



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN EN PLANTA
ACERERA Y HORNOS EAF.**

REPORTE DE ACTIVIDADES PROFESIONALES
EN LAS EMPRESAS AMI-GENERAL ELECTRIC Y TERNIUM MÉXICO
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECATRÓNICO

**PRESENTA:
SERGIO IVÁN MORENO VEGA**

**SUPERVISOR:
DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ**



Ciudad Universitaria, México D.F. Mayo de 2012

Dedico este trabajo a todos quienes han contribuido a la culminación del mismo, ya que no se trata de un trabajo de algunas páginas, ni mis palabras en su defensa; se trata de un trabajo de muchos años en el que cada uno que se ha acercado a mí ha puesto un ladrillo más, o quitado algunos innecesarios.

Agradezco a esta gran institución que me cobijó por tantos años. Universidad única donde prevalecen muchos de los valores que siempre he considerado para mi vida día a día. Agradezco su ciencia y pensamiento, su libertad, su comunidad, su acervo, sus ideales. Para mí, la mejor universidad donde pude haber estado, a la que siempre seré leal. A esta universidad a la que pienso regresar para pagar un poco de lo que me ha regalado, le agradezco.

Agradezco a todos mis profesores. Desde Juan, quien fuiste el primero en impulsar mi manera de pensar...hasta los profesores de esta mi licenciatura: Ale, Billy, Gabriel, Serafín, José Méndez, Fernando Macedo, Víctor Villela, Dorador.... y todos aquellos quienes tuvieron la paciencia, integridad y pasión por entregarnos esos valiosos conocimientos (científicos y empíricos) de una manera sincera y abierta. Por ser personas de inspiración, les agradezco.

Agradezco a todos los amigos que he logrado a mi paso por esta vida: personas invaluable y únicas. Aldo, Arqui, Orlando, Charly, Rachel, Jacky, Martín, Homi, Ramoncito, Victor, Amilcar, Bre, Paio, Mariana, Yare, Herson, Daniel, Remi, Alx, Pao....en fin a todos aquellos con quienes he compartido esos buenos momentos de amistad. Gracias en verdad.

Agradezco a la familia Vega –Charly, Eri, Mi abue, mis tías, mis primos, mis padrinos y todos aquellos unidos por nuestra sangre- que siempre han estado para todo, y que me inspiran a seguir adelante. Estoy muy orgulloso de todos ustedes, y les agradezco.

Agradezco a mi hermana Magali, porque me acompañó durante este proceso en el cual hemos avanzado un poco más en el camino del conocimiento. Por ser una hermana sin compartir sangre, pero sí compartiendo todo lo posible: risas, llanto, abrazos, gozos... Agradezco que me hayas soportado tanto y que seas un ejemplo e inspiración.

Agradezco a mi hermana Aidé, por ser única y diferente. Porque eres admirable y te respeto mucho. Porque doy gracias de tenerte como hermana, por darme tu apoyo y el ánimo para seguir adelante. Por creer en mí y por dudar de mí. Por ser un gran ejemplo te agradezco hermanita.

Agradezco infinitamente a mi madre Eva, que durante tantos años ha puesto todo de sí para impulsarme y conseguir este gran momento, que ha durado muchos años. Le agradezco por haber estado siempre ahí, infranqueable e invencible, demostrando que nada es imposible y por ser la única que jamás me volvería la espalda. Por ser el pilar principal de esta vida que estoy haciendo, te agradezco madre mía.

Y agradezco a Dios y a esta vida, por darme todo lo que he mencionado, y aquello que he olvidado, pero no menos importante.

Iván Vega

“Un amigo es aquel que te da la libertad de ser tu mismo.”

“Muéstrate a ti mismo tu más profundo miedo, después de eso el miedo ya no tiene poder y serás libre.”

James “Jim” Douglas Morrison, Poeta y cantante.

“Nunca consideres el estudio una obligación, sino una oportunidad de penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.”

Albert Einstein, Físico.

“Saber mucho no es lo mismo que ser inteligente. La inteligencia no es sólo información, sino también juicio, la manera en que se recoge y maneja la información.”

Carl Sagan, Astrofísico.

“Ni siquiera un dios puede convertir en derrota la victoria de aquel que se ha vencido a sí mismo”

Siddhartha Gautama, religioso.

“Los árboles esperan: Tú, no esperes, éste es el tiempo de vivir, el único”

Jaime Sabines, poeta.

“Pedid, y se os dará; buscad, y hallaréis; llamad, y se os abrirá. Porque todo aquel que pide, recibe; y el que busca, halla; y al que llama, se le abrirá.”

Jesús de Nazaret, Citado en Mateo 7: 7, 8.

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería Mecánica e Industrial

NOMBRE DE LA EMPRESA: TERNIUM (Contrato de servicios a AMI-GE)

TÍTULO: PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN EN PLANTA ACERERA Y HORNOS EAF
(PRIMERA ETAPA).

Índice

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 HyLSA.....	4
1.2 AMI General Electric	5
1.3 TERNIUM.....	5
1.4 Situación laboral.....	6
1.5 Proyectos.....	8
2 COLADA AUTOMÁTICA	9
2.1 Descripción de la línea	10
2.2 Planteamiento de los objetivos del proyecto	11
2.3 Recursos previos	12
2.4 Definición y límites de la solución	14
2.5 Elección de variables a controlar.....	15
2.6 Análisis del proceso.....	18
2.7 Modelo Objetivo.....	21
2.8 Modelos de control.....	23
2.9 Módulo de pronóstico inicial	25
2.10 Implementación y programación	26
2.11 Capacitación y puesta en marcha	30
2.12 Programación a nivel de campo	31
2.13 Programación a de gestión.....	32
2.14 Resultados del proyecto.....	32
3 MODELO DE COORDINACIÓN Y OPTIMIZACIÓN	35
3.1 Descripción del proyecto	36
3.2 Planteamiento de los objetivos del proyecto	38
3.3 Recursos previos	40
3.4 Definición de los límites de la solución	40
3.5 Implementación y programación (primera etapa)	41
3.6 Instalación de hardware	46
3.7 Arranque del sistema.....	47
3.8 Resultados del proyecto	47
4 CONCLUSIONES	49
5 BIBLIOGRAFÍA.....	54

1 INTRODUCCIÓN

1.1 HyLSA

Desde hace mucho tiempo, la industria metal-mecánica ha sido desarrollada y mejorada constantemente, desde la forja del hierro hasta los complejos acereros de hoy día. Uno de los métodos actuales (aunque ha tenido un constante desarrollo desde principios del siglo XX) para la producción de acero es el uso de Hornos de Arco Eléctrico. Aún después de todos estos años, siguen desarrollándose mejoras a estos hornos, con la finalidad de mejorar la calidad, reducir tiempos de producción y, en consecuencia, aumentar las ganancias en la producción de acero.

En Monterrey, México, el acero ha sido una de las industrias con más trascendencia, siendo una de ellas la ya desaparecida Fundidora de Monterrey, cuya historia se remonta a principios del siglo XX. Esta empresa, una de las de mayor proyección a nivel nacional e internacional, fue pionera en el uso de altos hornos en la zona.

Una de las grandes industrias del acero en México durante el pasado siglo fue la también desaparecida Hojalata Y Lámina S.A. (HYLSA). Una empresa fundada a finales de la Segunda Guerra Mundial (1942). Esta empresa fue fundada dada la situación de la época, en la que se imposibilitaba la importación de acero.

HyLSA, dedicada a la producción de aceros planos, desde rollos de lámina negra hasta láminas que han pasado por algunos tratamientos secundarios, fue una empresa de gran trayectoria, que en un inicio producía material de una calidad muy baja; sin embargo, a través del tiempo logró consolidarse como una de las empresas de mayor prestigio en el país incrementando su capacidad y variedad de productos incluyendo aceros recocidos, tuberías y aceros preformados con características y medidas especiales a petición del cliente.

Con base de operaciones en su planta de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, logró competir en el mercado acerero nacional a la par de empresas como Altos Hornos de México.

Entre los mayores logros de la empresa, se puede contar el desarrollo de la tecnología de "Reducción directa"¹. Esta nace entre el final de la

¹Información obtenida de:

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/072/htm/sec_5.htm

década de 1950 y el principio de la década de 1960 como consecuencia de la Guerra de Corea. El incremento en los precios de la chatarra (principal materia prima de HyLSA para la producción de acero) motivó a la empresa a iniciar un proceso de investigación cuyo resultado fue esta tecnología, que al día de hoy sigue siendo líder en el campo de obtención del mineral de hierro, eliminando materiales indeseables en el mismo.

Uno de los principales procesos en HyLSA fue la producción de aceros planos a partir de chatarra y mineral de hierro en sus dos plantas de fundición por medio de hornos de arco eléctrico. La planta más antigua ya no existe en la actualidad.

1.2 AMI General Electric

AMI (Automation and Control Innovation) es una empresa internacional dedicada a la automatización y soluciones en el área de control. Nace en el año de 1987 a partir de un grupo de trabajadores que decide crear una empresa de *Outsourcing* enfocada en la automatización. Provee servicios a diferentes industrias de los más variados ramos industriales tales como el acero, papel, concreto, gas y petróleo, minas, automotriz entre otros. Uno de los principales clientes a lo largo de su historia fueron HyLSA e IMSA.

A finales de la década de 1990 AMI utilizaba mucho equipo General Electric en sus proyectos, por lo que esta última pone gran atención en el modo de trabajo, misión y visión de AMI. General Electric termina comprando un porcentaje de participación de AMI, nombrándola de manera comercial AMI-GE.

Actualmente tiene oficinas y proyectos en un gran número de países y empresas. Es una empresa líder en automatización para Hornos de Arco Eléctrico, molinos laminadores y en la industria del acero en general².

1.3 TERNIUM

Es una empresa productora de aceros planos, que nace de la integración de las siderúrgicas HyLSA en México, Siderúrgica del Orinoco (SIDOR) en Venezuela y Siderúrgica de Argentina (SIDERAR). En su momento, sufrió la separación de SIDOR, dada la nacionalización de la

²http://www.amiae.com/amiae_about_us.html

industria del acero por el gobierno Venezolano. A su vez, contó con la incorporación de la siderúrgica mexicana Industrias Monterrey (IMSA).

TERNIUM forma parte del grupo TECHINT, y es líder internacional en cuanto a la producción de acero, conformado, perfiles, galvanizados entre otros.

HyLSA, a principios del siglo XXI fue adquirida para formar parte del holding TERNIUM. Algunas de las plantas más importantes de HYLSA, y actualmente de todo el complejo TERNIUM, son las plantas productoras basadas en Horno de Arco Eléctrico; destacando entre ellas la llamada Acería Molino 2 (AM2).

1.4 Situación laboral

Mi experiencia profesional laborando con AMIGE duró cerca de dieciocho meses, a partir de la contratación como Ingeniero Nivel 2, para brindar servicios de automatización a TERNIUM. Ternium tiene un esquema de trabajo bastante peculiar, ya que para la realización de proyectos de ingeniería cuenta con “coordinadores de proyectos” como personal propio, y todo el equipo de trabajo con que cuenta cada coordinador para desarrollar los proyectos es personal subcontratado; sin embargo, aunque el personal que realiza este trabajo es externo, tiene que estar en planta con un horario definido, como si fuera parte de Ternium.

Todos los coordinadores tienen la responsabilidad de supervisar y dirigir muchos proyectos, y es por esto que con base en la experiencia del personal a su cargo se eligen a los líderes de cada proyecto, individualmente. Estos líderes serán los encargados de llevar a cabo la dirección y seguimiento del proyecto de una manera constante y más cercana al resto del equipo de trabajo, respondiendo ante el coordinador.

Todos los ingenieros que comienzan a trabajar para Ternium comienzan formando parte de algún equipo de trabajo, y conforme su experiencia aumenta puede liderar algún proyecto.

AMIGE no es la única empresa subcontratada para la realización de proyectos, por lo que además de responder a los líderes de proyectos y coordinadores Ternium, cada empleado debe mostrar resultados ante un Coordinador de empresa, quien es el representante directo ante Ternium.

Es así como después de algunos meses de trabajo en Ternium tuve la oportunidad de liderar algunos proyectos, entre ellos los que presento en este escrito, además de realizar otras funciones dentro de la empresa; la siguiente imagen muestra el organigrama empresarial bajo el cual realicé estos trabajos.

