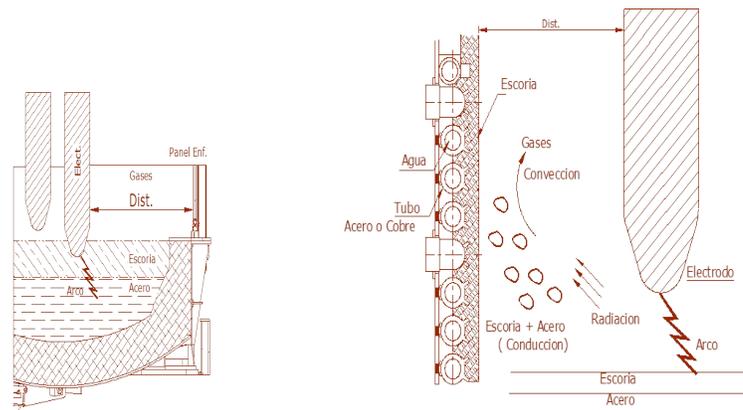


Figura 9. Modelo de trasferencia de calor en paneles enfriados de un EAF.

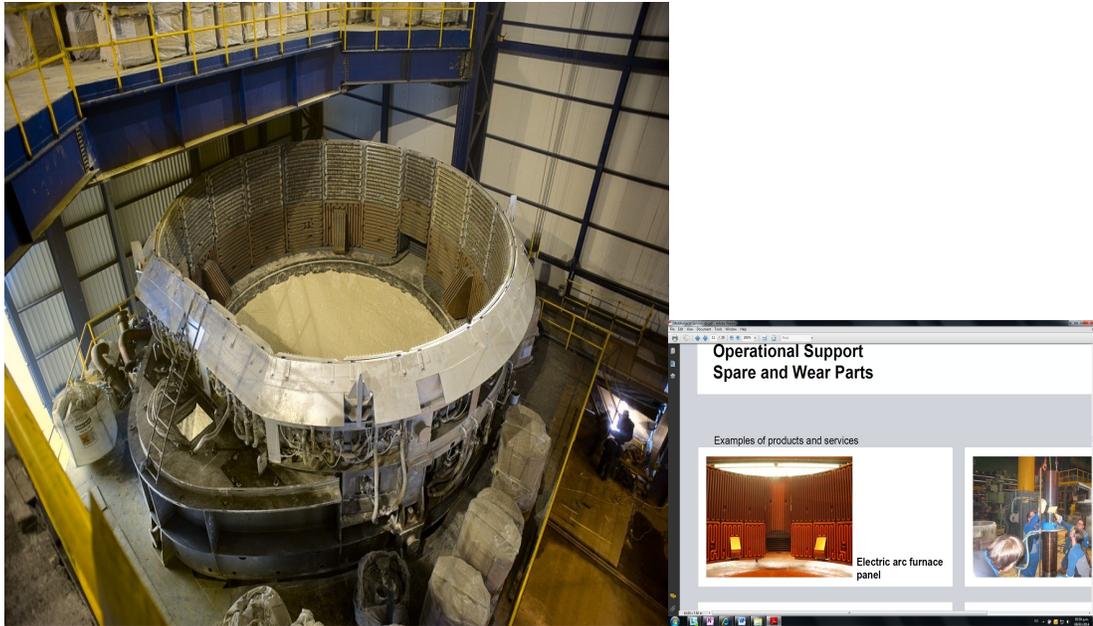


Figura 10. Paneles enfriados de un EAF.

- Elaboración de ingeniería básica, especificación y selección de instrumentación para sistemas de tuberías, *Piping* (figura 11).

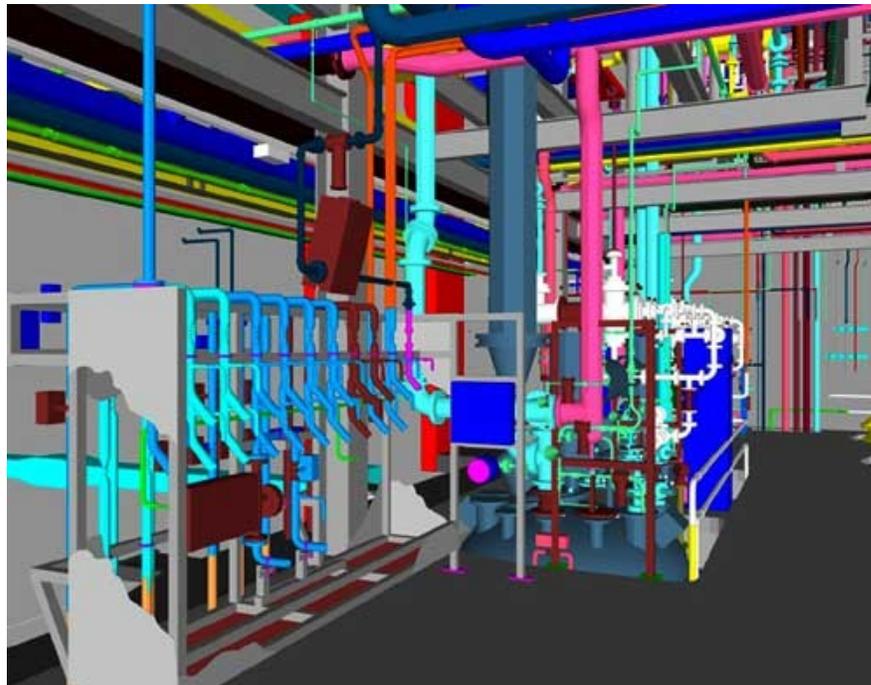


Figura 11. Modelo CAD 3D de un sistema de tuberías.

En el cuarto capítulo desarrollo la ingeniería básica de un sistema de ductos de extracción de gases desechados por un horno de arco eléctrico para fundición de acero, a detalle, ya que considero esta actividad como la más representativa. Cubre un amplio espectro de las áreas de ingeniería, en donde pude aplicar mis conocimientos específicos sobre transferencia de calor, mecánica de fluidos y mecánica de materiales.

Como fundamento a las actividades particulares desarrolladas en Siemens *I&S MT* que se reportan en este documento, se incluye en el anexo uno¹ una síntesis de los procesos de la fabricación del acero.

¹ Esta sección puede omitirse sin pérdida de continuidad, se agrega a manera de repaso o para lectura de aquellos lectores que desconozcan el proceso.

CAPÍTULO I. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Siemens y sus sucursales son considerados en el mundo como el principal proveedor de tecnología industrial, cuya visión y valores se muestran en la figura 12. Werner Von Siemens funda la empresa matriz en Berlín, Alemania, el 12 de octubre de 1847. En la República Mexicana inicia actividades en 1894.



Figura 12. Siemens: su misión y valores.

En esa época se instaló un equipo eléctrico para el alumbrado público, en la capital. La planta iluminó el Paseo de la Reforma, el Castillo de Chapultepec y la colonia Tacubaya. A consecuencia de la Revolución Mexicana y de la Primera Guerra Mundial se redujo su actividad en nuestro país, reiniciando posteriormente sus diligencias en 1921, cuando se fundó Siemens México con oficinas en las principales ciudades mexicanas. Actualmente tiene cobertura nacional y participa en todo tipo de proyectos relacionados con la infraestructura técnica. Las tres áreas en que se divide son salud, energía e industria (figura 13).

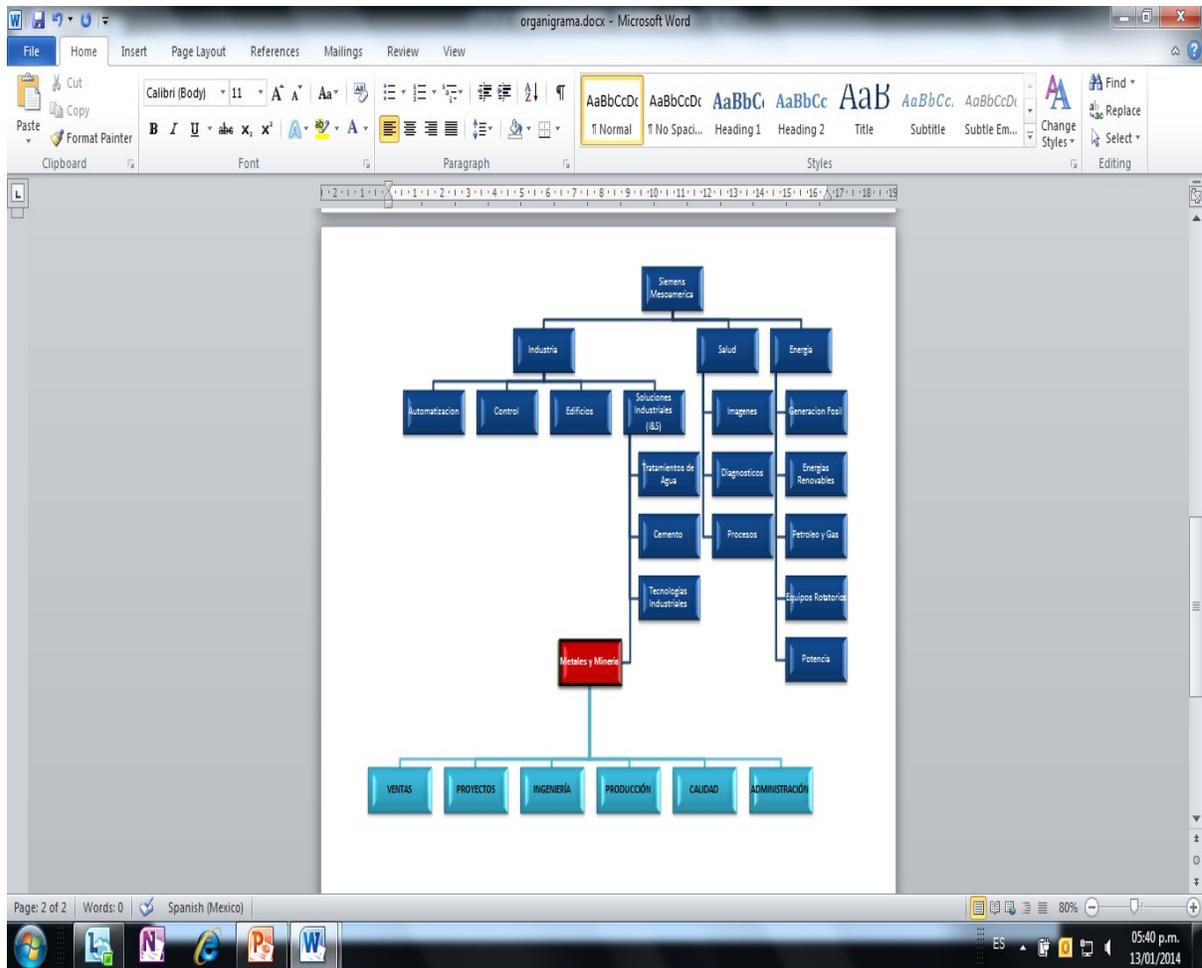


Figura 13. Áreas de división de Siemens Mesoamérica

En Siemens se encuentra un sector denominado *Industry Solutions and Services (I&S)* dentro de la división industria, que es el integrador de sistemas y soluciones para plantas industriales e instalaciones de infraestructura. Éste cubre todo el ciclo de vida, abarcan desde el estudio, ingeniería y construcción, incluyendo servicios de operación y el mantenimiento.

El sector aprovecha los productos electrotécnicos y de automatización de otras divisiones de Siemens, con el fin de aumentar la productividad y competitividad de las empresas. Se aprovechan recursos como el metalúrgico, agua, celulosa y papel; petróleo y gas; construcción naval; minería a cielo abierto; así como, la logística aeroportuaria, la automatización postal, el control de tráfico y los servicios industriales.

En 2005 el complejo industrial fortaleció su área de servicio en el sector metalúrgico, adquirió en Linz, Austria, el experto metalúrgico *VAI-FUCHS*, *Voest-Alpine Industrieanlagenbau* denominada Siemens (VAI). Con esto se convierte en una de las

empresas líderes de ingeniería y construcción de instalaciones destinadas a la industria del hierro, acero y para el sector de laminado de aluminio, alrededor del mundo. En esta unidad es en la cual, realicé mis actividades profesionales mencionadas.

Las áreas principales en que se divide Siemens (VAI) son las siguientes:

- Minería
- Fabricación de Hierro
- Fabricación de Acero
- Formado
- Minimolino
- Rolado en Caliente
- Rolado en Frío
- Líneas de Laminado
- Líneas de Terminado
- Rolado de Aluminio

La principal actividad de la unidad de negocios *I&S MT* es el diseño y fabricación de partes mecánicas y estructurales de los hornos de arco eléctrico o *Electric Arc Furnace* (EAF), así como, los sistemas satélites. Estos son hornos olla *Ladle Furnace* (LF), ductos refrigerados *Exhaust System* (ES), sistemas de transporte neumático y otros productos especiales para la industria siderúrgica.

CAPÍTULO II. OBJETIVO Y DESCRIPCIÓN DEL PUESTO

El departamento de Ingeniería lo dirige un gerente general, se muestra en el organigrama (figura 14) las áreas en la cual está dividida, éstas son: Administración, Control de información, Propuestas técnicas, Control técnico, Ingeniería mecánica y Productos especiales.

Dentro del área de control técnico se encuentran los puestos de Cálculos con elemento finito, Revisión técnica y Especificaciones técnicas; siendo esta última área en donde me desempeñé. Mi función era coordinar y realizar cálculos de ingeniería, selección y especificación de equipos y materiales, así como, la generación y modificación de planos mecánicos a nivel ingeniería básica y de detalle.

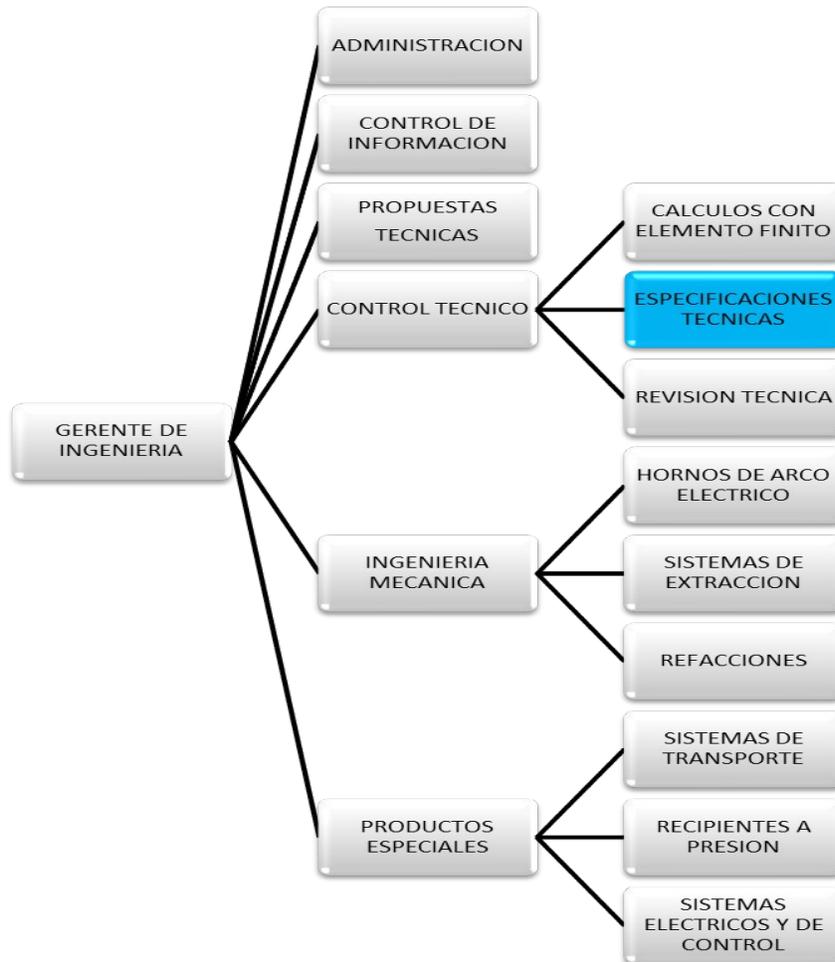


Figura 14. Organigrama del departamento de ingeniería

Las principales actividades que desempeñaba eran:

- Generar ingeniería de acuerdo a especificaciones del cliente.
- Cálculo y selección de equipos.
- Realizar, revisar, modificar y aprobar planos.
- Entregar dibujos aprobados según los programas de proyectos.
- Dar seguimiento a los programas de tareas, de los proyectos.

Los requisitos y las características que requiere la empresa para desempeñar este puesto son:

- Estudios nivel licenciatura en Ingeniería Mecánica o Industrial.
- Habilidad de análisis para realizar cálculos estructurales, de mecanismos, hidráulica, neumática, mecánica de fluidos y transferencia de calor.
- Experiencia en el manejo de software de dibujo en 2 dimensiones AutoCAD.
- Experiencia en el manejo de software de diseño asistido por computadora en 3 dimensiones *Solid Edge*.
- Conocimiento en el software *PLM* y *ERP* (SAP) para el manejo de archivos de dibujos y listas de materiales.

El grado de responsabilidad del puesto consiste en aprobar y hacer cambios en los planos de ingeniería, memorias de cálculo, especificaciones técnicas y listas de materiales, y en la selección de equipo.

CAPÍTULO III. CONCEPTOS GENERALES DE DISEÑO

El principio básico utilizado en los equipos, que fabrica el sector de tecnología de metales, es la de un intercambiador de calor, lo que facilita la transferencia de calor entre dos fluidos que se encuentren a diferentes temperaturas separados por una pared y evitando que se mezclen.

En primer lugar, el calor se transfiere del fluido caliente hacia la pared que lo conduce por un efecto de convección, después el calor es conducido a través de la pared por conducción y por último, de la pared hacia el fluido de enfriamiento de nuevo por convección. También están presentes los efectos de la radiación, los cuales se incluyen en los coeficientes de transferencia de calor por convección.

Los ductos utilizados están estructurados a base de tubos y son refrigerados con agua. Las estructuras tubulares están sometidas a una alta carga de calor (MW/m^2). Para tener una correcta transferencia de calor y lograr un óptimo desempeño del ducto es necesario, manejar una correcta velocidad del refrigerante dentro de los circuitos. Las primeras secciones requerirán una mayor velocidad para reducir los esfuerzos inducidos en la estructura.

Un punto sumamente importante es tener una correcta velocidad y caída de presión en cada circuito del sistema, para evitar tener circuitos con flujos menores a los requeridos y provocar que el sistema se dañe. Por lo que se requiere un análisis previo de carga, el cual a su vez, requiere de un análisis térmico con un balance de masa y energía.

A continuación se hace un repaso general de los fundamentos técnicos necesarios para el desarrollo del trabajo. Se utilizaron conceptos de transferencia de calor y mecánica de fluidos.

3.1 Balance de masa y energía.

Un balance de masa y energía es el primer paso a realizar en el diseño de un sistema, donde se presenta una transferencia de calor. Este balance definirá los principales parámetros y especificaciones del sistema. Los parámetros conocidos son la temperatura del gas a la salida del EAF y la temperatura a la que se requiere enfriar el gas, a través del sistema de ductos de extracción.

- a. **Cantidad de Calor:** El paso inicial es conocer la cantidad de calor removido al gas. Esta información estuvo disponible en la especificación técnica, y se resume en la tabla 1, de la cual se obtiene el calor removido de cada sección (DOB, Downcomer duct y ductos), que con la ecuación 1 se suma el calor total removido del sistema.

Ecuación 1:
$$\dot{Q}_{TOT} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 = 87.5 \text{ [MW]}$$

Donde:

\dot{Q}_{TOT} = CALOR TOTAL REMOVIDO DEL SISTEMA

\dot{Q}_1 = CALOR TOTAL REMOVIDO DEL DROP OUT BOX = 11.5[MW]

\dot{Q}_2 = CALOR TOTAL REMOVIDO DEL DOWNCOMER DUCT = 16[MW]

\dot{Q}_3 = CALOR TOTAL REMOVIDO DEL SISTEMA DE DUCTOS = 60[MW]

- b. **Análisis térmico.** Este cálculo muestra que el calor removido en el gas es igual al calor ganado por el agua, con esto, podemos calcular la cantidad de agua de enfriamiento requerida por el sistema. Se utiliza la ecuación de la conservación de energía para un flujo estacionario, ecuación 2 (Çengel, 2004: 8).

Ecuación 2:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_e - T_i) = \dot{v}C_p\Delta T$$

Donde:

T_i = temperatura media de entrada del gas expresada en [°C]

T_e = temperatura media de salida del gas expresada en [°C]

\dot{Q} = índice de transferencia de calor expresada en [MW]

\dot{m} = gasto volumétrico expresado en [m³/h]

C_p = calor específico del agua @ 70[°C] = 4190[J/Kg°C]

Para obtener la cantidad de agua requerida se tiene como parámetro de diseño, un límite en el diferencial de temperatura (ΔT) igual a 18 ° C (Hatch, 2008: 4) con lo que despejando, obtenemos el flujo másico del sistema, ecuación 3 (Hampel, 2001: 10).

Ecuación 3:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C_p \Delta T} = \frac{87.5 * 60}{4190 * 18} = 70,000 [l/min]$$

Donde:

\dot{m} = gasto volumétrico expresado en [m³/h]

\dot{Q} = índice de transferencia de calor expresada en [MW]

C_p = calor específico del agua @ 70[°C] = 4190[J/Kg°C]

T_i = diferencial del agua de enfriamiento expresada en [°C]

3.2 Circuitos hidráulicos

Por otra parte se deben tener presentes los dos tipos de circuitos posibles en un sistema hidráulico, estos pueden ser en paralelo o en serie, estos se asemejan a los circuitos eléctricos.

- a. **Circuitos en serie.** Son aquellos en los se tiene la consideración que el caudal en todos los circuitos es el mismo y se muestran en la ecuación 4, 5 y 6 (White, 2004: 384).

Ecuación 4:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_n = cte.$$

Ecuación 5

$$V_1 D_1^2 = V_2 D_2^2 = V_n D_n^2$$

Para este caso la pérdida de carga (ΔP) total es igual a la suma de las pérdidas en cada tramo:

Ecuación 6: $\Delta P_{A \rightarrow B} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_n$

Donde:

V_n = velocidad del flujo [m/s]

D_n = diámetro de la tubería [m]

ΔP = diferencial de presión [bar]

Q_n = Caudal [m³/h]

- b. **Circuitos en paralelo.** Se utilizan para tuberías, en este tipo de sistemas la caída de presión es la misma para todos los circuitos y el caudal total es la suma de los caudales individuales, mostrado en la ecuación 7 y 8 (White, 2004: 384).