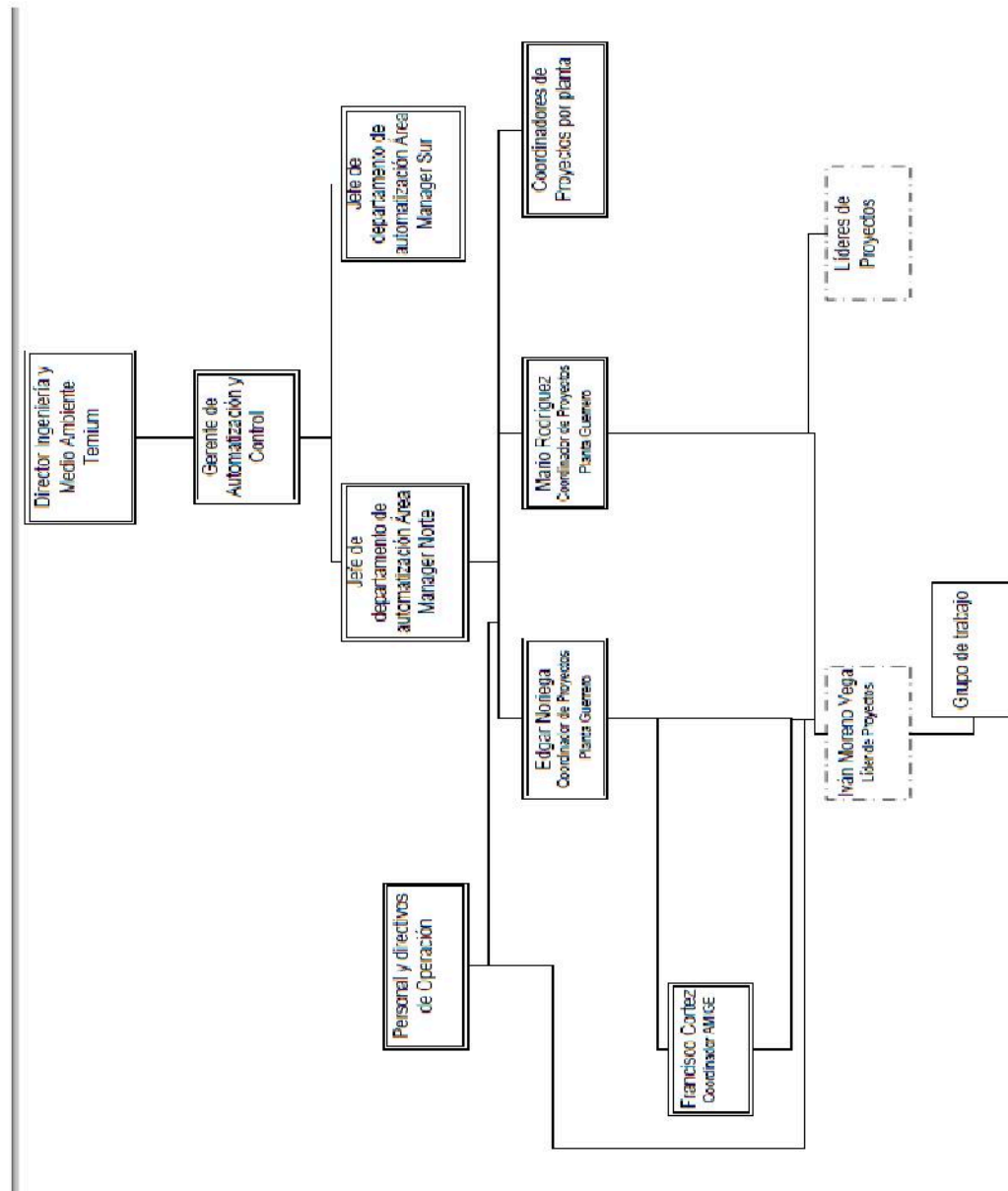


Figura 1.1 Organigrama Laboral

1.5 Proyectos

Durante la estancia en TERNIUM llevé a cabo dos grandes proyectos para esta línea de producción, ligados entre sí y con la finalidad de aprovechar los diferentes sistemas de automatización para mejorar la eficiencia y calidad del producto final: rollos de lámina de acero.

El primer proyecto a desarrollar (COLADA AUTOMÁTICA³) consistió en la automatización completa del proceso más importante de la línea, la fusión del hierro (chatarra y hierro esponja) en dos hornos de arco eléctrico. Los objetivos principales de este proyecto eran:

- Mejorar los tiempos de fusión (colada).
- Mejorar y homogenizar la calidad del hierro fundido.
- Acoplarse al proyecto siguiente (COORDINACIÓN³).

El segundo proyecto consistió en un sistema inteligente, que realiza una predicción diaria de la producción, basada en estándares de tiempo, calidad, pesos y ciclos de producción. Esta predicción debe marcar el ritmo óptimo para toda la planta. El proyecto constaba de varias etapas debido a su complejidad. En la primera etapa, los objetivos principales eran:

- Obtener el rendimiento óptimo de 3 secciones de la línea de manera dinámica, basados en un esquema diario de producción.
- Acoplar el sistema para controlar parcialmente la primera sección automatizada (Hornos de fusión).
- Comparar la producción real con la producción objetivo, y mostrar a los operadores una serie de consejos.

Hay que resaltar que en esta línea el trabajo óptimo no representaba el más veloz, sino mantener la línea trabajando al ritmo de la sección naturalmente más lenta. No tiene caso acelerar una sección si más adelante no se puede hacerlo, creando cuellos de botella.

³ Los nombres originales de dichos proyectos no son mostrados ya que se encuentran protegidos por las leyes de propiedad industrial

2.1 Descripción de la línea

La producción de AM2 consiste en la creación de rollos de lámina de acero a partir de las principales materias primas:

- Acero reciclado (chatarra).
- Hierro.
- Manganeso.
- Oxígeno.
- Cal siderúrgica.
- Cal dolomítica.

Para lograr esto, el producto tiene que pasar por las diferentes secciones de la línea, descritas brevemente a continuación:

- Patios de chatarra: Aquí se recibe y clasifica el acero reciclado adquirido y se preparan las cargas para su fusión.
- Reactores de reducción directa: En ellos se lleva a cabo la eliminación de elementos no convenientes para la reducción del hierro.
- Hornos de arco eléctrico: Se lleva a cabo la primera fusión a partir de cargas de chatarra y la adición continua de mineral de hierro proveniente de los reactores de reducción directa.
- Hornos de aceración secundarios: En ellos se lleva a cabo la aceración y se afina la calidad del metal.
- Vaciado continuo: Mediante un vaciado y enfriamiento constante se produce una tira uniforme, que a la salida es cortada en planchones.
- Horno túnel: Permite homogenizar y conservar la temperatura en los planchones. Al final de túnel, permite que el acero sea laminado con una temperatura constante.
- Laminador tándem: En este dispositivo, el planchón proveniente del horno túnel es laminado en varios rodillos, haciendo pasar el acero uno tras otro con un calibre cada vez más delgado.

Este proyecto se centra en la automatización del proceso de fusión en los hornos de arco eléctrico.

2.2 Planteamiento de los objetivos del proyecto

Al inicio del proyecto, el proceso de fusión mediante los hornos de arco eléctrico estaba medianamente automatizado. El proceso cuenta con etapas bien definidas, pero el sistema automático no era capaz de llevarlas a cabo de una manera coordinada, y se necesitaba la forzosa intervención de un operador que verificara el desarrollo y desempeño de los hornos.

Al ser un operario quien controlara el proceso, la calidad y tiempo nunca eran constantes, debiendo guiarse por programas de producción impresos, y hacer verificaciones de velocidades, temperaturas y consumos de energía, entre otros.

Al hacer un análisis de los elementos a controlar, se encontró que eran varios, principalmente:

- El peso de la carga metálica.
- La velocidad de alimentación del hierro.
- La inyección de Carbono y Oxígeno.
- El porcentaje de carga fundida.
- La temperatura del baño de acero.
- El consumo de energía de los electrodos.
- Los cambios en los niveles de potencia de los electrodos.
- La adición de cales.
- Los niveles de elementos como azufre, manganeso y otros no tan importantes en la aleación.

Todas las variables a controlar cuentan ya con un sistema local de control, que recibe instrucciones para llevar a cabo acciones definidas, algunos más complejos que otros.

El problema de la automatización de la fusión en los hornos de arco eléctrico entonces nos lleva a crear un control distribuido, en el cual se plantee un objetivo principal a controlar, y se tomen decisiones parciales independientes para conseguir dicho objetivo, sabiendo el efecto que tendrán.

2.3 Recursos previos

En la planta existen dos hornos de fusión por arco eléctrico. Uno Marca Danielli con una capacidad de hasta 200 toneladas por fusión y uno marca Fuchs con una capacidad de hasta 170 toneladas.

Como se mencionó anteriormente, la planta contaba con sistemas de automatización parciales. El más importante es un sistema de monitoreo basado en OPEN VMS⁴ en el que se guarda la información (adquirida en tiempo real desde los PLCs) de variables y constantes que rigen a cada horno. Este sistema sirve como fuente de información tanto para las pantallas y elementos que sirven de interfaz visual para los operadores, como para los sistemas de automatización de nivel más bajo, pudiendo así acceder a las tablas y tomar decisiones y acciones en ambos sentidos.

Además del sistema OPEN VMS, existe todo un sistema de automatización local para efectuar las acciones necesarias sobre cada elemento. Un equipo trabajó de manera paralela a este proyecto para realizar la programación de los dispositivos, en su mayoría PLCs ALLEN BRADLEY⁵.

Las interfaces hombre-máquina también tuvieron algunas modificaciones.

La infraestructura de comunicación es una red TCP/IP a la que se conectan los equipos de automatización que en resumen se trata de tres tipos esenciales:

- PLCs y dispositivos de automatización local.
- Equipos OPENVMS que fungen como servidores de información (y a partir de este proyecto, como servidores del sistema de control).
- Equipos HMI realizados a partir del software WONDERWARE⁶.

La infraestructura cuenta con un sistema CISCO, encargado del área de redes, quien se encargará del direccionamiento de los puertos. Por lo que el desarrollo del proyecto se encuentra protegido por todas las áreas correspondientes, y todos los equipos trabajarán de manera conjunta.

⁴ Sistema operativo basado en un entorno multiusuario, multiproceso y de memoria virtual compartida.

<http://h71000.www7.hp.com/>

⁵ Equipos y software de automatización propiedad de Rockwell Automation.

<http://ab.rockwellautomation.com/>

⁶ Sistemas de software para automatización y SCADA propiedad de Invensys.

<http://global.wonderware.com/EN/Pages/default.aspx>

Se puede definir un esquema para ilustrar la jerarquización de los elementos involucrados en la automatización para poder comprender los niveles en los que actúa cada uno, y el límite de responsabilidad de cada uno. Este esquema se muestra en la Figura 2.1.

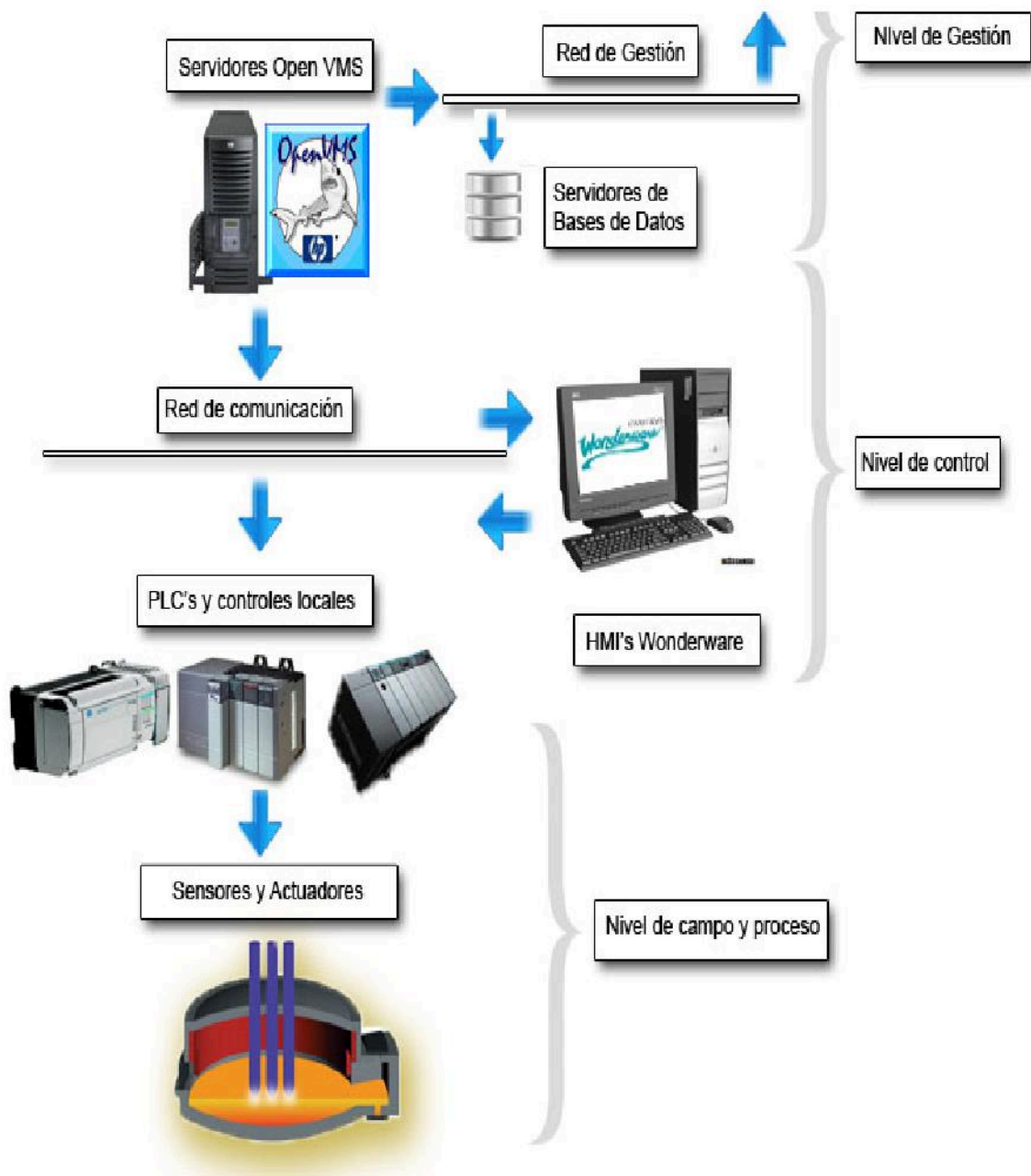


Figura 2.1 Niveles y fronteras

2.4 Definición y límites de la solución

Entre las características buscadas del nuevo sistema que dará solución a la automatización de los hornos están las siguientes:

- Debe tomar valores de las tablas de datos existentes en Open VMS. Esto será el equivalente a la adquisición de datos, la cual es llevada a cabo por los elementos de nivel inferior.
- Debe poder modificar tablas en Open VMS, lo cual será entendido como instrucciones para los elementos de nivel inferior.
- El sistema debe trabajar en tiempo real o de la manera más veloz posible.
- El sistema debe ser muy fácil de usar para los operadores.
- El sistema debe tener la posibilidad de modificación sin necesidad de contratar terceros.
- De ser posible, realizar el desarrollo con recursos propios y sin contratar terceros.
- El sistema debe dejar datos disponibles para su lectura por los sistemas de gestión y bases de datos.
- Con los antecedentes mencionados, la solución es crear un sistema de control que distribuya instrucciones a los elementos encargados de la automatización local. Una de las opciones planteadas es instalar un DCS, lo cual representa una gran inversión en una nueva infraestructura que sería acoplada al sistema existente, la cual debe incluir comunicación, equipos y una nueva programación.