Ecuación 7:
$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_n$$

Ecuación 8:
$$\Delta P_{A \rightarrow B} = \Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_n$$

Donde:

ΔP = diferencial de presión [bar]

Q_n = Caudal [m³/h]

3.3 Velocidad y pérdida de carga del fluido.

Para tener una buena transferencia de calor es necesario tener un flujo turbulento, el cual se consigue con *Reynolds* superior a 10,000 calculado en la ecuación 9 (White, 2004: 25). Esto depende de la configuración geométrica conductora, de la aspereza de la superficie, de la velocidad, de la temperatura y del tipo de fluido.

Ecuación 9:
$$Re = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu}$$

Donde:

Re= número de Reynolds del fluido

V= velocidad característica del fluido

L_c= Longitud característica de la configuración geométrica.

ρ= densidad del fluido

μ= viscosidad dinámica del fluido

ν= viscosidad cinemática del fluido

Para calcular la caída de presión (ΔP) en sistemas de tuberías comúnmente se hace uso de la relación de Weisbach en donde se hace uso del coeficiente de fricción de *Darcy* mostrado en la Ecuación 10 (White, 2004: 343).

Ecuación 10:
$$h_f = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2g} \text{ donde } f = f(Re_d, \frac{\epsilon}{d}, \text{forma del conducto})$$

Donde:

hf = pérdida de carga

f = factor de fricción (adimensional)

L = Longitud equivalente de tubo

Dh = diámetro hidráulico

v = velocidad del fluido

g = aceleración de la gravedad

Para obtener el diámetro hidráulico tenemos la expresión de la ecuación 11 (White, 2004: 367).

Ecuación 11:
$$D_h = \frac{4A}{\wp}$$

Donde:

Dh= Diámetro hidráulico

A = Área

ϖ = Perímetro mojado

El parámetro adimensional (f) de la ecuación 10 se denomina coeficiente de fricción de *Darcy* y depende del número de *Reynolds* y de la rugosidad de la superficie de contacto del fluido con el tubo. Para poder calcular este parámetro es común utilizar el diagrama de *Moody*, en el cual podemos obtener dicho factor de fricción a partir de la rugosidad relativa y el número de *Reynolds*.

Una manera alternativa de obtener el coeficiente de Darcy es utilizando la ecuación 12 o de Haaland (White, 2004: 357) con la cual se pueden obtener resultados mas exactos, usarse para cualquier diámetro hidráulico y hacer uso de una hoja de cálculo.

Ecuación 12:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 1.8 \left[\frac{6.9}{Re_{DH}} + \left(\frac{\varepsilon/DH}{3.7} \right)^{1.11} \right]$$

Despejando f obtenemos la ecuación 13:

$$f = \left[\frac{1}{-1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re_{DH}} + \left[\frac{\varepsilon/DH}{3.7} \right]^{1.11} \right]} \right]^2$$

Donde:

f = factor de fricción (adimensional)

Re= número de Reynolds del fluido en función del diámetro hidráulico

ε = rugosidad de conducto

Dh = diámetro hidráulico

Finalmente con la ecuación 14 obtenemos una expresión para calcular la caída de presión o pérdida de carga sustituyendo la ecuación 13 en la ecuación 12.

Ecuación 14:

$$\therefore \Delta P = h_f = \left[\frac{1}{-1.8 \log \left[\frac{6.9v}{VL_c} + \left[\frac{\varepsilon\wp}{(3.7)(4A)} \right]^{1.11} \right]} \right]^2 \frac{L_c V^2 \wp}{2g(4A)}$$

Donde:

ΔP = diferencial de presión o pérdida de carga h_f

v = viscosidad cinemática del fluido

ε = rugosidad de conducto

\wp = Perímetro mojado del conducto

A = Área del conducto

L_c = Longitud equivalente del conducto

V = velocidad del fluido

g = aceleración de la gravedad

CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La actividad explicada en el presente capítulo es en detalle la elaboración de la ingeniería básica de un sistema de ductos de extracción de gases para un horno de arco eléctrico (EAF), esta ingeniería fue la base para el desarrollo de la ingeniería de detalle y de fabricación del mismo (figura 15).



Figura 15. Ductos de extracción listos para su instalación.

Los ductos que se diseñaron tienen la función de extraer y enfriar los gases producto de la fundición de chatarra y hierro esponja para producir acero en un EAF, estos gases salen del horno con una temperatura aproximada de 1950° C (ver figura 16 y 17).

Para elaborar la ingeniería básica y de detalle se contó con una especificación técnica (documento confidencial), la cual contenía el alcance, requerimientos generales y preingeniería del sistema. El documento fue elaborado por una empresa consultora especialista en temas siderúrgicos, el cual fue contratado por el cliente al que se le fabricó el sistema de ductos. En la tabla 1 podemos observar un resumen de la información extraída del documento.

Sección	1. WC Downcomer Duct	2. Drop out Box	3. Ductwork
Forma	Oval	Rectangular	Circular
Dimensiones Internas [m]	2.1 x 3.25	4.6 x 6.1	3.3
Longitud [m]	10.7	9.1	52.4
Calor Removido [M W]	16	11.5	60
Gasto del sistema [l / min.]	13,250	9,500	50,000
Temperatura Entrada Gas [° C]	1,950	1,435	1,570
Temperatura Salida Gas [° C]	1,435	1,570	940
Peso del Sistema [Ton]	28	30	350

Tabla 1. Información Técnica del Sistema de Extracción de Gases

Adicional a la especificación técnica se contó con un manual de diseño (Documento confidencial) para el sistema de extracción en cuestión, el cual fue realizado por la oficina especialista de Siemens en estos temas, localizada en Linz, Austria; El cual sirvió de base para desarrollar la gran mayoría de la ingeniería aquí mostrada.



Figura 16. Gases producidos en un EAF.



Figura 17. EAF durante un proceso de fabricación, se puede ver el color rojo vivo de los gases.

4.1 Objetivo del proyecto

El objetivo del proyecto fue el de diseñar, fabricar e instalar un sistema extracción de humos hecho a base de ductos refrigerados, para esto, de acuerdo a la mayoría de las metodologías dentro de la industria, se procede con la elaboración de la ingeniería básica, la cual es presentada en este capítulo, para posteriormente hacer la ingeniería de detalle con un sistema de diseño asistido por computadora 3D y finalmente proceder con la fabricación del sistema.

La elaboración de la ingeniería de detalle requirió de un grupo de diez personas, sumando un total de 2 mil horas hombre al proyecto, la que sirvió para la fabricación del sistema. Como resultado de la ingeniería de detalle podemos observar en la figura 18, una imagen 3D del sistema de ductos. Lo anterior se realizó con un software CAD (Solidedge).

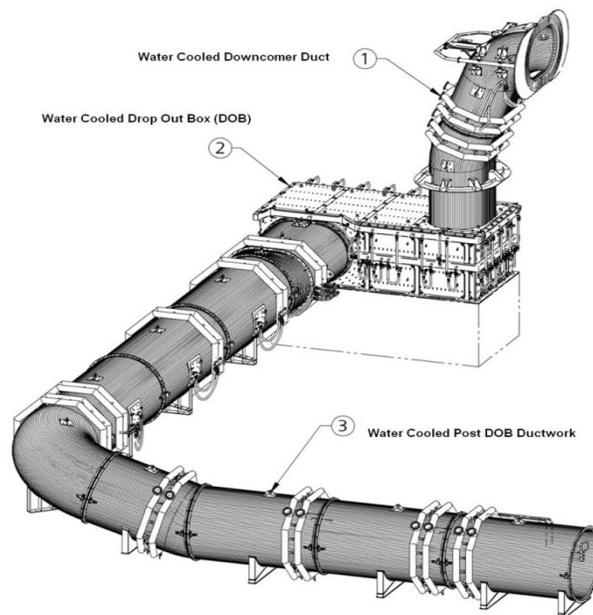


Figura 3. Sistema de ductos de extracción

Figura 18. Modelo CAD 3D del sistema de ductos de extracción.

La imagen muestra el sistema de ductos refrigerados por donde se extraen todos los gases producidos durante la fundición de acero, estos salen a una temperatura aproximada a

los 1950° C, por lo que se requiere enfriarlos a una temperatura de 940° C para que se filtren y expulsados después al medio ambiente.

El sistema se divide en tres secciones principales: El *Water Cooled Downcomer Duct*, el *Water Cooled Drop Out Box* (DOB) y el *Water Cooled Post DOB Ductwork*. Primero ingresan los gases con una temperatura aproximada de 1950° C por el ducto bajante o *downcomer duct* 1 con forma oval, siendo ésta la parte inicial del sistema y la que se conecta a la salida de gases del EAF, a través de un ducto en forma de codo llamado *fourth hole elbow* ó cuarto agujero. El *downcomer duct* conduce los gases hacia la caja de expulsión o *Drop Out Box* (DOB) a una temperatura de 1435° C, aquí se quema el monóxido de carbono a través de inyección de aire, lo cual genera un aumento de temperatura de 144° C entre el punto de entrada y salida de dicho sistema.

La salida se conecta a un ducto oval *Water Cooled Post DOB Ductwork* 3, inicialmente presenta esta geometría para tener una mayor área de enfriamiento y posteriormente tiene una transición a una zona circular, este ducto conserva esa cualidad a lo largo de 52 metros, logrando en la trayectoria un decremento de la temperatura del gas a 630° C. Asimismo, remueve una cantidad de calor igual a 60 MW, para lo que se requiere un flujo de agua de 50,000 litros por minuto. En total, todo el sistema *Dowconmer duct* (DOB) y ductos remueven una energía de 87.5 MW utilizando un flujo de 72,750 litros por minuto y reduciendo en alrededor 1000° C la temperatura del gas.

Una vez que los gases terminan su trayectoria por el ducto refrigerado ingresan a una cámara de postcombustión la cual tiene la función de quemar los gases nocivos para el medio ambiente. A partir de este punto los gases circulan por ductos “secos”, es decir, constituidos únicamente por lámina de acero inoxidable, hasta alcanzar una temperatura de 126° C, en donde finalmente llegan a la llamada *baghouse* o casa de bolsas. En esta zona los gases son filtrados con bolsas de poliéster, separando todas las partículas y polvos, producto de la fundición y expulsando finalmente los gases al medio ambiente.

4.2 Ingeniería básica del sistema

Una vez entendidos los conceptos básicos de transferencia de calor y mecánica de fluidos, comenzamos con la descripción que se realizó de la ingeniería básica y de detalle. En el *Manual de diseño* se contaba con datos similares a los mostrados en la figura 19 (Hampel,

2001), donde podemos observar las curvas típicas del comportamiento de enfriamiento de un ducto de extracción. Para este caso se usó la gráfica de un horno de 140 MW en donde se tienen las curvas del calor removido y comportamiento de la temperatura del gas, ambas en función del área de enfriamiento.