Dadas las características de Open VMS, es posible crear aplicaciones nuevas dentro de los servidores, que utilicen el sistema de memoria compartida. Las aplicaciones se ejecutarían en tiempo real de manera paralela a las de adquisición de datos dentro de los servidores y no necesitarían una nueva infraestructura física (equipos, comunicación, refrigeración, entre otros).

Uno de los lenguajes de programación disponibles para la creación de aplicaciones en los servidores OPEN VMS es C, por lo que será relativamente fácil realizar la implementación de dichas aplicaciones.

Un detalle a tomar en cuenta es que cuando se instalaron las aplicaciones existentes, el diseño de una de ellas incluía un programa de relevamiento que funciona de la siguiente manera: Se pueden realizar modificaciones a los códigos fuente en C (con un historial de versiones nativo por el sistema) y realizar la compilación, una vez listo el nuevo set de instrucciones se releva el programa haciéndolo transparente para el proceso. Si existe un error en tiempo de ejecución, automáticamente el relevamiento regresa a la versión anterior. Este sistema de relevamiento nos ayudará en caso de necesitar nuevas modificaciones a futuro, para las cuales no se requiere más que modificar y relevar.

La velocidad no está comprometida ya que los servidores aún se encuentran con capacidad de memoria y uso de procesador libres. Incluso, los servidores disponen de espacio suficiente para escalarlos en niveles de memoria, procesadores, dispositivos de red y almacenamiento.

Al coexistir con las aplicaciones existentes el acceso desde y hacia bases de datos de niveles de gestión será transparente, simplemente modificando las instrucciones de lectura y almacenamiento.

Las modificaciones a las HMIs deberán incluir un cambio entre modo manual y modo automático, el ingreso de datos extras que sean necesarios para el modo automático. Estas modificaciones son mínimas, por lo que el uso debe ser sencillo para los operadores, teniendo que enfrentarse a cambios mínimos.

A partir de todas estas premisas se elige que el sistema de control residente en los servidores OPEN VMS es la opción más adecuada para llevar a cabo el proyecto. Cumple con los requerimientos más importantes y la inversión es muy baja, al no requerir infraestructura en hardware ni adquisición de licencias de software.

2.5 Elección de variables a controlar

Dentro del proceso de fusión existen diferentes variables para controlar, algunas ya son monitoreadas y actuadas de manera automática para su correcto funcionamiento. Algunas de ellas son:

- El voltaje en los electrodos de los hornos.
- El consumo de corriente de los hornos y, por tanto, la potencia.
- La cantidad de acero que hay en el horno.
- El porcentaje de acero líquido en el horno.
- La velocidad de alimentación de fierro esponja.
- La temperatura final del baño de acero.
- El control de inyección de carbono y oxígeno y demás agregados.
- Carga inicial de chatarra y Hot Heel⁷

De estas variables, las que influyen directamente en el desarrollo de la fusión son las que están involucradas con la energía, y la alimentación de acero.

La temperatura sólo se puede calcular mediante modelos matemáticos a partir de las variables de inicio, ya que la única medición de ésta se hace casi al final de la fusión, dejando tiempo suficiente para hacer el ajuste aumentando la potencia. La toma de temperatura no se puede hacer vía láser ya que esto tomaría la temperatura de la escoria resultante, y no es la misma que la del baño de acero, por lo que no podemos fiarnos de la temperatura ni esperar controlarla por completo, sino observarla y tratar de acercarnos a un objetivo.

El control de la electricidad necesaria para fundir el acero parece una variable más coherente, sin embargo resulta más complejo de lo que parece. El control de la energía depende directamente de la resistencia que oponga la carga metálica al ser fundida, y ésta obviamente no es constante ni siquiera cuando se deja de alimentar hierro, es decir con un tonelaje constante, debido a que la resistencia del acero cambia con la temperatura.

Actualmente existe una aplicación en el nivel de control por PLC que hace un control de la potencia entregada al acero. Este programa de potencia se ajusta al método tradicional de utilizar niveles de potencia para fundir el acero (bajo, medio, alto y ultra alto) por lo que no es conveniente realizar modificaciones en dicho programa. Al contrario, al

⁷ Remanente de acero líquido que queda al vaciar la fusión anterior. Cuando es la primera fusión después de una reparación o un paro, este remanente no existe.

estar ajustado y trabajando de manera perfecta para cualquier tipo y peso de coladas hasta ese momento realizadas en los hornos, es más factible utilizar los alcances del mismo para automatizar todo el proceso.

Sin embargo, hay una variable muy fácil de controlar y que tiene un impacto directo sobre cada una de las demás variables, los efectos son predecibles mediante modelos matemáticos. Dicha variable es la velocidad de alimentación del mineral de hierro; estos modelos están realizados y probados, son los que se usan para el trabajo mediante control manual.

Al aumentar o disminuir la velocidad de alimentación se modifican directamente las variables sobre las que no existe un control, como son el delta de carga metálica medido en toneladas, la temperatura del baño o incluso queda ligada a otra variable importante: la velocidad de descenso de los electrodos dentro del baño de acero. Es muy importante tener un control sobre esto ya que al introducir demasiado rápido los electrodos, nos encontraremos con metal no fundido y es posible una ruptura de los mismos. Si la inmersión es muy lenta, el arco no será eficiente y tendremos una pérdida muy importante de energía. Incluso, hay que evitar un sobrecalentamiento de los electrodos para aumentar su vida útil, y la manera más práctica de hacerlo es agregando hierro para enfriar el baño.

Bajo estos supuestos, al parecer controlar la velocidad de alimentación del hierro es la manera óptima de implementar un control al proceso de fusión. Ya que no necesita afectar a programas de control existentes, y la única variable a controlar de manera directa es la velocidad con que una banda proveniente de los reactores de reducción directa alimenta el hierro.

Sin embargo, dada la complejidad del proceso, es necesario programar el modelo matemático que simule por completo el proceso para, con base en esto, poder determinar objetivos a alcanzar durante el desarrollo, y tener comparativas y datos que pueden servir para posibles mejoras y modificaciones.

2.6 Análisis del proceso

Una vez definida la variable a controlar, se genera la necesidad de tener un modelo a seguir, para saber cómo será el desarrollo del proyecto. El modo manual que se lleva hasta antes de la automatización consiste en una metodología como se describe a continuación:

- Realizar una carga de chatarra en el horno (puede quedar un remanente líquido y esta carga de chatarra puede no existir).
- Se declaran 5 objetivos en toneladas de carga metálica y porcentaje de carga fundida. Es decir, además de la chatarra agregada, constantemente se alimentará mineral de hierro.
- Con ayuda de una hoja de cálculo se estima el consumo de energía para poder fundir el acero que se ha marcado como objetivo.
- Estos datos son suministrados al “programa de potencia”, el cual se encarga de controlar la energía suministrada al baño de acero.
- Al llegar a cada objetivo, se mide el peso y se verifica la energía consumida, con esto se estima si se logró fundir (en porcentaje) la cantidad deseada de metal.
- Se repite hasta llegar al quinto objetivo.
- El programa de potencia decide el nivel de potencia durante el tiempo de cada objetivo.
- A partir del quinto objetivo, se mantiene una velocidad constante de alimentación, de manera que el material agregado absorba la energía brindada por los electrodos de manera casi completa. Con esto se estabiliza el porcentaje de carga fundida y de manera más importante, la temperatura del baño de acero. Durante este intervalo se agregan aproximadamente 8 toneladas de acero.
- Finalmente, una vez que se conoce la temperatura del baño de acero^B se agregará el material necesario para completar el objetivo final en peso de acero. Al mismo tiempo, el “Programa de potencia” modificará su perfil de suministro, para lograr una correcta temperatura final del baño. A esta etapa se le conoce como etapa de ajuste.

^B La temperatura se mide mediante una prueba destructiva, en la que se introduce un termopar al baño de acero. Este informará la temperatura casi de manera instantánea pero se fundirá con el resto del baño.

- Al terminar de agregar todo el material necesario, se toma una muestra del baño, la cual será mandada a laboratorios para evaluar características químicas y calidad. El horno será vaciado parcialmente apartando la escoria del acero líquido.

El equipo de trabajo, el área de diseño de procesos y la directiva encargada de la Acería convienen que emular esta metodología es la mejor manera de lograr la automatización del proceso de fusión. Diseño de procesos nos hace ver que los modelos matemáticos para llevar a cabo el método han sido probados y son óptimos y eficientes, por lo que no hay necesidad de mejorarlos.

Con base en un lapso durante el cual se montaron guardias, para vigilar el proceso, se definieron bloques principales de acción, basados en la anterior metodología; todo esto para poder definir un diagrama de flujo que contemple todas las posibilidades a tener en cuenta en la programación y evitar problemas en caso de imprevistos.

El diagrama de flujo de acciones principales de control constará de lo siguiente y es ilustrado para un mejor entendimiento en la figura 2.2.

- En el módulo de inicialización se cargan las variables necesarias para que pueda iniciar el proceso, así como las constantes que completan el modelo matemático que define al proceso. Se deben verificar las comunicaciones, y que los elementos de nivel de control más bajo estén listos para operar. En teoría es en este momento cuando se deberían cargar los datos provenientes del púlpito de control en los que se indican los objetivos de carga metálica, las cargas iniciales de chatarra y los pesos del remanente líquido
- El módulo de lectura de datos prepara la memoria compartida para que pueda ser leída por los modelos matemáticos, los dispositivos de control, y los procesos encargados de ponerlos en las bases de datos para que estén disponibles en el nivel de gestión y para su publicación en los sitios web de operación para consulta instantánea.

- El módulo del balance de materia pretende ser el primer modelo matemático que define el proceso. Debe encargarse de calcular el material que hay dentro del horno y deducir las relaciones de componentes químicos. Principalmente debe lograr los siguientes cálculos:

- Total de material en el horno.
- Los componentes del material de hierro agregado.
- La cantidad de escoria en el horno.
- La cantidad de óxido ferroso en la escoria.
- El peso del acero (sin escoria)
- El balance químico de óxido ferroso y carbón. (Aquí se debe calcular la cantidad agregada durante el proceso, cuánto se ha fundido, cuánto está en la escoria, cuánto ha reaccionado de cada uno).
- El volumen de gases.
- La cantidad de gases generados por unidad de tiempo.
- El gasto o flujo de gases liberados por los ductos de escape.

- El módulo de balance de energía debe ser el segundo modelo matemático que defina al proceso y estaría encargado de calcular la distribución de energía suministrada al sistema. Los principales cálculos que debe realizar este modelo son:

- La energía correspondiente al remanente líquido, cuánta de ella está disponible para ser transferida al resto del sistema.
- La energía que hay en la escoria al inicio del proceso de fusión.

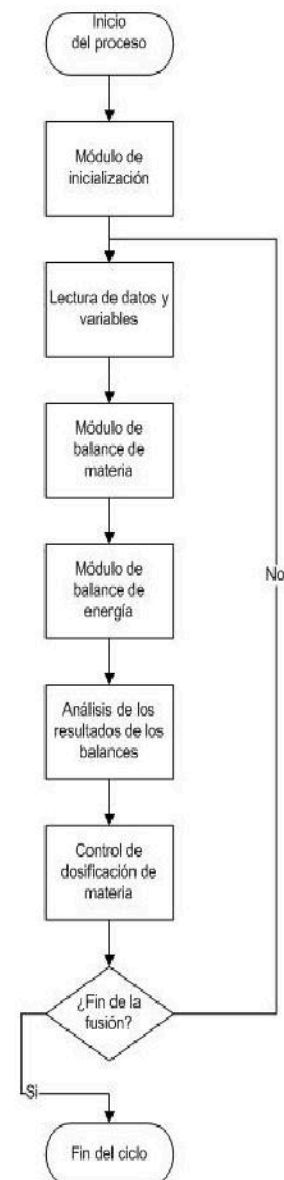


Figura 2.2

- La energía que ha sido suministrada a la chatarra de la primera carga⁹.
 - La energía que absorbe el mineral de hierro agregado por unidad de tiempo.
 - La energía resultante (expelida o absorbida) por las reacciones químicas dentro del horno.
 - La energía suministrada por los quemadores de apoyo.
 - Las pérdidas energéticas en el horno.
 - La energía específica del acero fundido.
 - La energía de fusión.
 - El porcentaje de material fundido.
 - La energía en los gases de salida.
- El módulo de análisis de resultados realizará una validación de los resultados obtenidos por los demás módulos para verificar su validez, y no intentar lograr un objetivo fuera del alcance del sistema.
 - El módulo de dosificación de materia será el encargado de leer los resultados de los modelos matemáticos y decidir la velocidad de alimentación del mineral de hierro para poder cumplir los objetivos de carga metálica, porcentaje de carga fundida y temperatura final.

Estos módulos fueron tentativos en el momento que se definieron ya que necesitan adecuarse durante la etapa de programación e incluso estando operativos necesitarán mejoras constantes. A partir de este momento comienza la primera etapa de implementación y programación en sitio.

2.7 Modelo objetivo

Estos modelos matemáticos tienen como entrada datos reales, definen cómo se debe comportar el proceso a partir de todos ellos, y de la información suministrada inicialmente. Por tanto pretende ser la guía que vaya marcando el paso del proceso durante el desarrollo de cada

⁹ Antes de ser agregada al horno, la chatarra es expuesta a los gases de salida de la colada anterior, con lo que recupera energía en forma de calor.

objetivo; para esto se valdrá de una serie de valores ideales contra los cuales comparar sus resultados, verificando así que los objetivos no estén lejos de aquellos completamente teóricos. Este modelo, también tomará los valores del inicio de la colada y cargará “perfiles de fusión” ideales y bien definidos, con los que hará los cálculos; estos perfiles de fusión contienen los datos que los otros modelos toman como reales.