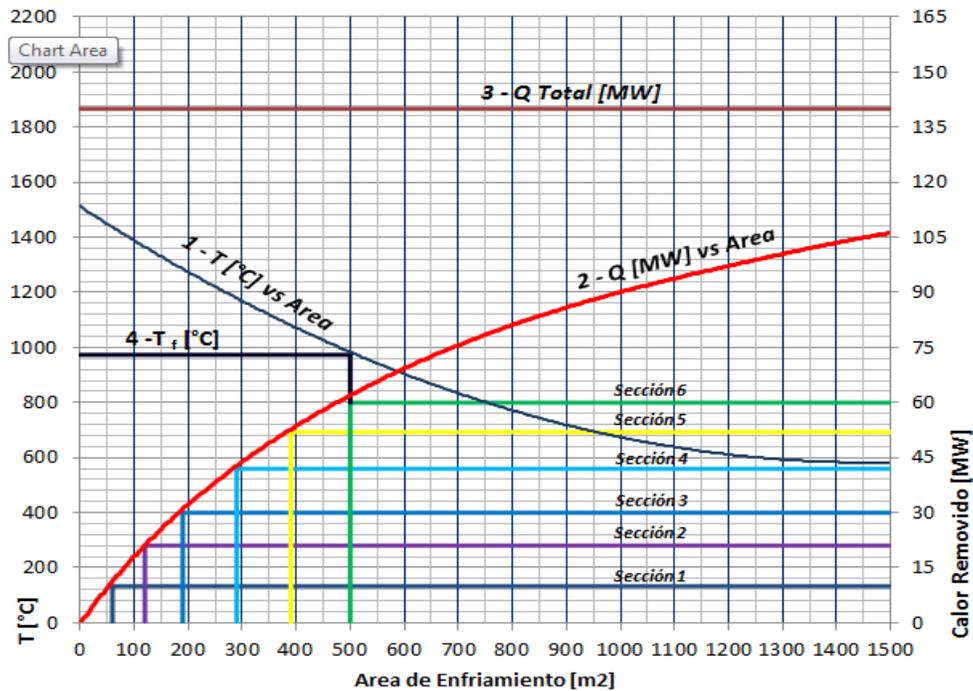


Figura 4. (Hampel, 2001) Curvas del comportamiento de enfriamiento de un ducto de extracción

Figura 19. (Hampel, 2001) Curvas del comportamiento de enfriamiento de gas en un ducto de extracción.

La curva 1 de la figura 19 muestra el comportamiento de la temperatura del gas en función del área de enfriamiento del ducto, en este caso el gas entra al sistema aproximadamente a 1550° C con la posibilidad de disminuir la temperatura del gas hasta aproximadamente 600°C, para esto se lee en el eje “x” de la gráfica que se requerirían 1500 m² de área de enfriamiento y así remover del sistema alrededor de 105 MW, este último dato se obtiene con la curva 2 - Q[MW] vs área que muestra la cantidad de calor removido en función del área de enfriamiento.

De la tabla 1 se extraen los datos del comportamiento requerido por el sistema, la información con la que se cuenta es la temperatura de entrada del gas igual a 1570° C y que

debe disminuirse hasta 940°C , este último valor se traza sobre el eje “ y_1 ”. En la línea horizontal 4 hasta intersectar la curva 1 y al proyectarla sobre el eje “ x ” se obtiene el área de enfriamiento requerida del sistema, la cual resulta ser de 500 m^2 . Al cruzar el valor de área requerida sobre la curva 2 se obtiene la cantidad de calor removido, la cual resulta en 60 MW .

El sistema cuenta con un área de 500 m^2 , el cual se divide en varias secciones por dos razones principales: por cuestiones prácticas de fabricación, traslado y ensamble, y la segunda, por la cantidad del consumo de agua y su respectiva caída de presión. La figura 19 muestra la división del sistema en seis secciones.

Para dividir el sistema se consideró que a cada sección se le remueva una cantidad similar de calor y por lo tanto debe tener el mismo gasto calorífico en cada una de estas.

El área de cada sección se obtiene al trazar un diferencial de 10 MW sobre la curva 2 de la figura 19 y que al ser proyectada sobre el eje “ x ” obtenemos como resultado el área acumulada del sistema hasta llegar a los 500 m^2 requeridos, lo anterior se muestra en la figura 19 con las proyecciones nombradas como sección 1 a 6.

Con la cantidad del área de enfriamiento obtenida de la figura 19 y el diámetro de la sección proporcionado en la tabla 1, se calcula la longitud de cada una de las 6 secciones del ducto de extracción, cada sección a su vez tendrá que ser dividida en varios circuitos para lograr un diseño óptimo del sistema.

El punto neurálgico en el diseño de este tipo de ductos es lograr un sistema balanceado, cuidando el valor de la caída de presión (ΔP) o pérdida de carga en cada circuito, en el cual se debe mantener un flujo o caudal mínimo de agua y así evitar una deficiente transferencia de calor.

El proceso de diseño se hace mediante un método iterativo, en donde se realiza el diseño con ayuda de una hoja de cálculo (Excel) similar a la que se muestra en la tabla 2 y que hace uso de las ecuaciones 7, 10 y 14 revisadas en este capítulo.

En los cálculos se busca tener una longitud hidráulica similar en cada circuito, y así tener una caída de presión uniforme en todos los ellos. Con lo anterior se asegura una velocidad media mínima en cada circuito y no exceder el diferencial máximo de temperatura en el agua establecido en la especificación técnica del cliente.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CIRCUITO	CANTIDAD DE TUBOS	LONGITUD DE LOS TUBOS	NUMERO DE CODOS	NUMERO DE RETORNOS	LONGITUD HIDRAULICA EQUIVALENTE	DIÁMETRO HIDRAULICO	VELOCIDAD	FLUJO	ΔT	ΔP	ΔP
	[-]	[m]	[-]	[-]	[m]	[mm]	[m/s]	[m³/h]	[°C]	[bar]	[psi]
Circuito 1	6	7.25	4	8	89.50	59.0	2.76	27.21	13	1.39 6	20.25
Circuito 2	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 3	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 4	6	7.18	9	6	86.58	59.0	2.81	27.67	13	1.39 6	20.25
Circuito 5	8	7.10	4	8	102.80	59.0	2.58	25.39	18	1.39 6	20.25
Circuito 6	8	5.00	4	6	76.00	59.0	3.00	29.53	11	1.39 6	20.25
Circuito 7	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 8	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 9	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 10	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 11	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 12	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 13	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 14	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 15	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 16	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 17	8	7.25	4	8	104.00	59.0	2.56	25.25	18	1.39 6	20.25
Circuito 18	6	7.45	10	6	89.70	59.0	2.76	27.18	13	1.39 6	20.25
Circuito 19	6	7.45	10	6	89.70	59.0	2.76	27.18	13	1.39 6	20.25

Tabla 2. Ingeniería básica de una sección del sistema.

La tabla 2 muestra la ingeniería básica de una de las seis secciones del sistema realizada con la hoja de cálculo, la sección de ductos está dividida en 19 circuitos sumando 144 tubos de un diámetro hidráulico de 59 mm, correspondiente a tubería comercial de 2 ½ pulgadas de diámetro nominal y con una longitud de 7.25 metros.

La columna 6 de la tabla 2 muestra la longitud hidráulica equivalente de cada circuito, la cual es el resultado de la suma aritmética de la longitud lineal de los tubos utilizados más la longitud equivalente de codos y retornos.

Con este dato e ingresando de manera iterativa un valor estimado en la caída de presión del sistema basado en el concepto de circuitos en paralelo de la ecuación 8 obtenemos los datos de diseño del agua de enfriamiento en cada uno de los circuitos: velocidad, flujo y diferencial de temperatura, mostrados en las columnas 8, 9 y 10 de la tabla 2.

Se desarrolló una hoja de cálculo similar a la tabla 2 para cada uno de las secciones del sistema, siendo este el entregable de ingeniería básica un total de 12 tablas y dando como resultado la configuración final que se resume en la figura 20, donde se muestra que el sistema se formó de once secciones y el DOB en ocho circuitos con una caída de presión igual a 20 *Psi*; cada circuito muestra el gasto de agua, teniendo para todo el sistema un gasto total de 4320 m³/h.

Tres de los circuitos mostrados en la figura 20 son de dos secciones de acuerdo a los datos preliminares de diseño y basado en el concepto de circuitos en serie mostrados en la ecuación 4 y 6.

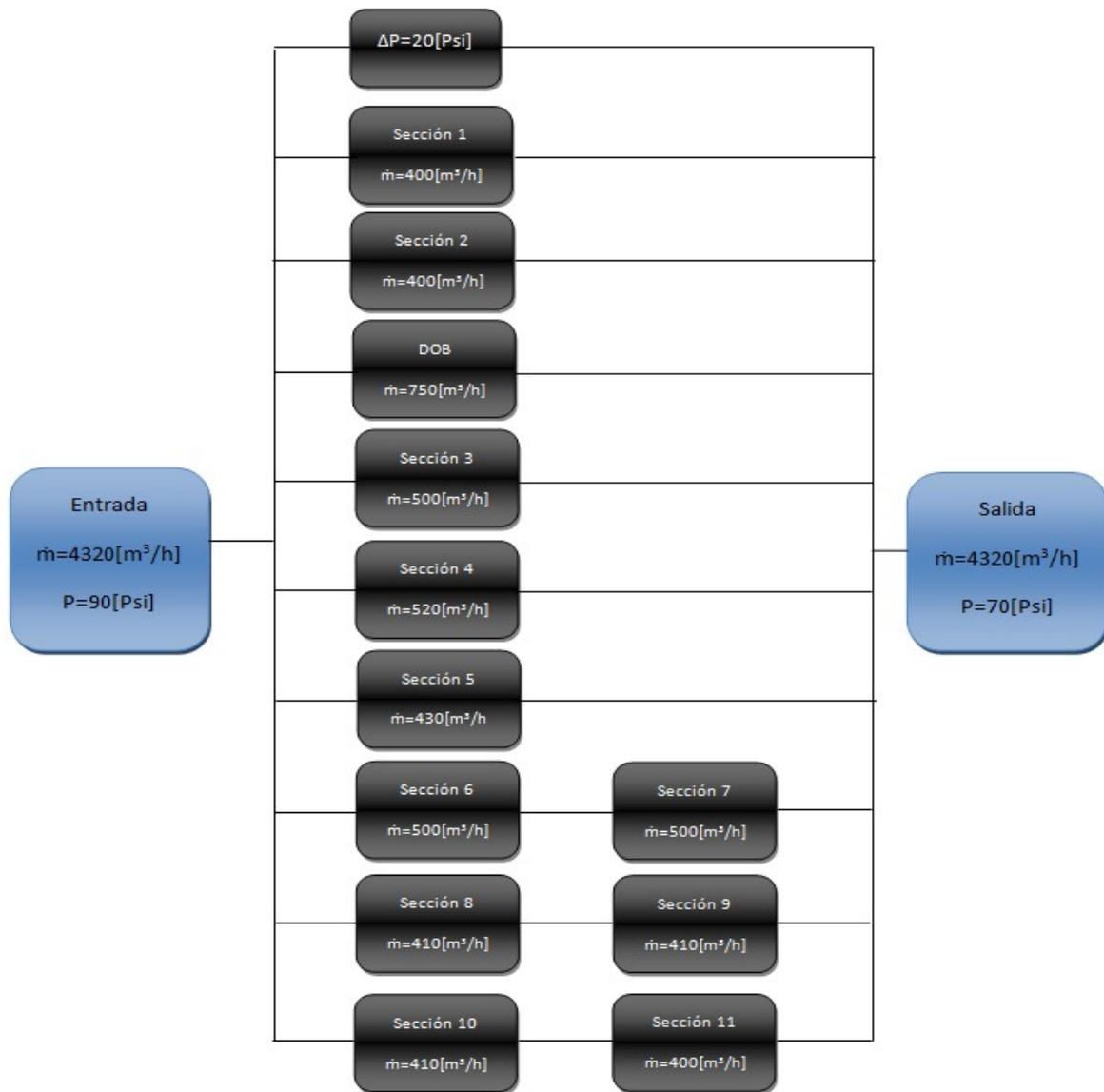


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema proyectado

Figura 20. Diagrama de bloques del sistema proyectado.