En resumen, el modelo objetivo realiza los siguientes cálculos y funciones:

- Toma los valores de inicio y los carga en memoria para tenerlos disponibles.
- Calcula la carga fundida al inicio de la colada y la energía necesaria para completar el objetivo pretendido.
- Define cómo debería comportarse el sistema al agregar una carga de chatarra (puede que no exista la primera) dependiendo del objetivo de carga fundida y toneladas de carga metálica.
- Calcula la energía y cantidad de hierro para cumplir el objetivo, y simula el suministro de ambos por un corto espacio de tiempo.
- Con la simulación anterior, define un estado nuevo en el horno. Y revisa si existe alguna demora o imprevisto en el proceso real para modificar los resultados.
- Realiza una comparación entre el proceso real y el proceso simulado, y verifica posibles errores. También crea indicadores con base en las diferencias.
- Guarda las diferencias acumuladas entre los errores de las comparaciones para saber cuál fue la desviación al final del proceso.
- Deja los indicadores disponibles para que el control de materia se encargue de tomar las decisiones y perseguir el objetivo.

La explicación detallada de dicho modelo va más allá del alcance de este reporte, ya que fueron hechos por el área de diseño de procesos metalúrgicos y no corresponde al área de automatización más que convertirlos en un código que realiza los cálculos.

2.8 Modelos de control

Una vez teniendo los modelos y valores que definen al proceso en cuestión energética y de materia además del modelo y valores que definen al proceso de una manera ideal, tenemos una base de comparación para discernir el cumplimiento de los objetivos.

Estas diferencias de error podemos suministrarlas a un nuevo modelo matemático para que decida las acciones de control, que se reducen principalmente a la alimentación del mineral de hierro a mayor o menor velocidad. Obviamente existen más elementos a controlar, como son la adición de cal siderúrgica y dolomítica, la inyección de oxígeno y carbono, señales para el programa de potencia; sin embargo, es preferible mantener estas variables lo más constantes posible para poder tener un sistema más estable y apegado al proceso ideal.

El modelo de control tiene que ser seccionado en otros módulos para simplificar la programación de acuerdo a las etapas principales del proceso:

- Cargas de chatarra
- Inicio de la colada
- Estabilización de la colada
- Toma de temperatura
- Ajuste

El modelo, por lo tanto, debe adecuarse a cada una de estas etapas, en la programación se llevaron a cabo las siguientes instrucciones para lograrlo¹⁰:

- Al momento de las cargas, la velocidad es 0.
- Al comenzar la colada, se tendrá una etapa de velocidad inicial, con un valor mínimo: Para el Horno de Fusión 1 (Fuchs) entre 15 y 20 Kg/min/MW¹¹, mientras que para el Horno de Fusión 2 (Danieli) la velocidad es de 18 a 20 kg/min/MW.
- Al alcanzar un punto estable de carga metálica agregada (Fuchs en 25 toneladas y Danieli en 20) El sistema tomará una velocidad

¹⁰ Estas instrucciones se muestran en forma de pseudocódigo.

¹¹ Como podemos observar la velocidad depende directamente de la energía suministrada.

crucero mientras no haya imprevistos. Estas velocidades son 34 Kg/min/MW para Fuchs y 43 Kg/min/MW para Danieli.

- Antes de alcanzar el objetivo final de carga metálica, medido en toneladas (20 toneladas faltantes para Fuchs y 18 Toneladas faltantes para Danieli) se tomará la muestra de temperatura y la velocidad de alimentación del mineral del hierro se reducirá a 25 y 23 Kg/min/MW respectivamente para Fuchs y Danieli.
- Al recibir la toma de temperatura en el sistema, el control comenzará con la etapa de ajuste para aumentar o disminuir la temperatura final del baño de acero.

En la siguiente figura se muestra una gráfica en la que se compara el desarrollo de la fusión, dividida en etapas comparando las Toneladas de carga metálica contra el porcentaje de carga fundida

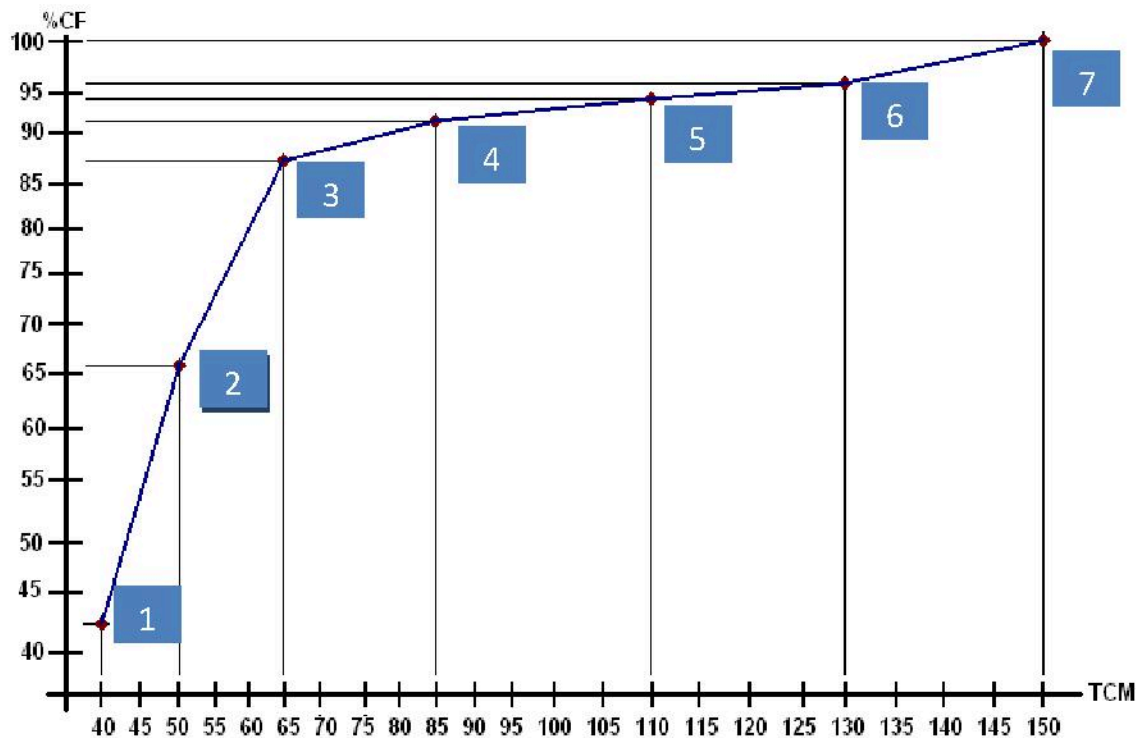


Figura 1.3 Perfil de Fusión "Toneladas de Carga Metálica VS % Carga Fundida"

1. Inicio del proceso de fusión: Para esta figura, las 40 toneladas de carga metálica corresponden a la carga de chatarra y el remanente líquido. De igual manera el 40% de carga fundida es debido a la existencia del acero en forma líquida y el acero de la chatarra aún sólida. A partir de este punto comienzan a actuar el programa de potencia y el control de dosificación de material, este último en un comienzo tendrá que actuar sabiendo que es el inicio del proceso, con una velocidad baja. Al alcanzar la cantidad de carga necesaria –diferente para cada horno- comenzará el control con velocidad crucero.
2. Se alcanza el primer objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida.
3. Se alcanza el segundo objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida.
4. Se alcanza el tercer objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida.
5. Se alcanza el cuarto objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida.
6. Se alcanza el quinto objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida. Durante todos estos lapsos, el control de carga actúa siguiendo los objetivos dictados por el perfil simulado, el programa de potencia y los resultados arrojados a cada instante. Al alcanzar este último objetivo, se realiza la toma de temperatura. Después de ello comenzará el ajuste
7. Al llegar a este punto, se ha fundido todo el material que se ha agregado al horno, y el objetivo de carga metálica se ha alcanzado obteniendo una temperatura promedio, muy cercana a la necesaria para el siguiente proceso.

2.9 Módulo de pronóstico inicial

Este módulo se definió posteriormente, durante la etapa de programación, la necesidad de este módulo viene dada de un problema encontrado durante esta etapa: Cada que el modelo de simulación era calculado, tomaba en cuenta algunos datos a partir del punto anterior,

por lo que se modificaba constantemente. Entonces se optó por hacer un “pronóstico inicial” en el que se simulara todo el proceso de manera ideal desde un inicio. Con esto, el resto de los modelos matemáticos tenían un objetivo fijo a seguir.

2.10 Implementación y programación

Para poder implementar la programación, primero se definió el diagrama de flujo completo, con bloques que contenían sólo pseudo código. Este diagrama de flujo tuvo modificaciones constantes hasta tener un programa final idéntico al diagrama de flujo.

Dada la complejidad del proyecto, los modelos y el convertirlos en un programa en C, además del hecho de no contar con la posibilidad de detener la línea para poder realizar pruebas, se tuvo que identificar un modo para poder realizar el desarrollo de cada parte del proyecto sin tener tales afectaciones.

Para dar solución a este problema se instaló un Servidor OPEN VMS idéntico a los ya existentes. Este servidor fue programado de manera que leyera los datos de los servidores activos, uno por vez. De esta manera se tenía disponible la información en vivo sin afectar en absoluto a la línea de producción.

Con los datos disponibles y sin problemas se comenzó la programación, iniciando por el módulo que creaba la simulación del proceso, para poder tener un modelo a seguir por cada uno de los demás módulos. Este modelo fue probado en múltiples ocasiones con la finalidad de verificar la validez de los resultados arrojados. La gráfica más representativa de este modelo es aquella en la que se compara la energía suministrada y la alimentación del mineral de hierro.

En la siguiente figura se muestra dicha gráfica después de haber afinado el modelo, el cual fue seguido por los operadores para lograr una colada muy parecida al modelo ideal con base en las características iniciales de dicho proceso. En amarillo se muestra el progreso del proceso que fue realizado en modo manual, y en rosa punteado se muestra el objetivo propuesto por la simulación. Además, en azul se muestra el material dentro del horno.

Después de crear el modelo de pronóstico se crearon paralelamente los demás módulos de simulación, trabajando todos de manera independiente, enlazados simplemente por los valores que entregan y que son utilizados por los otros módulos para realizar lo necesario.

Una vez creados todos los modelos de simulación se creó el programa principal, que simplemente tiene un ciclo infinito que manda a llamar a cada uno de los demás módulos en el orden en que deben actuar, obviando el hecho de que el pronóstico es el primero en ejecutarse y lo hará sólo una vez por colada.

Hasta este punto se han definido los modelos simulados, hay que recalcar que esta implementación se llevó de manera paralela para cada uno de los hornos, teniendo así dos modelos diferentes e incompatibles entre ellos debido a las particularidades de cada uno, pero que de manera general tienen los mismos principios de funcionamiento.

PERFIL ACTUAL DE FUSION
COLADA: 26721

Ref. Val. ALCO: 0 kg/minMMN, Indicador de Perfil: 4.8



Figura 2.4 Evolución de una Fusión

Posteriormente, se montaron el programa principal y los módulos de simulación en el servidor OPEN VMS para comenzar a crear los objetivos constantemente. Esto sirve de apoyo para encontrar deficiencias o errores

en tiempo de ejecución. Mientras esto era probado, los modelos de control fueron programados de la misma manera, leyendo los datos de los servidores y guardando un set de instrucciones, el cual era corroborado de manera visual.

Se creó anticipadamente un programa de registro, el cual iba guardando cada uno de los “movimientos” de los programas, para poder llevar a cabo un seguimiento detallado y en todo momento. Este programa fue acoplado al sistema de registro ya existente. La anticipación de este módulo se dio por la necesidad de hacer un análisis posterior a los fallos en el sistema, que aun cuando pudieran ser importantes no serían lo suficientemente graves como para detener el proceso.

Una vez hechos y medianamente probados los algoritmos de control, se esperó a una reparación extraordinaria de toda la planta. Esto por el peligro que se corre al tratar de controlar cualquier elemento en funcionamiento. Al tener la línea detenida se desconectaron los equipos del nivel de control de PLC y se puso a trabajar un sistema de simulación para proveer los datos de una colada real (que se tenían previamente guardados). Al verificar que las instrucciones eran interpretadas de una manera transparente y sin problema alguno, se fueron conectando los equipos poco a poco hasta tener de nuevo el sistema trabajando bajo las simulaciones. Este proceso tardó poco más de una semana ya que si había alguna falla había que dejar el sistema tal como estaba antes. Afortunadamente no hubo mayores problemas y el arranque del sistema se llevó sin contratiempos.

La línea tuvo un arranque como era previsto en modo manual durante las primeras coladas y el seguimiento de las mismas por los simuladores, una vez realizadas algunas de ellas, se cargaron los datos y comenzó el primer proceso en modo automático en el Horno de Fusión 1. Esta colada fue completamente exitosa, y una vez corroboradas un par de coladas más, se continuó con el Horno de Fusión dos también exitoso.

Habiendo verificado el funcionamiento de ambos sistemas, las fusiones se realizaron en modo manual para poder llevar a cabo un programa de capacitación y puesta en marcha en manos del personal de planta y operación.

2.11 Capacitación y puesta en marcha

Una vez concluidas en su mayoría las pruebas y verificado el funcionamiento correcto del sistema, fue necesario capacitar a todo el personal involucrado en el proceso.

Para esto, se recopiló toda la información pertinente y se crearon manuales de usuario. Se impartieron diferentes cursos dependiendo del cargo y responsabilidad en la planta. Además de la documentación completa, se hicieron tutoriales y manuales de transferencia de conocimientos, previendo el momento crítico en que en la empresa no haya alguna persona que pueda impartir alguna capacitación o incluso que no haya quien pueda continuar desarrollos posteriores.

A los operadores se les impartieron cursos referentes al uso del sistema automático y el símil con el sistema manual que ya conocían. Se les mostró las posibilidades que tienen a su alcance para poder operar, y posibles situaciones de emergencia.

Al equipo de piso, se le informaron las acciones que a partir de la implementación serán llevadas a cabo por el sistema automático y las precauciones que se deben tener al existir un control por parte del sistema.

A gerentes y supervisores se les impartieron los anteriores cursos incluso con mayor detalle, y además se les impartió una capacitación en la cual se les mostraron las acciones a tomar cuando haya necesidad de hacer modificaciones en las constantes y variables del proceso, además de algunas funciones. Como se mencionó anteriormente, existe la posibilidad de realizar cambios "en vivo", es decir con la línea funcionando; aunque esto no es recomendable debido a cuestiones de seguridad y posibles fallos que, aún siendo momentáneos, podrían tener consecuencias mayores.