La ingeniería básica que realice sirvió de base para desarrollar la ingeniería de detalle, la cual consistió en: realizar los modelos en tres dimensiones (figura 18), dibujos de fabricación, dibujos de instalación y arreglo general del sistema. Lo anterior se realizó durante tres meses con un equipo de trabajo formado por 10 personas y consumiendo un total de dos mil horas hombre. Con la Ingeniería realizada se fabricaron todos los ductos para finalmente ser embarcados e instalados (figura 21).

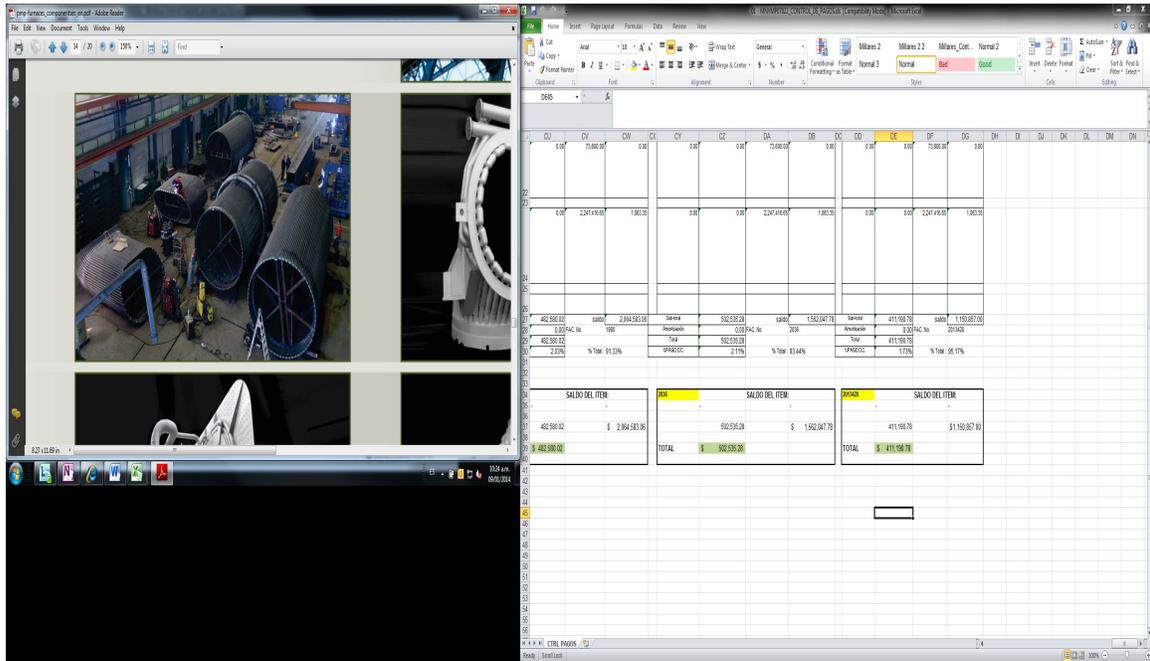


Figura 21. Sistema de ductos durante su fabricación.

CONCLUSIONES

En el presente informe profundizo específicamente en el *Diseño del sistema de ductos de extracción*, porque fue de las actividades más representativas de las que me responsabilice en la empresa Siemens-VAI IIS MT. Considero que del mismo modo todas las actividades realizadas en el puesto de especificaciones técnicas enriquecieron mi desarrollo profesional, afianzaron y ampliaron mis conocimientos técnicos adquiridos en la licenciatura.

Un aspecto muy significativo y gratificante fue el haber tenido la oportunidad de poner a prueba mis conocimientos de ciencias de la ingeniería, adquiridos en la universidad y que no siempre se pueden ejercer dentro de la industria, ya que en ocasiones las responsabilidades de los puestos son operativas o administrativas y no de diseño.

Considero que el plan de estudios de la carrera proporciona una educación integral y completa, ya que implementa una sólida formación y genera conocimientos en ciencias básicas. Este tipo de educación desarrolla un razonamiento científico para la solución de problemas así como la formación en Ciencias de la ingeniería logra creatividad e imaginación para resolver problemas prácticos.

Las materias de Ingeniería aplicada me permitieron enfrentarme en el mercado laboral como un profesional actualizado en las técnicas y las tecnologías, tal como el uso de software y simulaciones FEA, CAD 3D, CNC, por mencionar algunos.

En general puedo concluir que la educación recibida, me ha permitido adaptar, asimilar y generar tecnologías en diversos ramos de la industria como lo son el siderúrgico, combustión, automotriz y metalmecánico.

De mi experiencia laboral y desde mi punto de vista sugiero que el plan de estudios podría enriquecerse impartiendo dentro de las asignaturas obligatorias de Ingeniería aplicada, una materia de electricidad de potencia.

Otra sugerencia es que en todas las carreras de la facultad de Ingeniería se imparta una materia en administración de proyectos, con fundamento en alguna metodología institucional, como el Project Management Institute. Invariablemente los ingenieros administramos proyectos, ya sea en la investigación y desarrollo, en la academia, en instituciones de gobierno o dentro de la iniciativa privada.

Respecto al resultado de mi proyecto me siento muy orgulloso del trabajo realizado, ya que por primera vez se elaboró este tipo de ingeniería básica en Siemens México. No es común hacer la fabricación completa de un sistema de extracción de este tipo, además anteriormente la ingeniería básica se elaboraba en la matriz de Linz, Austria; realizando en México, únicamente la ingeniería de detalle.

La metodología de diseño y la gestión de proyecto he encontrado que se utiliza dentro de la industria (figura 22)² y que se basa en la elaboración de ingeniería concurrente³ y en un desarrollo tipo *fast track*⁴.

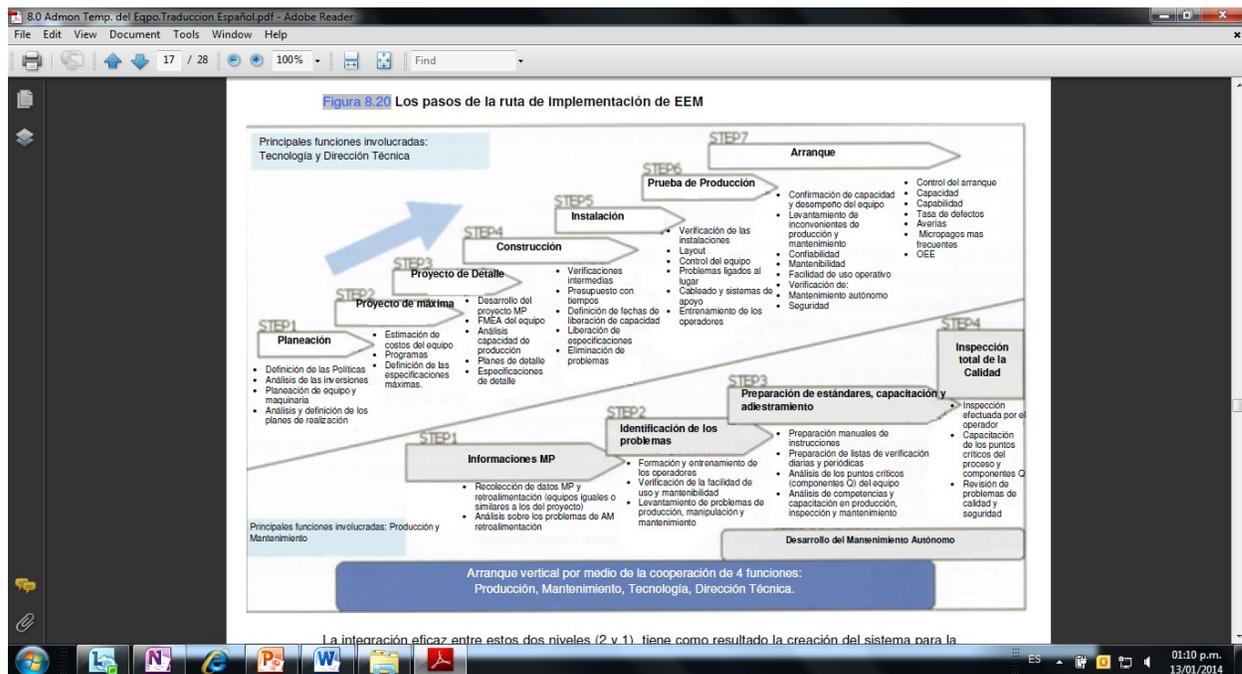


Figura 22. Metodología de diseño y administración de proyectos.

Traducido al proyecto se inicia con la planeación de éste y casi al mismo tiempo con la elaboración de la definición básica del sistema o *Basic Data* (tabla 1), Con estos datos se

2 Gestión de proyectos basada en la filosofía Manufactura de clase mundial *World Class Manufacturing (WCM)* del Dr. Hajime Yamashina

3 Camino sistemático hacia el diseño integrado, concurrente del producto y sus procesos relacionados, incluyendo a todos los departamentos involucrados donde se consideran todas las actividades necesarias de una manera simultánea y así lograr incorporar en tiempo todos los requerimientos.

4 Técnica de gestión de proyectos cuya finalidad es la de reducir el tiempo de ejecución traslapando las fases de diseño, construcción e instalación.

elabora la ingeniería básica o *Basic Engineering* (tabla 2 y figura 20), sin terminar aun este proceso se comienza a elaborar la ingeniería de detalle o *Detail Engineering* (dibujos de fabricación) y sin terminar toda la ingeniería se comienza con la fabricación, instalación y pruebas del producto (figura 21).

Un aspecto relevante que permitió que la empresa alcanzara los objetivos del proyecto, fue el cumplir con las responsabilidades del puesto de especificaciones técnicas, manejando acertadamente los conceptos técnicos contenidos en los *Manuales de diseño* (Hampel, 2000 y 2001), estos manuales aunque escritos en lengua inglesa, fueron la base teórica de la mayoría de los cálculos que realicé.

El desarrollo de los cálculos los complementé con la búsqueda bibliográfica descrita en el capítulo tres, dando como resultado la modificación de la hoja de cálculo de la tabla 2. Esta modificación fue hecha de forma específica para el proyecto, dando como resultado el diagrama de bloques mostrado en la figura 20.

En lo personal fue muy enriquecedor haber realizado este trabajo y así aplicar en el proyecto, conceptos aprendidos de varias de las materias cursadas durante la carrera, tal como lo relaciono en la tabla 3.

Materia Cursada.	Aplicación al proyecto.	Ejemplo
Ciencia de materiales.	Entender el proceso siderúrgico.	Anexo 1.
Mecánica de fluidos.	Diseño de circuitos hidráulicos.	Tabla 2. Figura 20.
Transferencia de calor.	Entender funcionamiento y comportamiento de los productos diseñados.	Tabla 2. Figura 19. Tabla 1.
Diseño mecánico.	Establecer metodologías en el proceso de diseño.	Capitulo IV.
Diseño y manufactura Asistido por computadora.	Elaboración de ingeniería 2D y 3D	Figura 18.
Mecánica de sólidos, Mecánica del medio continuo.	Realizar y entender análisis de esfuerzos y deformaciones, análisis FEA.	Figura 8.