Además de todas estas capacitaciones, se llevó a cabo una serie de juntas con el área de seguridad industrial, para que ellos tomaran cartas en el asunto e identificaran los posibles riesgos durante la operación del sistema, y contar así con el apoyo durante la puesta en marcha.

Cuando se hubo capacitado al personal se comenzó la puesta en marcha, que no fue más que comenzar a utilizar el sistema constantemente y analizar los resultados.

2.12 Programación a nivel de campo

El proyecto de automatización del proceso de fusión fue de un gran tamaño, e incluyó atención de diferentes áreas de la planta y el equipo de automatización. Como se mencionó anteriormente, la automatización está dividida en diferentes niveles¹², y cada nivel tuvo su participación en el proyecto. Este reporte se enfoca en el nivel donde se centralizó el proyecto –nivel de control- ya que es el nivel donde comienza la distribución del control, que atiende a las interfaces y HMIs, además de tener toda la información del proceso, quedando disponible para proveerla al nivel de gestión; pero aun así es conveniente mencionar de manera breve el desarrollo realizado en otros niveles de automatización para poder comprender de manera más amplia al proyecto mismo.

En el nivel de campo se llevó a cabo una programación a nivel de PLC en la que cada elemento involucrado en la fusión tiene una interacción directa con el servidor OPEN VMS y en caso de ser necesario (para paradas de emergencia por ejemplo) con las interfaces y botoneras correspondientes. Esta interacción consiste en un código de instrucciones para realizar tal o cual acción o serie de ellas. Una vez interpretada una instrucción, el PLC hará la secuencia necesaria para efectuar algún movimiento o ajuste.

La entrada de datos e instrucciones a los PLCs se lleva a cabo mediante comunicación TCP/IP, de modo que al efectuarse alguna acción, ésta es escrita en el banco de registro por el elemento correspondiente.

La lectura de datos también se efectúa por el mismo medio, consultando los registros de los PLCs y tomando los datos para poder dejarlos disponibles en la memoria compartida en el nivel de control superior.

De esta manera, la comunicación entre niveles se reduce a colocar, leer y modificar registros de memoria en el PLC y la programación los interpretará de una manera sencilla.

Además de la programación de estos elementos, fue necesario agregar algunos campos en las HMIs, para poder contar con pantallas

¹² Véase Figura 2.1 Niveles y fronteras

completas y preparadas para esta actualización. Las principales modificaciones fueron los cambios entre manual y automático, y la adición de algunos campos para recibir los datos iniciales. El modo manual quedó de manera idéntica.

2.13 Programación a nivel de gestión

En el nivel de gestión se necesitaron algunos cambios para poder acoplarse al proyecto. Entre los más importantes podemos mencionar el resguardo de los datos obtenidos con los modelos matemáticos en las bases de datos. Además de estos datos, se generaron nuevas herramientas de consulta para conocer la evolución de cada proceso de fusión en tiempo real con todo tipo de detalle.

Una de estas herramientas es la gráfica de desarrollo de la colada, en la que se muestran:

- Toneladas de carga metálica
- El porcentaje de carga fundida objetivo
- El porcentaje de carga fundida real (calculado)
- El consumo de energía en KWH

Hubo bastantes mejoras en otros sistemas de gestión para consulta web principalmente, en los que se modernizaron aplicaciones y se actualizaron reportes de planta y consultas en línea de muchos datos de los hornos que son vitales para poder tomar decisiones en el área industrial.

2.14 Resultados del proyecto

A partir de la implementación de este proyecto hubo un seguimiento de resultados posterior. Hubo bastantes mejoras en cuanto a la calidad y desarrollo de cada fusión.

Entre estas mejoras destacan la homogenización de calidad de acero, ya que para cubrir algún lote pueden necesitarse –las más de las veces- muchas fusiones y que no salen precisamente del mismo horno. Al

tener un proceso más definido y constante pueden declararse objetivos más sólidos, y conociendo los modelos que lo definen se pueden seguir de manera cabal, ya que el sistema advertirá cualquier situación y tomará acciones de manera más veloz que un operador.

Otra mejora importante también viene dada de la velocidad de respuesta del sistema. Se mejoraron los tiempos de fusión en un minuto promedio por cada horno; tal vez pueda parecer poco significativo, pero analizándolo más a fondo podemos descubrir mejor el impacto que se tiene con esta mejoría.

Horno 1	Horno 2
60 Min de duración promedio	45 Min de Duración Promedio
Se mejora a 59 Min Promedio	Se mejora a 44 Min promedio
Anteriormente 8160 Fusiones/año	Anteriormente 10880 Fusiones/año
Se mejoró a 8298 Fusiones/año	Se mejoró a 11127 Fusiones/año
150 Ton por Fusión	180 Ton por Fusión
La capacidad anual aumentó en 20700 Ton	La capacidad anual aumentó en 44460 Ton

Considerando que el ciclo anual de trabajo de ambos hornos es aproximadamente 340 días al año, podemos ver que la capacidad de producción aumenta de una manera más que considerable, llegando en suma a aproximadamente 65160 Ton/año.

Si el resto de la línea es capaz de llevar el ritmo de producción de los hornos EAF, se puede generar producción por cerca de 52.128 MDD considerando un precio de venta de \$800 DLL/ton para el acero rolado en caliente ¹³. Esta producción no es precisamente ganancia, pero considerando un precio de producción aproximado de \$500 DLL/ton¹⁴ se deduce una ganancia promedio de 20 MDD.

¹³ Considerando el precio promedio publicado para 2011 http://www.steelonthenet.com/price_info.html

¹⁴ Se consideró un precio aproximado a partir de los insumos necesarios, cotizando los precios de chatarra, mineral de hierro (aunque éste no es comprado sino extraído en minas propiedad de la empresa), energía y otros. Las consultas son

Chatarra: <http://scrapmetalpricesandauctions.com/iron-steel/scrap-iron-hms-prices-chicago/>

Kwh: http://seip.guanajuato.gob.mx/observa/index.php?option=com_content&view=article&id=113:costo-unitario-de-la-energia-electrica&catid=59:mercados-de-factores-de-produccion-eficientes&Itemid=56

Mineral de hierro <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=iron-ore>

Costos de producción en línea fueron proveídos para análisis pero no son mostrados debido a que están protegidos por Leyes de Secreto Industrial.

Actualmente el sistema tiene una utilización del 98% por lo que lo considero un proyecto exitoso que se concluyó, y está vigente, seguramente seguirá por muchos años. Incluso se tiene planeado una estandarización de este sistema para las demás plantas que cuentan con un horno de este tipo.

2. COLADA AUTOMÁTICA

2. COLADA AUTOMÁTICA

2.1 Descripción de la línea

La producción de AM2 consiste en la creación de rollos de lámina de acero a partir de las principales materias primas:

- Acero reciclado (chatarra).
- Hierro.
- Manganeso.
- Oxígeno.
- Cal siderúrgica.
- Cal dolomítica.

Para lograr esto, el producto tiene que pasar por las diferentes secciones de la línea, descritas brevemente a continuación:

- Patios de chatarra: Aquí se recibe y clasifica el acero reciclado adquirido y se preparan las cargas para su fusión.
- Reactores de reducción directa: En ellos se lleva a cabo la eliminación de elementos no convenientes para la reducción del hierro.
- Hornos de arco eléctrico: Se lleva a cabo la primera fusión a partir de cargas de chatarra y la adición continua de mineral de hierro proveniente de los reactores de reducción directa.
- Hornos de aceración secundarios: En ellos se lleva a cabo la aceración y se afina la calidad del metal.
- Vaciado continuo: Mediante un vaciado y enfriamiento constante se produce una tira uniforme, que a la salida es cortada en planchones.
- Horno túnel: Permite homogenizar y conservar la temperatura en los planchones. Al final de túnel, permite que el acero sea laminado con una temperatura constante.
- Laminador tándem: En este dispositivo, el planchón proveniente del horno túnel es laminado en varios rodillos, haciendo pasar el acero uno tras otro con un calibre cada vez más delgado.

Este proyecto se centra en la automatización del proceso de fusión en los hornos de arco eléctrico.

2.2 Planteamiento de los objetivos del proyecto

Al inicio del proyecto, el proceso de fusión mediante los hornos de arco eléctrico estaba medianamente automatizado. El proceso cuenta con etapas bien definidas, pero el sistema automático no era capaz de llevarlas a cabo de una manera coordinada, y se necesitaba la forzosa intervención de un operador que verificara el desarrollo y desempeño de los hornos.

Al ser un operario quien controlara el proceso, la calidad y tiempo nunca eran constantes, debiendo guiarse por programas de producción impresos, y hacer verificaciones de velocidades, temperaturas y consumos de energía, entre otros.

Al hacer un análisis de los elementos a controlar, se encontró que eran varios, principalmente:

- El peso de la carga metálica.
- La velocidad de alimentación del hierro.
- La inyección de Carbono y Oxígeno.
- El porcentaje de carga fundida.
- La temperatura del baño de acero.
- El consumo de energía de los electrodos.
- Los cambios en los niveles de potencia de los electrodos.
- La adición de cales.
- Los niveles de elementos como azufre, manganeso y otros no tan importantes en la aleación.

Todas las variables a controlar cuentan ya con un sistema local de control, que recibe instrucciones para llevar a cabo acciones definidas, algunos más complejos que otros.

El problema de la automatización de la fusión en los hornos de arco eléctrico entonces nos lleva a crear un control distribuido, en el cual se plantee un objetivo principal a controlar, y se tomen decisiones parciales independientes para conseguir dicho objetivo, sabiendo el efecto que tendrán.

2.3 Recursos previos

En la planta existen dos hornos de fusión por arco eléctrico. Uno Marca Danielli con una capacidad de hasta 200 toneladas por fusión y uno marca Fuchs con una capacidad de hasta 170 toneladas.

Como se mencionó anteriormente, la planta contaba con sistemas de automatización parciales. El más importante es un sistema de monitoreo basado en OPEN VMS⁴ en el que se guarda la información (adquirida en tiempo real desde los PLCs) de variables y constantes que rigen a cada horno. Este sistema sirve como fuente de información tanto para las pantallas y elementos que sirven de interfaz visual para los operadores, como para los sistemas de automatización de nivel más bajo, pudiendo así acceder a las tablas y tomar decisiones y acciones en ambos sentidos.

Además del sistema OPEN VMS, existe todo un sistema de automatización local para efectuar las acciones necesarias sobre cada elemento. Un equipo trabajó de manera paralela a este proyecto para realizar la programación de los dispositivos, en su mayoría PLCs ALLEN BRADLEY⁵.

Las interfaces hombre-máquina también tuvieron algunas modificaciones.

La infraestructura de comunicación es una red TCP/IP a la que se conectan los equipos de automatización que en resumen se trata de tres tipos esenciales:

- PLCs y dispositivos de automatización local.
- Equipos OPENVMS que fungen como servidores de información (y a partir de este proyecto, como servidores del sistema de control).
- Equipos HMI realizados a partir del software WONDERWARE⁶.

La infraestructura cuenta con un sistema CISCO, encargado del área de redes, quien se encargará del direccionamiento de los puertos. Por lo que el desarrollo del proyecto se encuentra protegido por todas las áreas correspondientes, y todos los equipos trabajarán de manera conjunta.

⁴ Sistema operativo basado en un entorno multiusuario, multiproceso y de memoria virtual compartida.

<http://h71000.www7.hp.com/>

⁵ Equipos y software de automatización propiedad de Rockwell Automation.

<http://ab.rockwellautomation.com/>

⁶ Sistemas de software para automatización y SCADA propiedad de Invensys.

<http://global.wonderware.com/EN/Pages/default.aspx>

Se puede definir un esquema para ilustrar la jerarquización de los elementos involucrados en la automatización para poder comprender los niveles en los que actúa cada uno, y el límite de responsabilidad de cada uno. Este esquema se muestra en la Figura 2.1.

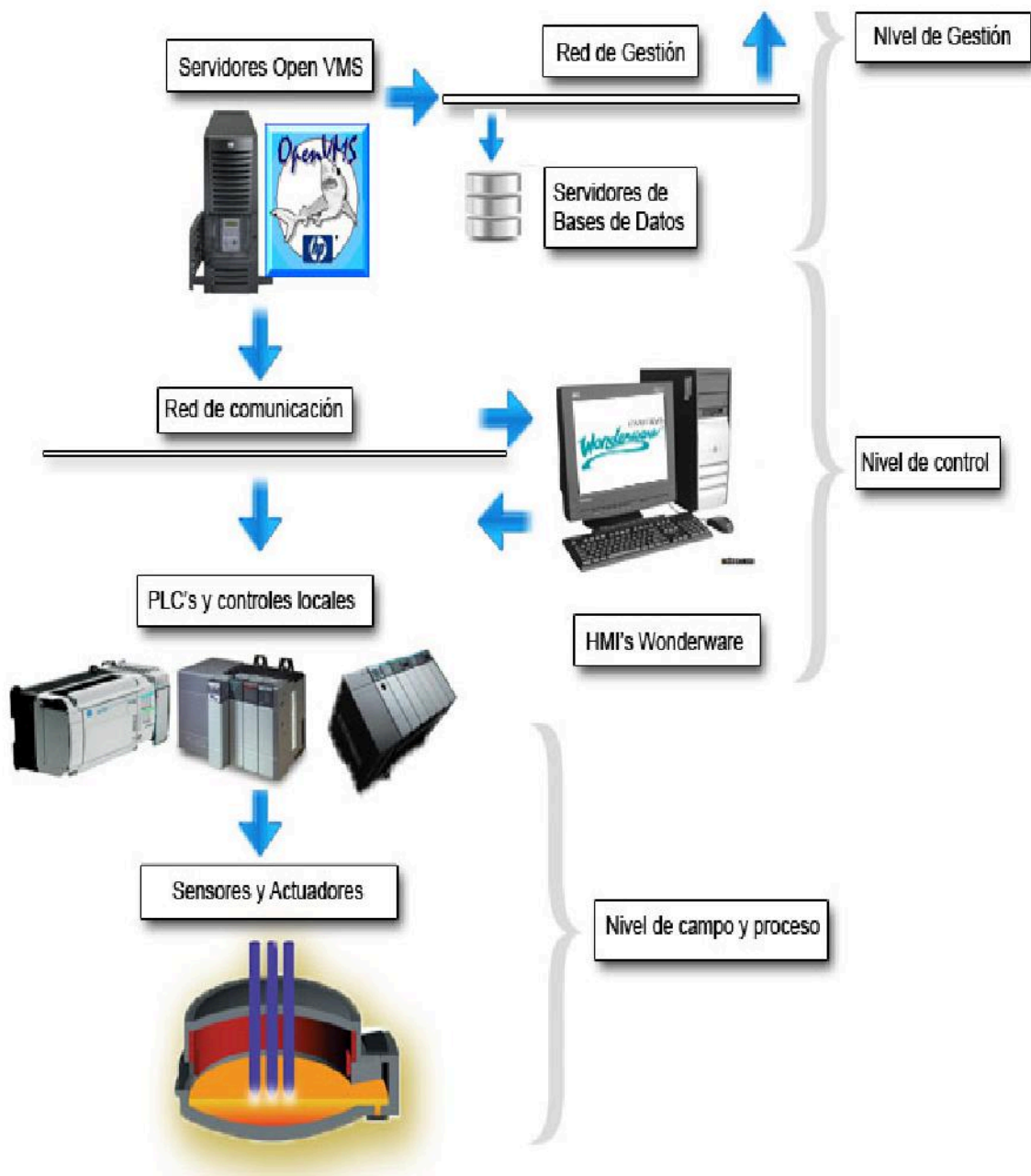


Figura 2.1 Niveles y fronteras

2.4 Definición y límites de la solución

Entre las características buscadas del nuevo sistema que dará solución a la automatización de los hornos están las siguientes:

- Debe tomar valores de las tablas de datos existentes en Open VMS. Esto será el equivalente a la adquisición de datos, la cual es llevada a cabo por los elementos de nivel inferior.
- Debe poder modificar tablas en Open VMS, lo cual será entendido como instrucciones para los elementos de nivel inferior.
- El sistema debe trabajar en tiempo real o de la manera más veloz posible.
- El sistema debe ser muy fácil de usar para los operadores.
- El sistema debe tener la posibilidad de modificación sin necesidad de contratar terceros.
- De ser posible, realizar el desarrollo con recursos propios y sin contratar terceros.
- El sistema debe dejar datos disponibles para su lectura por los sistemas de gestión y bases de datos.
- Con los antecedentes mencionados, la solución es crear un sistema de control que distribuya instrucciones a los elementos encargados de la automatización local. Una de las opciones planteadas es instalar un DCS, lo cual representa una gran inversión en una nueva infraestructura que sería acoplada al sistema existente, la cual debe incluir comunicación, equipos y una nueva programación.

Dadas las características de Open VMS, es posible crear aplicaciones nuevas dentro de los servidores, que utilicen el sistema de memoria compartida. Las aplicaciones se ejecutarían en tiempo real de manera paralela a las de adquisición de datos dentro de los servidores y no necesitarían una nueva infraestructura física (equipos, comunicación, refrigeración, entre otros).

Uno de los lenguajes de programación disponibles para la creación de aplicaciones en los servidores OPEN VMS es C, por lo que será relativamente fácil realizar la implementación de dichas aplicaciones.

Un detalle a tomar en cuenta es que cuando se instalaron las aplicaciones existentes, el diseño de una de ellas incluía un programa de relevamiento que funciona de la siguiente manera: Se pueden realizar modificaciones a los códigos fuente en C (con un historial de versiones nativo por el sistema) y realizar la compilación, una vez listo el nuevo set de instrucciones se releva el programa haciéndolo transparente para el proceso. Si existe un error en tiempo de ejecución, automáticamente el relevamiento regresa a la versión anterior. Este sistema de relevamiento nos ayudará en caso de necesitar nuevas modificaciones a futuro, para las cuales no se requiere más que modificar y relevar.

La velocidad no está comprometida ya que los servidores aún se encuentran con capacidad de memoria y uso de procesador libres. Incluso, los servidores disponen de espacio suficiente para escalarlos en niveles de memoria, procesadores, dispositivos de red y almacenamiento.

Al coexistir con las aplicaciones existentes el acceso desde y hacia bases de datos de niveles de gestión será transparente, simplemente modificando las instrucciones de lectura y almacenamiento.

Las modificaciones a las HMIs deberán incluir un cambio entre modo manual y modo automático, el ingreso de datos extras que sean necesarios para el modo automático. Estas modificaciones son mínimas, por lo que el uso debe ser sencillo para los operadores, teniendo que enfrentarse a cambios mínimos.

A partir de todas estas premisas se elige que el sistema de control residente en los servidores OPEN VMS es la opción más adecuada para llevar a cabo el proyecto. Cumple con los requerimientos más importantes y la inversión es muy baja, al no requerir infraestructura en hardware ni adquisición de licencias de software.

2.5 Elección de variables a controlar

Dentro del proceso de fusión existen diferentes variables para controlar, algunas ya son monitoreadas y actuadas de manera automática para su correcto funcionamiento. Algunas de ellas son:

- El voltaje en los electrodos de los hornos.
- El consumo de corriente de los hornos y, por tanto, la potencia.
- La cantidad de acero que hay en el horno.
- El porcentaje de acero líquido en el horno.
- La velocidad de alimentación de fierro esponja.
- La temperatura final del baño de acero.
- El control de inyección de carbono y oxígeno y demás agregados.
- Carga inicial de chatarra y Hot Heel⁷

De estas variables, las que influyen directamente en el desarrollo de la fusión son las que están involucradas con la energía, y la alimentación de acero.

La temperatura sólo se puede calcular mediante modelos matemáticos a partir de las variables de inicio, ya que la única medición de ésta se hace casi al final de la fusión, dejando tiempo suficiente para hacer el ajuste aumentando la potencia. La toma de temperatura no se puede hacer vía láser ya que esto tomaría la temperatura de la escoria resultante, y no es la misma que la del baño de acero, por lo que no podemos fiarnos de la temperatura ni esperar controlarla por completo, sino observarla y tratar de acercarnos a un objetivo.

El control de la electricidad necesaria para fundir el acero parece una variable más coherente, sin embargo resulta más complejo de lo que parece. El control de la energía depende directamente de la resistencia que oponga la carga metálica al ser fundida, y ésta obviamente no es constante ni siquiera cuando se deja de alimentar hierro, es decir con un tonelaje constante, debido a que la resistencia del acero cambia con la temperatura.

Actualmente existe una aplicación en el nivel de control por PLC que hace un control de la potencia entregada al acero. Este programa de potencia se ajusta al método tradicional de utilizar niveles de potencia para fundir el acero (bajo, medio, alto y ultra alto) por lo que no es conveniente realizar modificaciones en dicho programa. Al contrario, al

⁷ Remanente de acero líquido que queda al vaciar la fusión anterior. Cuando es la primera fusión después de una reparación o un paro, este remanente no existe.

estar ajustado y trabajando de manera perfecta para cualquier tipo y peso de coladas hasta ese momento realizadas en los hornos, es más factible utilizar los alcances del mismo para automatizar todo el proceso.

Sin embargo, hay una variable muy fácil de controlar y que tiene un impacto directo sobre cada una de las demás variables, los efectos son predecibles mediante modelos matemáticos. Dicha variable es la velocidad de alimentación del mineral de hierro; estos modelos están realizados y probados, son los que se usan para el trabajo mediante control manual.

Al aumentar o disminuir la velocidad de alimentación se modifican directamente las variables sobre las que no existe un control, como son el delta de carga metálica medido en toneladas, la temperatura del baño o incluso queda ligada a otra variable importante: la velocidad de descenso de los electrodos dentro del baño de acero. Es muy importante tener un control sobre esto ya que al introducir demasiado rápido los electrodos, nos encontraremos con metal no fundido y es posible una ruptura de los mismos. Si la inmersión es muy lenta, el arco no será eficiente y tendremos una pérdida muy importante de energía. Incluso, hay que evitar un sobrecalentamiento de los electrodos para aumentar su vida útil, y la manera más práctica de hacerlo es agregando hierro para enfriar el baño.

Bajo estos supuestos, al parecer controlar la velocidad de alimentación del hierro es la manera óptima de implementar un control al proceso de fusión. Ya que no necesita afectar a programas de control existentes, y la única variable a controlar de manera directa es la velocidad con que una banda proveniente de los reactores de reducción directa alimenta el hierro.

Sin embargo, dada la complejidad del proceso, es necesario programar el modelo matemático que simule por completo el proceso para, con base en esto, poder determinar objetivos a alcanzar durante el desarrollo, y tener comparativas y datos que pueden servir para posibles mejoras y modificaciones.

2.6 Análisis del proceso

Una vez definida la variable a controlar, se genera la necesidad de tener un modelo a seguir, para saber cómo será el desarrollo del proyecto. El modo manual que se lleva hasta antes de la automatización consiste en una metodología como se describe a continuación:

- Realizar una carga de chatarra en el horno (puede quedar un remanente líquido y esta carga de chatarra puede no existir).
- Se declaran 5 objetivos en toneladas de carga metálica y porcentaje de carga fundida. Es decir, además de la chatarra agregada, constantemente se alimentará mineral de hierro.
- Con ayuda de una hoja de cálculo se estima el consumo de energía para poder fundir el acero que se ha marcado como objetivo.
- Estos datos son suministrados al “programa de potencia”, el cual se encarga de controlar la energía suministrada al baño de acero.
- Al llegar a cada objetivo, se mide el peso y se verifica la energía consumida, con esto se estima si se logró fundir (en porcentaje) la cantidad deseada de metal.
- Se repite hasta llegar al quinto objetivo.
- El programa de potencia decide el nivel de potencia durante el tiempo de cada objetivo.
- A partir del quinto objetivo, se mantiene una velocidad constante de alimentación, de manera que el material agregado absorba la energía brindada por los electrodos de manera casi completa. Con esto se estabiliza el porcentaje de carga fundida y de manera más importante, la temperatura del baño de acero. Durante este intervalo se agregan aproximadamente 8 toneladas de acero.
- Finalmente, una vez que se conoce la temperatura del baño de acero^B se agregará el material necesario para completar el objetivo final en peso de acero. Al mismo tiempo, el “Programa de potencia” modificará su perfil de suministro, para lograr una correcta temperatura final del baño. A esta etapa se le conoce como etapa de ajuste.

^B La temperatura se mide mediante una prueba destructiva, en la que se introduce un termopar al baño de acero. Este informará la temperatura casi de manera instantánea pero se fundirá con el resto del baño.

- Al terminar de agregar todo el material necesario, se toma una muestra del baño, la cual será mandada a laboratorios para evaluar características químicas y calidad. El horno será vaciado parcialmente apartando la escoria del acero líquido.

El equipo de trabajo, el área de diseño de procesos y la directiva encargada de la Acería convienen que emular esta metodología es la mejor manera de lograr la automatización del proceso de fusión. Diseño de procesos nos hace ver que los modelos matemáticos para llevar a cabo el método han sido probados y son óptimos y eficientes, por lo que no hay necesidad de mejorarlos.

Con base en un lapso durante el cual se montaron guardias, para vigilar el proceso, se definieron bloques principales de acción, basados en la anterior metodología; todo esto para poder definir un diagrama de flujo que contemple todas las posibilidades a tener en cuenta en la programación y evitar problemas en caso de imprevistos.

El diagrama de flujo de acciones principales de control constará de lo siguiente y es ilustrado para un mejor entendimiento en la figura 2.2.

- En el módulo de inicialización se cargan las variables necesarias para que pueda iniciar el proceso, así como las constantes que completan el modelo matemático que define al proceso. Se deben verificar las comunicaciones, y que los elementos de nivel de control más bajo estén listos para operar. En teoría es en este momento cuando se deberían cargar los datos provenientes del púlpito de control en los que se indican los objetivos de carga metálica, las cargas iniciales de chatarra y los pesos del remanente líquido
- El módulo de lectura de datos prepara la memoria compartida para que pueda ser leída por los modelos matemáticos, los dispositivos de control, y los procesos encargados de ponerlos en las bases de datos para que estén disponibles en el nivel de gestión y para su publicación en los sitios web de operación para consulta instantánea.

- El módulo del balance de materia pretende ser el primer modelo matemático que define el proceso. Debe encargarse de calcular el material que hay dentro del horno y deducir las relaciones de componentes químicos. Principalmente debe lograr los siguientes cálculos:

- Total de material en el horno.
- Los componentes del material de hierro agregado.
- La cantidad de escoria en el horno.
- La cantidad de óxido ferroso en la escoria.
- El peso del acero (sin escoria)
- El balance químico de óxido ferroso y carbón. (Aquí se debe calcular la cantidad agregada durante el proceso, cuánto se ha fundido, cuánto está en la escoria, cuánto ha reaccionado de cada uno).
- El volumen de gases.
- La cantidad de gases generados por unidad de tiempo.
- El gasto o flujo de gases liberados por los ductos de escape.

- El módulo de balance de energía debe ser el segundo modelo matemático que defina al proceso y estaría encargado de calcular la distribución de energía suministrada al sistema. Los principales cálculos que debe realizar este modelo son:

- La energía correspondiente al remanente líquido, cuánta de ella está disponible para ser transferida al resto del sistema.
- La energía que hay en la escoria al inicio del proceso de fusión.