Tabla 3. Conceptos y conocimientos adquiridos en la carrera aplicados al proyecto.

Dentro de mi experiencia laboral manifiesto que he aprendido y reafirmado la gran relevancia que implica, seguir una metodología y sobre todo documentar un proceso de diseño, ya que a pesar de parecer claro y obvio en muchas ocasiones no se tiene esta costumbre o simplemente, no se continua un proceso establecido al momento de diseñar o

hacer cualquier tipo de ingeniería. Esto tal vez, porque se tiene la idea equivocada que se desperdician tiempo y recursos.

Enfatizo que usar una metodología nos ayuda a que el proceso de diseño se optimice, las soluciones obtenidas sean más creativas y lo más importante, que se tenga un historial del proceso, ya que es muy común encontrarse con diseños con poca o nula información. Con ello se pierden muchas veces datos relevantes, el objetivo o la esencia de su concepción. En un futuro puede crear muchos conflictos, por ejemplo, cuando se requiere hacer una revisión del diseño o elaborar una especificación.

Expreso mi agradecimiento a la UNAM, en especial a la Facultad de Ingeniería y a todos mis profesores por la educación recibida, la cual considero fue integral, tanto en el aspecto técnico, humanista y social. Ratifico el desempeño de la Universidad Nacional como formadora de profesionistas críticos con una actitud emprendedora, de liderazgo, comprometida y responsable.

ANEXO I. FABRICACIÓN DEL ACERO

El acero hoy en día representa el 95 por ciento de nuestro mundo. Antes de la Revolución Industrial el hierro se utilizaba sólo para fabricar armas, posteriormente la tecnología para producir arrabio siguió un proceso evolutivo dando un gran paso hasta el siglo XVIII, cuando se sustituyó el carbón mineral por carbón de leña. La refinación del carbón mineral dio por resultado el *coque*, que fue utilizado por los convertidores “básicos” de arrabio. Además se aprovechaban los gases que se expedían.

Ya que el acero es básicamente es una aleación de hierro y carbono, el primer paso consiste en transformar el hierro mineral en arrabio y el segundo, en acero. La función del alto horno es transformar el hierro mineral en arrabio.

I. Historia del acero

En la antigüedad se cree que el hombre utilizó el hierro de los meteoritos que caían del cielo, aunque solo podría ser una visión mítica, sin embargo, los guerreros ostentaban en sus batallas pesadas armaduras a lo largo de la historia en Euroasia y América del Sur.

En el Valle de México hace 60,000 años hubo una lluvia meteórica. En 1984 los astrónomos Javier González y Eduardo Gastéllum compraron en Jiquipilco, Estado de México un trozo aquellos meteoritos. “El análisis químico, amablemente proporcionado por Aceros Solar, reveló la presencia de los siguientes elementos: hierro como base; níquel al 7.75%; algo de cobalto (0.5%) y otras impurezas”.⁵

Durante las Cruzadas, siglo XII, Ricardo Corazón de León se enfrentó al sultán Saladito. La espada europea era tosca, pesada, recta y brillante; la musulmana, “por el contrario era esbelta, ligera y de un azul opaco que, visto más de cerca, era producido por una textura compuesta de millones de curvas oscuras en un fondo blanco que caracterizan a los aceros de Damasco”.⁶ La diferencia reside en el altísimo contenido de carbono de los últimos.

Los ingleses en plena Revolución Industrial, Europa siglo XVIII., establecieron las primeras bases de lo que sería la industria siderúrgica. Esto debido a la necesidad de articular la producción textil con los medios de transporte, a través de la máquina de vapor y el ferrocarril. Ello produjo un boom sin precedentes.

5 (Martínez, 1989: 12-13).

6 (*idem*, 19).

A principios de ese siglo en Inglaterra comenzó a desarrollarse la siderurgia moderna con Abraham Darby (1709) quien sustituyó el uso del carbón vegetal por el mineral en el proceso de aceración⁷. Así como Benjamín Huntsman (1740), utilizó el carbono en la refinación del hierro de primera fusión o arrabio⁸ para producir un acero más consistente. Más tarde, Henry Cort (1789) adecuaba el proceso de pudelaje⁹ mediante el cual, por medio de una puerta con un orificio se podía remover, batir y separar en el horno, el arrabio fundido, que gracias a la entrada de aire podía ser maleable. La demanda de productos fabricados con acero, en una sociedad que despuntaba en la industria, posibilitó la innovación y mejoramiento del sistema de aceración¹⁰.

La transformación masiva del arrabio en acero lo realizó el inglés Henry Bessemer (1856) patentó el convertidor denominado *Bessemer*, destinado a producir acero a través del soplo de aire en el hierro de primera fusión que reacciona a base de la oxidación del metal.

Ese mismo año, un alemán radicado en Inglaterra, Charles William Siemens registró un método que regeneraba los gases producidos por la combustión y los aplicaba en el calentamiento del aire utilizado en la misma conversión del acero.

Los franceses Pierre y Émile Martin (1863), con en el mismo proceso de *Siemens*, experimentan una combustión basada en la fusión del arrabio con chatarra, dando por resultado el sistema *Siemens-Martin* o el método de “Hogar Abierto”. Debido a que este último proceso necesitaba el empleo de hierro con una menor cantidad de fósforo posible, fue indispensable la creación de otro modo de fabricación de acero.

En un principio el proyecto de *Bessemer* no dio el resultado esperado debido a que “la pared del convertidor estaba recubierta con ladrillos refractarios ricos en óxido de silicio: sílice. En la jerga de los refractarios a éstos se les llama ‘ácido’ para distinguirlos de los óxidos metálicos, que se denominan ‘básicos’”¹¹. Pero su compatriota S. G. Thomas junto con su

7 Aceración. Dar al hierro las propiedades del acero.

8 Arrabio. Fundición de hierro que se obtiene en el alto horno y que constituye la materia prima de la industria del hierro y del acero.

9 Pudelaje. Hacer dulce el hierro colado, quemando parte de su carbono en hornos de reverbero.

10 (Avila, 2002: 1).

11 (Martínez, 1989: 47).

primo Percy Gilchrist (1875) agregaron al convertidor *Bessemer* un refractario de dolomita¹² más resistente al calor. Con ello “probaron que el convertidor transformaba exitosamente el arrabio en acero, si la pared del horno se recubría con refractarios ‘básicos’, del óxido de magnesio por ejemplo.”¹³ Este sistema se llamó *Bessemer-Thomas*. Además los ingleses demostraron que los refractarios ácidos entorpecen la eliminación del fósforo del arrabio.

Más adelante Siemens (1878) inventa los hornos eléctricos de arco directo e indirecto, que funcionan por medio de unos electrodos que calientan el metal para su refinación. A la par de estos nuevos inventos para la producción del acero a gran escala y con los menores costos posibles, también se presentarían mejoras en las demás fases de la fabricación. Una de ellas sería la de los hornos altos, lugar donde se procesa el mineral de hierro para su refinación.

A partir de 1860, tanto en Inglaterra como en Estados Unidos se hicieron cambios en el diámetro del crisol, la solera y en la altura para alcanzar los estándares requeridos por los mercados de ambos países. De igual manera sucedería con la fase de laminación de productos, la cual se mejoró en sus trenes, para responder a una mayor demanda de acero y sus derivados.

Esa tecnología siderúrgica europea se implementó en México a través de la Fundidora Monterrey en el año de 1900, con el objetivo principal de producir acero necesario para satisfacer al incipiente Mercado Nacional.

Estados Unidos fue el proveedor de la mayor parte de la maquinaria y de los equipos que se instalaron en el espacio destinado a la primera empresa productora de acero de México y de América Latina. La Fundidora Monterrey fue contemplada para producir 100 mil toneladas de acero anuales, cantidad mínima que supuestamente abastecería al mercado interno, activado primordialmente por la industrialización que había experimentado la nación sobre todo durante las dos últimas décadas del siglo XIX¹⁴.

12 Dolomita. Roca semejante a la caliza y formada por el carbonato doble de cal y magnesia. Es más común que la verdadera caliza.

13 (Martínez, 1989: 47).

14 (Avila, 2002: 1).

II. Métodos modernos para la fabricación del acero

En la actualidad hay dos formas básicas de fabricar acero: una a partir de la producción de arrabio que se hace con el hierro mineral (ciclo integral) en instalaciones que disponen de altos hornos denominada siderurgia o siderurgia integral. La segunda la encontramos en el sector industrial dedicado exclusivamente a la producción y elaboración de acero partiendo de chatarras férricas (ciclo electro-siderúrgico) en hornos eléctricos, denominando *acería* a este tipo de planta¹⁵.

a. Ciclo integral.

El proceso se divide principalmente en dos grandes pasos. El primero consiste en transformar el mineral de hierro de las minas en arrabio mediante un alto horno y el segundo en convertir el arrabio en acero mediante un convertidor de oxígeno básico o *Basic oxygen furnace* (BOF)¹⁶

Un alto horno, cuyo esquema se presenta en la figura 22¹⁷, típico está formado por una cápsula cilíndrica de acero forrada con un material no metálico y resistente al calor, como asbesto o ladrillos refractarios.

El diámetro de la cápsula disminuye hacia arriba y hacia abajo, el grosor máximo se encuentra en un punto situado aproximadamente a una cuarta parte de su altura total. La parte inferior del horno está dotada de varias aberturas tubulares llamadas toberas, por donde se fuerza el paso del aire. Cerca del fondo se encuentra un orificio por el que fluye el arrabio cuando se sangra (o vacía) del alto horno. Encima de ese orificio, pero debajo de las toberas, se encuentran la piquera la cual sirve para retirar la escoria.

15 (Mangonon, 2001: 244).

16 (Martínez, 1989: 51).

17 (*Ibidem*, 52).

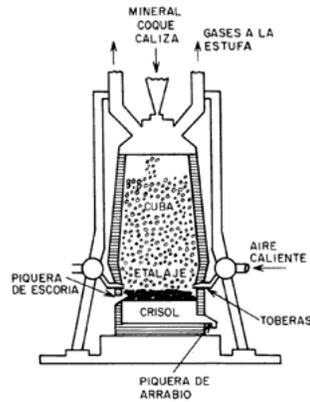


Figura 23. Alto horno

La parte superior del horno, cuya altura es de unos 30 m, se localizan ductos cerrados por válvulas por los cuales se colectan los gases que se reutilizan en el proceso siderúrgico, también se tienen un par de tolvas redondas en forma de campana, por las que se introduce la carga de coque caliza en el horno.

Los altos hornos funcionan de forma continua. La materia prima que se va a introducir en el horno se divide en un determinado número de pequeñas cargas que se introducen a intervalos de entre 10 y 15 minutos. La escoria que flota sobre el metal fundido se retira una vez cada dos horas, y el hierro se sangra cinco veces al día.

El aire insuflado en el alto horno se precalienta a una temperatura comprendida entre los 550° y los 900° C. El calentamiento se realiza en las llamadas estufas, cilindros con estructuras de ladrillo refractario. El ladrillo se calienta durante varias horas quemando gas de alto horno, que son los gases de escape que salen de la parte superior del horno (figura 23)¹⁸. Después se apaga la llama y se hace pasar el aire a presión por la estufa. El peso del aire empleado en un alto horno supera el peso total de las demás materias primas.

18 (*Ibidem*, 55).

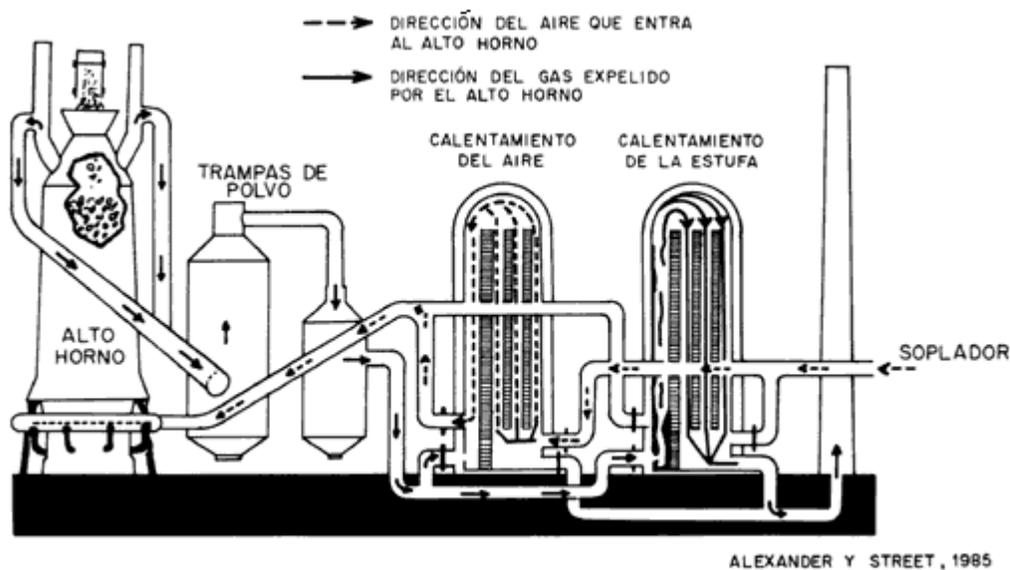


Figura 24. Flujo de gases en un alto horno.

Los materiales básicos empleados para fabricar arrabio son mineral de hierro, coque y caliza. El coque se quema como combustible para calentar un alto horno, y al arder libera monóxido de carbono, que se combina con los óxidos de hierro del mineral y los reduce a hierro metálico. La caliza de la carga del horno se emplea como fuente adicional de monóxido de carbono y como sustancia fundente. Este material se combina con la sílice presente en el mineral (que no se funde a las temperaturas del horno) para formar silicato de calcio, de menor punto de fusión. Sin la caliza se formaría silicato de hierro, con lo que se perdería hierro metálico. El silicato de calcio y otras impurezas forman una escoria que flota sobre el metal fundido en la parte inferior del horno.

Cumplido el propósito del proceso del alto horno de reducir la mena de hierro en estado sólido a hierro elemental en estado líquido y remover componentes, que se consideran impurezas, se llevan hasta las tolvas en pequeñas vagonetas o cucharas que se suben por un elevador inclinado situado en el exterior del horno para continuar con el proceso siderúrgico, generalmente al BOF.

El horno de oxígeno básico (figura 24)¹⁹ representa en la actualidad el 40% de la producción estadounidense de acero utilizando una carga de chatarra fría de entre 25 y 35 %²⁰. Tiene forma de pera que puede producir una cantidad aproximada de 300 toneladas de acero en alrededor de 45 minutos.

El horno se inclina desde su posición vertical y se carga con chatarra de acero fría luego con el hierro derretido obtenido del alto horno, después de ser devuelto a su posición vertical, se hace descender hacia la carga una lanza de oxígeno refrigerada por agua y se fuerza sobre ella un flujo de oxígeno puro a alta velocidad durante 20 minutos. Este actúa como fuente de calor y para la oxidación de las impurezas.

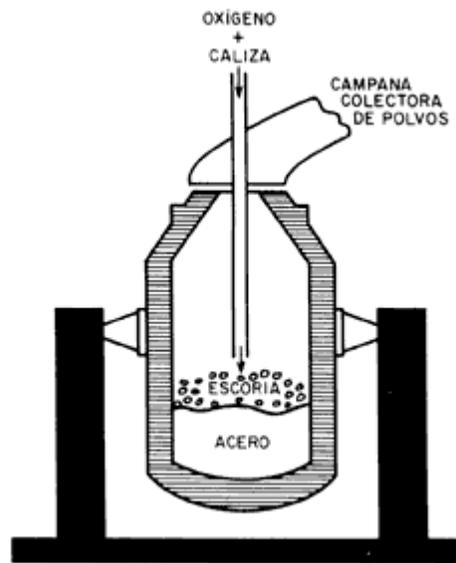


Figura 25. BOF

Tan pronto como el chorro de oxígeno comienza, se agrega la cal y otros materiales fundentes. La reacción química resultante desarrolla una temperatura aproximada de 1650° C. El oxígeno se combina con el exceso de carbono acabando como gas y se combina también con las impurezas para quemarlas rápidamente. Su residuo es absorbido por la capa flotante de escoria.

Después de haberse completado la inyección de oxígeno, se analiza el contenido de carbono y la composición química de diversas muestras de la masa fundida.

19 (*Ibidem*, 57).

20 (American Iron and Steel Institute, 2013)

Cuando la composición es correcta, el horno se inclina para verter el acero fundido en una olla de colada (figura 25)²¹. Aunque se pueden producir algunos aceros de aleación con este proceso, el ciclo de tiempo aumenta considerablemente, eliminando así su ventaja principal. Consecuentemente, el proceso de oxígeno básico, como el del hogar abierto, se emplea generalmente para producir altos tonelajes de acero con un bajo nivel de carbono, que son los de mayor consumo. Estos aceros con bajo nivel de carbono se utilizan para barras, perfiles y planchas gruesas y delgadas.

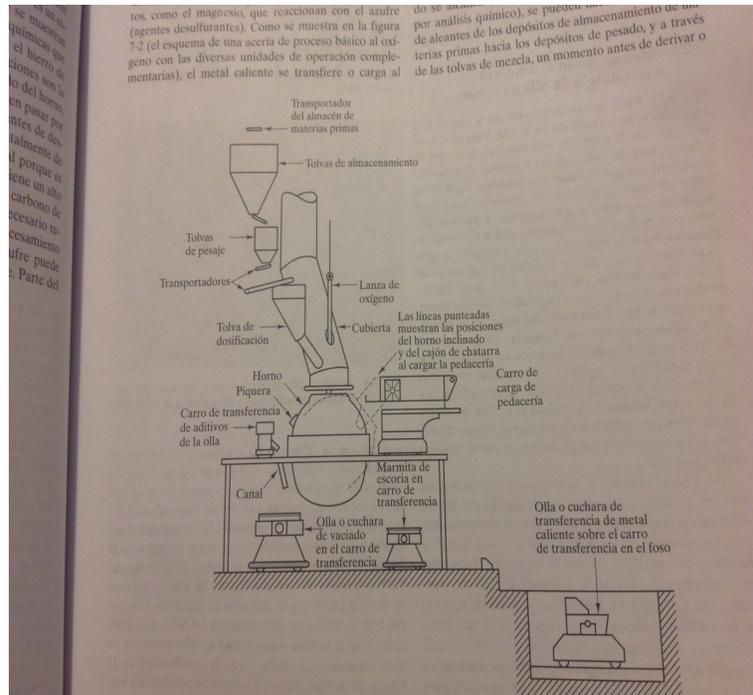


Figura 26. Proceso BOF.

b. ACERÍA.

Hasta ahora el horno de arco eléctrico (EAF, ver figura 26 y 27)²² es el más versátil de todos los hornos para fabricar acero. No solamente puede proporcionar altas temperaturas, hasta 1930°C, sino que también puede controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión.

²¹ (Mangonon, 2001: 245)

²² (American Iron and Steel Institute, 2013)

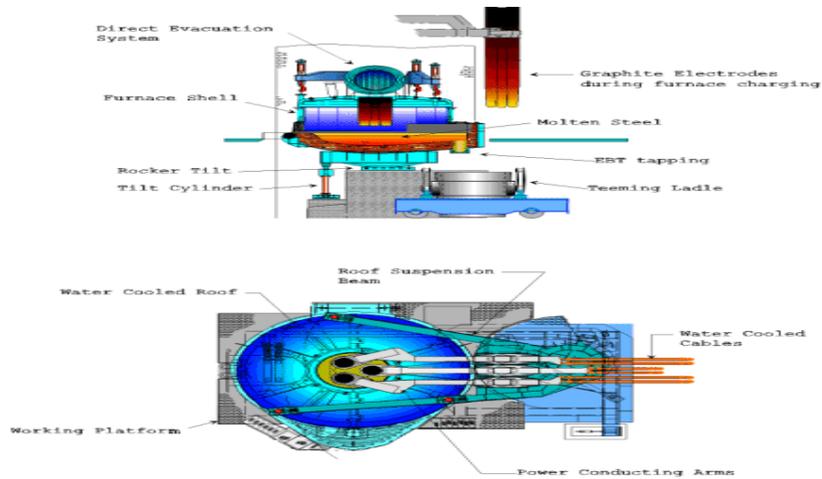


Figura 27. Horno de arco eléctrico.

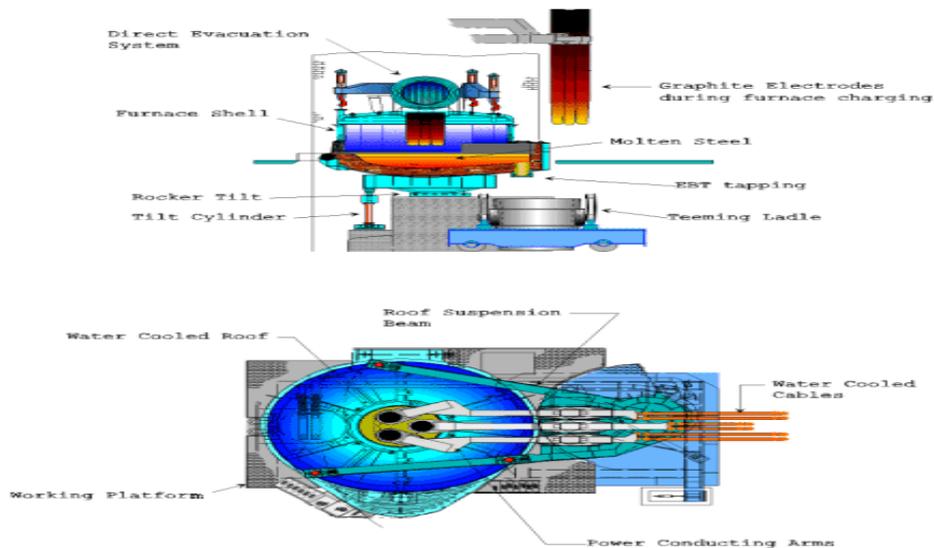


Figura 28. Horno de arco eléctrico.

Debido a que no se emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas las condiciones de refinado de estos hornos se pueden regular más estrictamente que las de los hornos de crisol abierto o los hornos básicos de oxígeno, El resultado es un acero más limpio.

Consecuentemente, puede producir todo tipo de aceros, desde aceros con regular contenido de carbono hasta aceros de alta aleación, tales como aceros para herramientas, aceros inoxidables y aceros especiales para los cuales se emplea principalmente. Otra ventaja

sobre el Horno de Oxígeno Básico es que puede operar con grandes cargas de chatarra y sin hierro fundido.