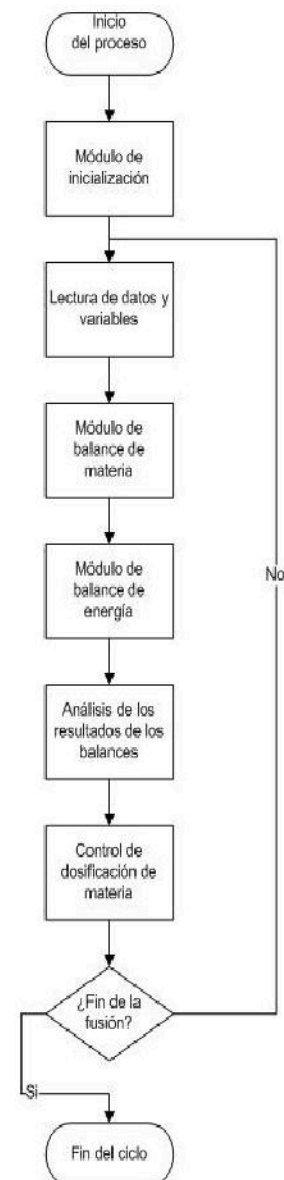


Figura 2.2

- La energía que ha sido suministrada a la chatarra de la primera carga⁹.
 - La energía que absorbe el mineral de hierro agregado por unidad de tiempo.
 - La energía resultante (expelida o absorbida) por las reacciones químicas dentro del horno.
 - La energía suministrada por los quemadores de apoyo.
 - Las pérdidas energéticas en el horno.
 - La energía específica del acero fundido.
 - La energía de fusión.
 - El porcentaje de material fundido.
 - La energía en los gases de salida.
- El módulo de análisis de resultados realizará una validación de los resultados obtenidos por los demás módulos para verificar su validez, y no intentar lograr un objetivo fuera del alcance del sistema.
 - El módulo de dosificación de materia será el encargado de leer los resultados de los modelos matemáticos y decidir la velocidad de alimentación del mineral de hierro para poder cumplir los objetivos de carga metálica, porcentaje de carga fundida y temperatura final.

Estos módulos fueron tentativos en el momento que se definieron ya que necesitan adecuarse durante la etapa de programación e incluso estando operativos necesitarán mejoras constantes. A partir de este momento comienza la primera etapa de implementación y programación en sitio.

2.7 Modelo objetivo

Estos modelos matemáticos tienen como entrada datos reales, definen cómo se debe comportar el proceso a partir de todos ellos, y de la información suministrada inicialmente. Por tanto pretende ser la guía que vaya marcando el paso del proceso durante el desarrollo de cada

⁹ Antes de ser agregada al horno, la chatarra es expuesta a los gases de salida de la colada anterior, con lo que recupera energía en forma de calor.

objetivo; para esto se valdrá de una serie de valores ideales contra los cuales comparar sus resultados, verificando así que los objetivos no estén lejos de aquellos completamente teóricos. Este modelo, también tomará los valores del inicio de la colada y cargará “perfiles de fusión” ideales y bien definidos, con los que hará los cálculos; estos perfiles de fusión contienen los datos que los otros modelos toman como reales.

En resumen, el modelo objetivo realiza los siguientes cálculos y funciones:

- Toma los valores de inicio y los carga en memoria para tenerlos disponibles.
- Calcula la carga fundida al inicio de la colada y la energía necesaria para completar el objetivo pretendido.
- Define cómo debería comportarse el sistema al agregar una carga de chatarra (puede que no exista la primera) dependiendo del objetivo de carga fundida y toneladas de carga metálica.
- Calcula la energía y cantidad de hierro para cumplir el objetivo, y simula el suministro de ambos por un corto espacio de tiempo.
- Con la simulación anterior, define un estado nuevo en el horno. Y revisa si existe alguna demora o imprevisto en el proceso real para modificar los resultados.
- Realiza una comparación entre el proceso real y el proceso simulado, y verifica posibles errores. También crea indicadores con base en las diferencias.
- Guarda las diferencias acumuladas entre los errores de las comparaciones para saber cuál fue la desviación al final del proceso.
- Deja los indicadores disponibles para que el control de materia se encargue de tomar las decisiones y perseguir el objetivo.

La explicación detallada de dicho modelo va más allá del alcance de este reporte, ya que fueron hechos por el área de diseño de procesos metalúrgicos y no corresponde al área de automatización más que convertirlos en un código que realiza los cálculos.

2.8 Modelos de control

Una vez teniendo los modelos y valores que definen al proceso en cuestión energética y de materia además del modelo y valores que definen al proceso de una manera ideal, tenemos una base de comparación para discernir el cumplimiento de los objetivos.

Estas diferencias de error podemos suministrarlas a un nuevo modelo matemático para que decida las acciones de control, que se reducen principalmente a la alimentación del mineral de hierro a mayor o menor velocidad. Obviamente existen más elementos a controlar, como son la adición de cal siderúrgica y dolomítica, la inyección de oxígeno y carbono, señales para el programa de potencia; sin embargo, es preferible mantener estas variables lo más constantes posible para poder tener un sistema más estable y apegado al proceso ideal.

El modelo de control tiene que ser seccionado en otros módulos para simplificar la programación de acuerdo a las etapas principales del proceso:

- Cargas de chatarra
- Inicio de la colada
- Estabilización de la colada
- Toma de temperatura
- Ajuste

El modelo, por lo tanto, debe adecuarse a cada una de estas etapas, en la programación se llevaron a cabo las siguientes instrucciones para lograrlo¹⁰:

- Al momento de las cargas, la velocidad es 0.
- Al comenzar la colada, se tendrá una etapa de velocidad inicial, con un valor mínimo: Para el Horno de Fusión 1 (Fuchs) entre 15 y 20 Kg/min/MW¹¹, mientras que para el Horno de Fusión 2 (Danieli) la velocidad es de 18 a 20 kg/min/MW.
- Al alcanzar un punto estable de carga metálica agregada (Fuchs en 25 toneladas y Danieli en 20) El sistema tomará una velocidad

¹⁰ Estas instrucciones se muestran en forma de pseudocódigo.

¹¹ Como podemos observar la velocidad depende directamente de la energía suministrada.

crucero mientras no haya imprevistos. Estas velocidades son 34 Kg/min/MW para Fuchs y 43 Kg/min/MW para Danieli.

- Antes de alcanzar el objetivo final de carga metálica, medido en toneladas (20 toneladas faltantes para Fuchs y 18 Toneladas faltantes para Danieli) se tomará la muestra de temperatura y la velocidad de alimentación del mineral del hierro se reducirá a 25 y 23 Kg/min/MW respectivamente para Fuchs y Danieli.
- Al recibir la toma de temperatura en el sistema, el control comenzará con la etapa de ajuste para aumentar o disminuir la temperatura final del baño de acero.

En la siguiente figura se muestra una gráfica en la que se compara el desarrollo de la fusión, dividida en etapas comparando las Toneladas de carga metálica contra el porcentaje de carga fundida

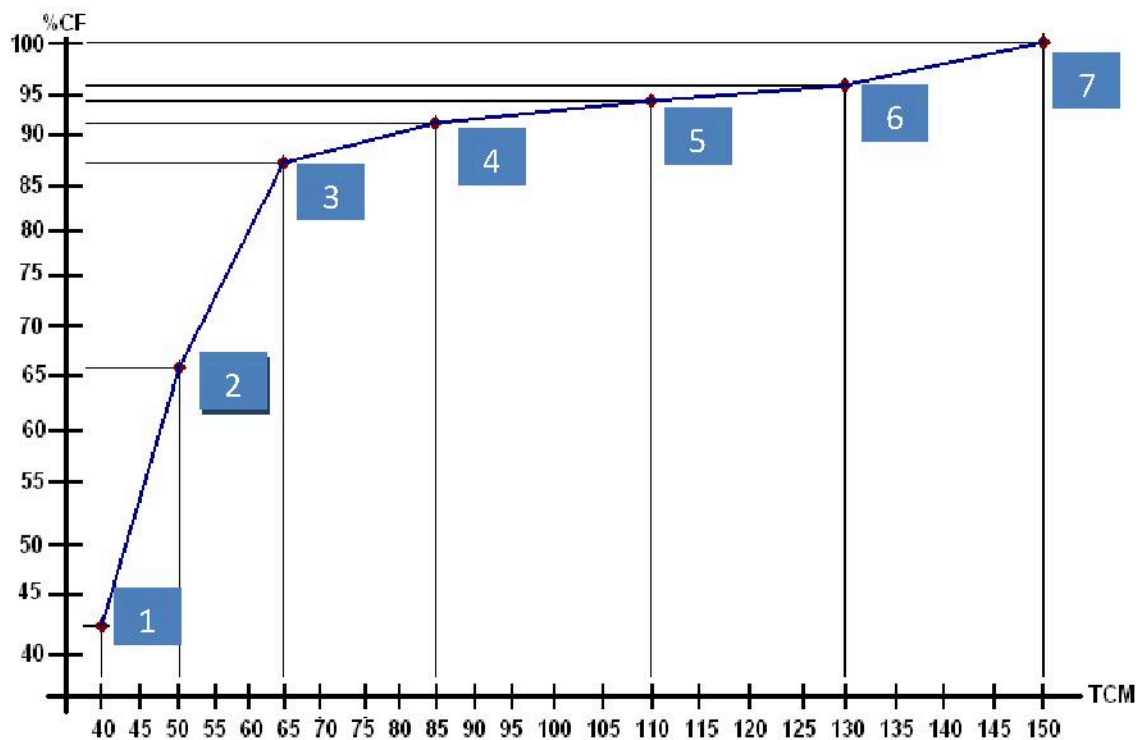


Figura 1.3 Perfil de Fusión "Toneladas de Carga Metálica VS % Carga Fundida"

1. Inicio del proceso de fusión: Para esta figura, las 40 toneladas de carga metálica corresponden a la carga de chatarra y el remanente líquido. De igual manera el 40% de carga fundida es debido a la existencia del acero en forma líquida y el acero de la chatarra aún sólida. A partir de este punto comienzan a actuar el programa de potencia y el control de dosificación de material, este último en un comienzo tendrá que actuar sabiendo que es el inicio del proceso, con una velocidad baja. Al alcanzar la cantidad de carga necesaria –diferente para cada horno- comenzará el control con velocidad crucero.
2. Se alcanza el primer objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida.
3. Se alcanza el segundo objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida.
4. Se alcanza el tercer objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida.
5. Se alcanza el cuarto objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida.
6. Se alcanza el quinto objetivo de carga metálica/porcentaje de carga fundida. Durante todos estos lapsos, el control de carga actúa siguiendo los objetivos dictados por el perfil simulado, el programa de potencia y los resultados arrojados a cada instante. Al alcanzar este último objetivo, se realiza la toma de temperatura. Después de ello comenzará el ajuste
7. Al llegar a este punto, se ha fundido todo el material que se ha agregado al horno, y el objetivo de carga metálica se ha alcanzado obteniendo una temperatura promedio, muy cercana a la necesaria para el siguiente proceso.

2.9 Módulo de pronóstico inicial

Este módulo se definió posteriormente, durante la etapa de programación, la necesidad de este módulo viene dada de un problema encontrado durante esta etapa: Cada que el modelo de simulación era calculado, tomaba en cuenta algunos datos a partir del punto anterior,

por lo que se modificaba constantemente. Entonces se optó por hacer un “pronóstico inicial” en el que se simulara todo el proceso de manera ideal desde un inicio. Con esto, el resto de los modelos matemáticos tenían un objetivo fijo a seguir.

2.10 Implementación y programación

Para poder implementar la programación, primero se definió el diagrama de flujo completo, con bloques que contenían sólo pseudo código. Este diagrama de flujo tuvo modificaciones constantes hasta tener un programa final idéntico al diagrama de flujo.

Dada la complejidad del proyecto, los modelos y el convertirlos en un programa en C, además del hecho de no contar con la posibilidad de detener la línea para poder realizar pruebas, se tuvo que identificar un modo para poder realizar el desarrollo de cada parte del proyecto sin tener tales afectaciones.

Para dar solución a este problema se instaló un Servidor OPEN VMS idéntico a los ya existentes. Este servidor fue programado de manera que leyera los datos de los servidores activos, uno por vez. De esta manera se tenía disponible la información en vivo sin afectar en absoluto a la línea de producción.

Con los datos disponibles y sin problemas se comenzó la programación, iniciando por el módulo que creaba la simulación del proceso, para poder tener un modelo a seguir por cada uno de los demás módulos. Este modelo fue probado en múltiples ocasiones con la finalidad de verificar la validez de los resultados arrojados. La gráfica más representativa de este modelo es aquella en la que se compara la energía suministrada y la alimentación del mineral de hierro.

En la siguiente figura se muestra dicha gráfica después de haber afinado el modelo, el cual fue seguido por los operadores para lograr una colada muy parecida al modelo ideal con base en las características iniciales de dicho proceso. En amarillo se muestra el progreso del proceso que fue realizado en modo manual, y en rosa punteado se muestra el objetivo propuesto por la simulación. Además, en azul se muestra el material dentro del horno.

Después de crear el modelo de pronóstico se crearon paralelamente los demás módulos de simulación, trabajando todos de manera independiente, enlazados simplemente por los valores que entregan y que son utilizados por los otros módulos para realizar lo necesario.

Una vez creados todos los modelos de simulación se creó el programa principal, que simplemente tiene un ciclo infinito que manda a llamar a cada uno de los demás módulos en el orden en que deben actuar, obviando el hecho de que el pronóstico es el primero en ejecutarse y lo hará sólo una vez por colada.

Hasta este punto se han definido los modelos simulados, hay que recalcar que esta implementación se llevó de manera paralela para cada uno de los hornos, teniendo así dos modelos diferentes e incompatibles entre ellos debido a las particularidades de cada uno, pero que de manera general tienen los mismos principios de funcionamiento.