El refinado se produce en una cámara hermética, donde la temperatura y otras condiciones se controlan de forma rigurosa mediante dispositivos automáticos. En las primeras fases de este proceso de refinado se inyecta oxígeno de alta pureza a través de una lanza, lo que aumenta la temperatura del horno y disminuye el tiempo necesario para producir el acero. La cantidad de oxígeno que entra en el horno puede regularse con precisión en todo momento, lo que evita reacciones de oxidación no deseadas.

En la mayoría de los casos, la carga está formada casi exclusivamente por material de chatarra. Antes de poder utilizarla, la chatarra debe ser analizada y clasificada, porque su contenido en aleaciones afecta a la composición del metal refinado. También se añaden otros materiales, como pequeñas cantidades de mineral de hierro y cal seca, para contribuir a eliminar el carbono y otras impurezas. Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos gigantes produce un calor intenso.

Una vez cargado el horno se hacen descender unos electrodos de carbono (figura 28) hasta la superficie del metal. La corriente eléctrica fluye por uno de los electrodos, forma un arco eléctrico hasta la carga metálica, recorre el metal y vuelve a formar un arco hasta el siguiente electrodo. La resistencia del metal al flujo de corriente genera calor, que, junto con el producido por el arco eléctrico, funde el metal con rapidez.

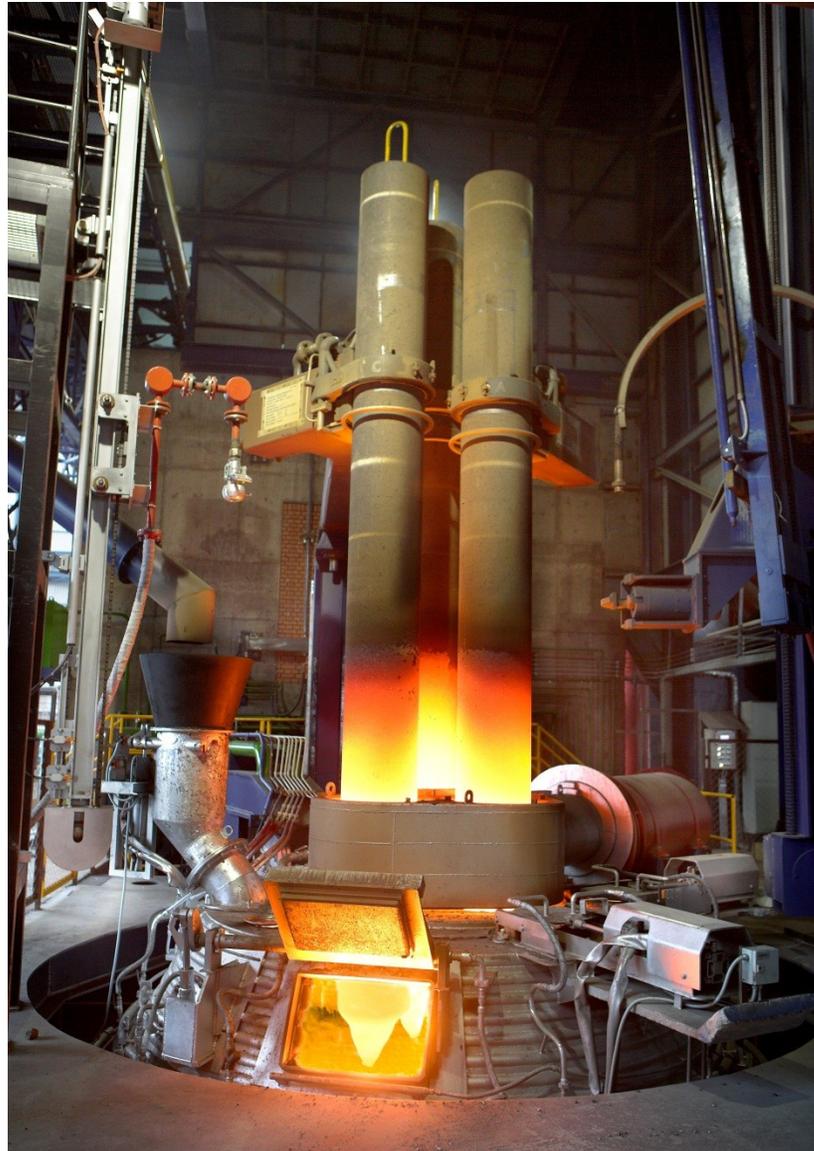


Figura 29. Horno LF con electrodos de carbono en reposo.

Después de que la carga se ha derretido completamente, se agregan dentro del horno cantidades medidas de los elementos de aleación requeridos. Cuando la composición química de la masa fundida cumple con las especificaciones, el horno se inclina para verter el acero fundido dentro de una olla de colada (figura 28).

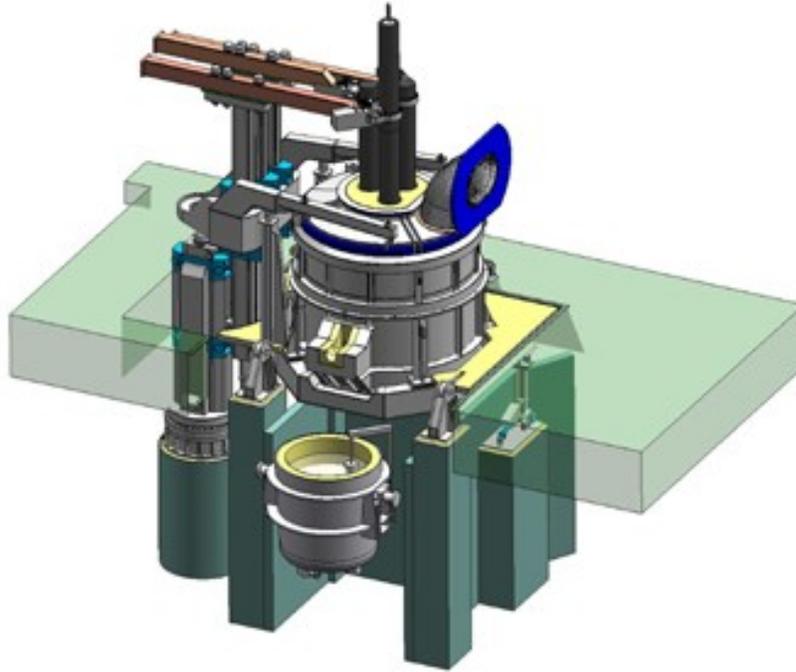


Figura 30. EAF con olla de colada y sistema de inclinación para vaciado.

Aunque el costo de la fabricación de acero en el horno de arco eléctrico, es generalmente más alto que el de los demás métodos de fabricación de acero, se obtiene una calidad de acero superior con el horno eléctrico. Éste suministra el mejor método para controlar la temperatura y las adiciones de aleación.

Además su costo puede justificarse para la fabricación de acero en localidades donde no se cuenta con altos hornos ni con hierros de primera fusión, o en lugares en donde las necesidades intermitentes de acero en cantidades pequeñas, no justifiquen una instalación de horno abierto. Por eso es muy usado, ya que no contamina la atmósfera como muchos otros. Actualmente, el horno eléctrico se carga entre 90 y 100% de chatarra fría contribuyendo en un 60 % de la producción estadounidense de acero²³.

23 (*Idem*)

BIBLIOGRAFÍA

- Çengel, Yunus A. 2004. *Transferencia de Calor*. 2ª ed. México, McGraw-Hill. p 793.
- White, Frank M. 2004. *Mecánica de Fluidos*. 5ª ed, España, McGraw-Hill. p 833.
- Hampel, A. 2000. *Design Manual for EAF OFFGAS System*, Primera Revisión. Siemens VAI.
- _____ 2001. *Design of Watercooled Gas Coolers depending on the power input (Q)*. Revisión 0. Siemens VAI.
- Martínez Gómez, Lorenzo. (1989). *Acero*, México: FCE. p 109.
- Ávila Juárez, José Óscar. 2002. *La tecnología en la industria siderúrgica mexicana, El caso Fundidora Monterrey*, México: UANL. p 9.
- Mangonon, Pat L. 2001. *Ciencia de materiales: selección y diseño*. 5ª ed. México, Prentice Hall. P 824.

Índice de Ilustraciones	Página
Figura 1. Acería Caninox, Bélgica. EAF Siemens 160 Toneladas.....	1
Figura 2. Modelo CAD 3D de una acería.....	4
Figura 3. Horno de arco eléctrico (EAF).....	4
Figura 4. Modelo 3D de un horno olla de refinado.....	5
Figura 5. Olla de chatarra.....	5
Figura 6. Olla de chatarra cargadando material.....	6
Figura 7. Carro de transferencia con olla de colada para un LF.....	6
Figura 8. Modelado FEA de orejas de levante.....	7
Figura 9. Modelo de transferencia de calor en paneles enfriados de un EAF.....	7
Figura 10. Paneles enfriados de un EAF.....	8
Figura 11. Modelo CAD 3D de un sistema de tuberías.....	8
Figura 12. Siemens: su misión y valores.....	10
Figura 13. Áreas de división de Siemens Mesoamérica.....	11
Figura 14. Organigrama del departamento de ingeniería.....	13
Figura 15. Ductos de extracción listos para su instalación.....	21
Figura 16. Gases producidos en un EAF.....	22
Figura 17. EAF durante un proceso de fabricación.....	22
Figura 18. Modelo CAD 3D del sistema de ductos de extracción.....	23
Figura 19. Curvas del comportamiento de enfriamiento de gas en un ducto de extracción.....	25
Figura 20. Diagrama de bloques del sistema proyectado.....	28
Figura 21. Sistema de ductos durante su fabricación.....	29
Figura 22. Metodología de diseño y administración de proyectos.....	31
Figura 23. Alto horno.....	38
Figura 24. Flujo de gases en un alto horno.....	39
Figura 25. BOF.....	40
Figura 26. Proceso BOF.....	41
Figura 27. Horno de arco eléctrico.....	42
Figura 28. Horno de arco eléctrico.....	42
Figura 29. Horno LF con electrodos de carbono en reposo.....	44
Figura 30. EAF con olla de colada y sistema de inclinación para vaciado.....	45

Índice de tablas	Página
Tabla 1. Información Técnica del Sistema de Extracción de Gases.....	21
Tabla 2. Ingeniería básica de una sección del sistema.....	27
Tabla 3. Conceptos y conocimientos adquiridos en la carrera aplicados al proyecto.....	32

Índice de ecuaciones	Página
Ecuación 1. Calor total removido.....	16
Ecuación 2. Conservación de energía.....	16
Ecuación 3. Flujo másico.....	17
Ecuación 4. Caudal de circuitos en serie.....	17
Ecuación 5. Caudal de circuitos en serie.....	17
Ecuación 6. Pérdida de carga de circuitos en serie.....	17
Ecuación 7. Caudal de circuitos en paralelo.....	18
Ecuación 8. Pérdida de carga de circuitos en paralelo.....	18
Ecuación 9. Número de Reynolds.....	18
Ecuación 10. Relación de Weisbach para pérdida de carga.....	19
Ecuación 11. Diámetro hidráulico.....	19
Ecuación 12. Coeficiente de Darcy.....	20
Ecuación 13. Cálculo de coeficiente de Darcy.....	20
Ecuación 14. Pérdida de Carga.....	20