PERFIL ACTUAL DE FUSION
COLADA: 26721

Ref. Val. ALCO: 0 kg/mm², Indicador de Perfil: 4.8

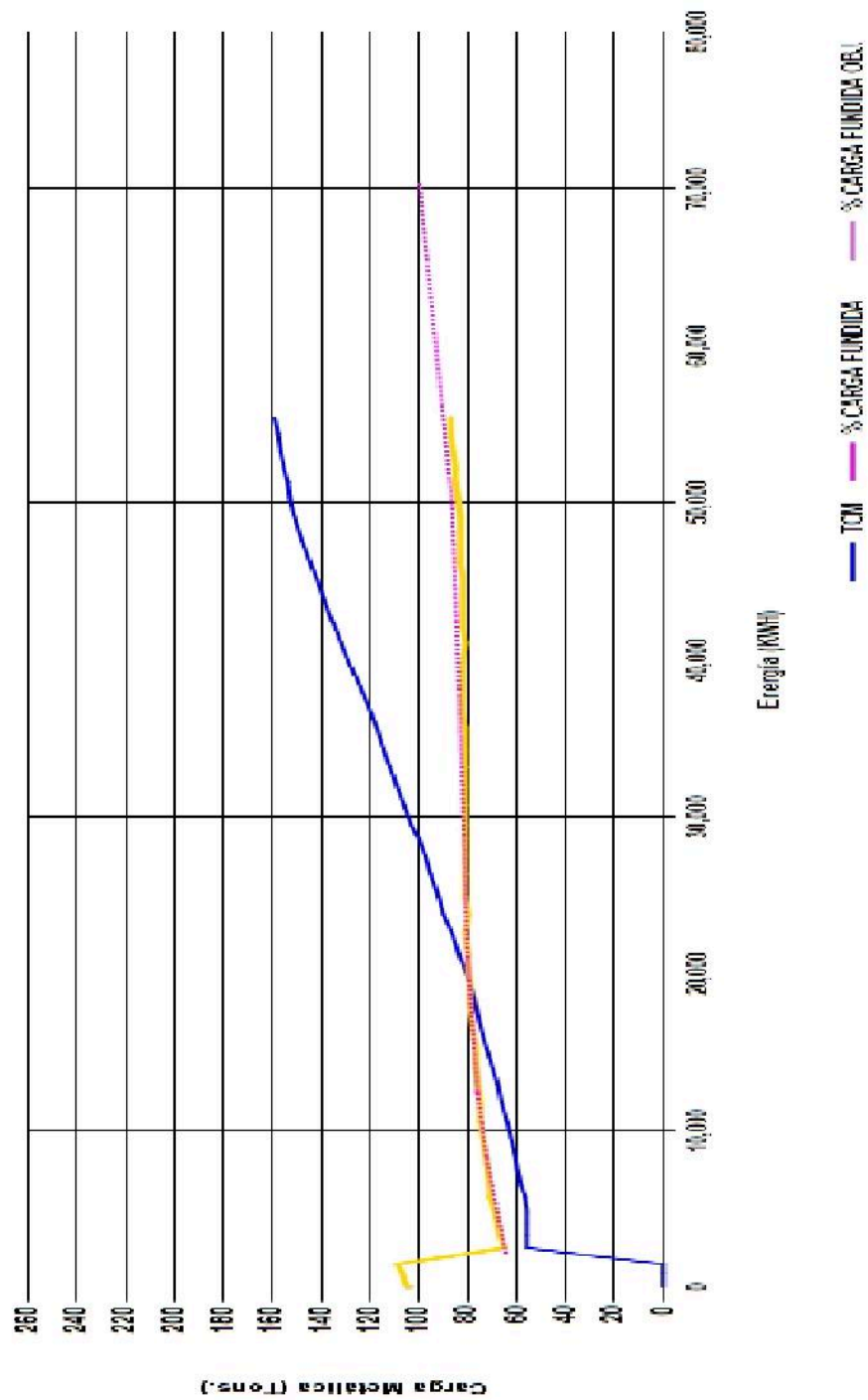


Figura 2.4 Evolución de una Fusión

Posteriormente, se montaron el programa principal y los módulos de simulación en el servidor OPEN VMS para comenzar a crear los objetivos constantemente. Esto sirve de apoyo para encontrar deficiencias o errores

en tiempo de ejecución. Mientras esto era probado, los modelos de control fueron programados de la misma manera, leyendo los datos de los servidores y guardando un set de instrucciones, el cual era corroborado de manera visual.

Se creó anticipadamente un programa de registro, el cual iba guardando cada uno de los “movimientos” de los programas, para poder llevar a cabo un seguimiento detallado y en todo momento. Este programa fue acoplado al sistema de registro ya existente. La anticipación de este módulo se dio por la necesidad de hacer un análisis posterior a los fallos en el sistema, que aun cuando pudieran ser importantes no serían lo suficientemente graves como para detener el proceso.

Una vez hechos y medianamente probados los algoritmos de control, se esperó a una reparación extraordinaria de toda la planta. Esto por el peligro que se corre al tratar de controlar cualquier elemento en funcionamiento. Al tener la línea detenida se desconectaron los equipos del nivel de control de PLC y se puso a trabajar un sistema de simulación para proveer los datos de una colada real (que se tenían previamente guardados). Al verificar que las instrucciones eran interpretadas de una manera transparente y sin problema alguno, se fueron conectando los equipos poco a poco hasta tener de nuevo el sistema trabajando bajo las simulaciones. Este proceso tardó poco más de una semana ya que si había alguna falla había que dejar el sistema tal como estaba antes. Afortunadamente no hubo mayores problemas y el arranque del sistema se llevó sin contratiempos.

La línea tuvo un arranque como era previsto en modo manual durante las primeras coladas y el seguimiento de las mismas por los simuladores, una vez realizadas algunas de ellas, se cargaron los datos y comenzó el primer proceso en modo automático en el Horno de Fusión 1. Esta colada fue completamente exitosa, y una vez corroboradas un par de coladas más, se continuó con el Horno de Fusión dos también exitoso.

Habiendo verificado el funcionamiento de ambos sistemas, las fusiones se realizaron en modo manual para poder llevar a cabo un programa de capacitación y puesta en marcha en manos del personal de planta y operación.

2.11 Capacitación y puesta en marcha

Una vez concluidas en su mayoría las pruebas y verificado el funcionamiento correcto del sistema, fue necesario capacitar a todo el personal involucrado en el proceso.

Para esto, se recopiló toda la información pertinente y se crearon manuales de usuario. Se impartieron diferentes cursos dependiendo del cargo y responsabilidad en la planta. Además de la documentación completa, se hicieron tutoriales y manuales de transferencia de conocimientos, previendo el momento crítico en que en la empresa no haya alguna persona que pueda impartir alguna capacitación o incluso que no haya quien pueda continuar desarrollos posteriores.

A los operadores se les impartieron cursos referentes al uso del sistema automático y el símil con el sistema manual que ya conocían. Se les mostró las posibilidades que tienen a su alcance para poder operar, y posibles situaciones de emergencia.

Al equipo de piso, se le informaron las acciones que a partir de la implementación serán llevadas a cabo por el sistema automático y las precauciones que se deben tener al existir un control por parte del sistema.

A gerentes y supervisores se les impartieron los anteriores cursos incluso con mayor detalle, y además se les impartió una capacitación en la cual se les mostraron las acciones a tomar cuando haya necesidad de hacer modificaciones en las constantes y variables del proceso, además de algunas funciones. Como se mencionó anteriormente, existe la posibilidad de realizar cambios "en vivo", es decir con la línea funcionando; aunque esto no es recomendable debido a cuestiones de seguridad y posibles fallos que, aún siendo momentáneos, podrían tener consecuencias mayores.

Además de todas estas capacitaciones, se llevó a cabo una serie de juntas con el área de seguridad industrial, para que ellos tomaran cartas en el asunto e identificaran los posibles riesgos durante la operación del sistema, y contar así con el apoyo durante la puesta en marcha.

Cuando se hubo capacitado al personal se comenzó la puesta en marcha, que no fue más que comenzar a utilizar el sistema constantemente y analizar los resultados.

2.12 Programación a nivel de campo

El proyecto de automatización del proceso de fusión fue de un gran tamaño, e incluyó atención de diferentes áreas de la planta y el equipo de automatización. Como se mencionó anteriormente, la automatización está dividida en diferentes niveles¹², y cada nivel tuvo su participación en el proyecto. Este reporte se enfoca en el nivel donde se centralizó el proyecto –nivel de control- ya que es el nivel donde comienza la distribución del control, que atiende a las interfaces y HMIs, además de tener toda la información del proceso, quedando disponible para proveerla al nivel de gestión; pero aun así es conveniente mencionar de manera breve el desarrollo realizado en otros niveles de automatización para poder comprender de manera más amplia al proyecto mismo.

En el nivel de campo se llevó a cabo una programación a nivel de PLC en la que cada elemento involucrado en la fusión tiene una interacción directa con el servidor OPEN VMS y en caso de ser necesario (para paradas de emergencia por ejemplo) con las interfaces y botoneras correspondientes. Esta interacción consiste en un código de instrucciones para realizar tal o cual acción o serie de ellas. Una vez interpretada una instrucción, el PLC hará la secuencia necesaria para efectuar algún movimiento o ajuste.

La entrada de datos e instrucciones a los PLCs se lleva a cabo mediante comunicación TCP/IP, de modo que al efectuarse alguna acción, ésta es escrita en el banco de registro por el elemento correspondiente.

La lectura de datos también se efectúa por el mismo medio, consultando los registros de los PLCs y tomando los datos para poder dejarlos disponibles en la memoria compartida en el nivel de control superior.

De esta manera, la comunicación entre niveles se reduce a colocar, leer y modificar registros de memoria en el PLC y la programación los interpretará de una manera sencilla.

Además de la programación de estos elementos, fue necesario agregar algunos campos en las HMIs, para poder contar con pantallas

¹² Véase Figura 2.1 Niveles y fronteras

completas y preparadas para esta actualización. Las principales modificaciones fueron los cambios entre manual y automático, y la adición de algunos campos para recibir los datos iniciales. El modo manual quedó de manera idéntica.

2.13 Programación a nivel de gestión

En el nivel de gestión se necesitaron algunos cambios para poder acoplarse al proyecto. Entre los más importantes podemos mencionar el resguardo de los datos obtenidos con los modelos matemáticos en las bases de datos. Además de estos datos, se generaron nuevas herramientas de consulta para conocer la evolución de cada proceso de fusión en tiempo real con todo tipo de detalle.

Una de estas herramientas es la gráfica de desarrollo de la colada, en la que se muestran:

- Toneladas de carga metálica
- El porcentaje de carga fundida objetivo
- El porcentaje de carga fundida real (calculado)
- El consumo de energía en KWH

Hubo bastantes mejoras en otros sistemas de gestión para consulta web principalmente, en los que se modernizaron aplicaciones y se actualizaron reportes de planta y consultas en línea de muchos datos de los hornos que son vitales para poder tomar decisiones en el área industrial.

2.14 Resultados del proyecto

A partir de la implementación de este proyecto hubo un seguimiento de resultados posterior. Hubo bastantes mejoras en cuanto a la calidad y desarrollo de cada fusión.

Entre estas mejoras destacan la homogenización de calidad de acero, ya que para cubrir algún lote pueden necesitarse –las más de las veces- muchas fusiones y que no salen precisamente del mismo horno. Al

tener un proceso más definido y constante pueden declararse objetivos más sólidos, y conociendo los modelos que lo definen se pueden seguir de manera cabal, ya que el sistema advertirá cualquier situación y tomará acciones de manera más veloz que un operador.

Otra mejora importante también viene dada de la velocidad de respuesta del sistema. Se mejoraron los tiempos de fusión en un minuto promedio por cada horno; tal vez pueda parecer poco significativo, pero analizándolo más a fondo podemos descubrir mejor el impacto que se tiene con esta mejoría.

Horno 1	Horno 2
60 Min de duración promedio	45 Min de Duración Promedio
Se mejora a 59 Min Promedio	Se mejora a 44 Min promedio
Anteriormente 8160 Fusiones/año	Anteriormente 10880 Fusiones/año
Se mejoró a 8298 Fusiones/año	Se mejoró a 11127 Fusiones/año
150 Ton por Fusión	180 Ton por Fusión
La capacidad anual aumentó en 20700 Ton	La capacidad anual aumentó en 44460 Ton

Considerando que el ciclo anual de trabajo de ambos hornos es aproximadamente 340 días al año, podemos ver que la capacidad de producción aumenta de una manera más que considerable, llegando en suma a aproximadamente 65160 Ton/año.

Si el resto de la línea es capaz de llevar el ritmo de producción de los hornos EAF, se puede generar producción por cerca de 52.128 MDD considerando un precio de venta de \$800 DLL/ton para el acero rolado en caliente ¹³. Esta producción no es precisamente ganancia, pero considerando un precio de producción aproximado de \$500 DLL/ton¹⁴ se deduce una ganancia promedio de 20 MDD.

¹³ Considerando el precio promedio publicado para 2011 http://www.steelonthenet.com/price_info.html

¹⁴ Se consideró un precio aproximado a partir de los insumos necesarios, cotizando los precios de chatarra, mineral de hierro (aunque éste no es comprado sino extraído en minas propiedad de la empresa), energía y otros. Las consultas son

Chatarra: <http://scrapmetalpricesandauctions.com/iron-steel/scrap-iron-hms-prices-chicago/>

Kwh: http://seip.guanajuato.gob.mx/observa/index.php?option=com_content&view=article&id=113:costo-unitario-de-la-energia-electrica&catid=59:mercados-de-factores-de-produccion-eficientes&Itemid=56

Mineral de hierro <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=iron-ore>

Costos de producción en línea fueron proveídos para análisis pero no son mostrados debido a que están protegidos por Leyes de Secreto Industrial.

Actualmente el sistema tiene una utilización del 98% por lo que lo considero un proyecto exitoso que se concluyó, y está vigente, seguramente seguirá por muchos años. Incluso se tiene planeado una estandarización de este sistema para las demás plantas que cuentan con un horno de este tipo.

3 MODELO DE COORDINACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

3.1 Descripción del proyecto

Este proyecto tiene como objetivo ser un sistema inteligente que pueda controlar la línea de producción a un ritmo óptimo. Por las características de la línea el ritmo óptimo no es precisamente el más rápido.

Cada sección de la línea tiene su capacidad de producción determinado por el tipo de proceso. Los hornos de fusión y los hornos de aceración secundaria están muy ligados debido a la naturaleza y tamaño de los mismos. Después de estos grandes dispositivos, se encuentra la zona de vaciado (Casting).

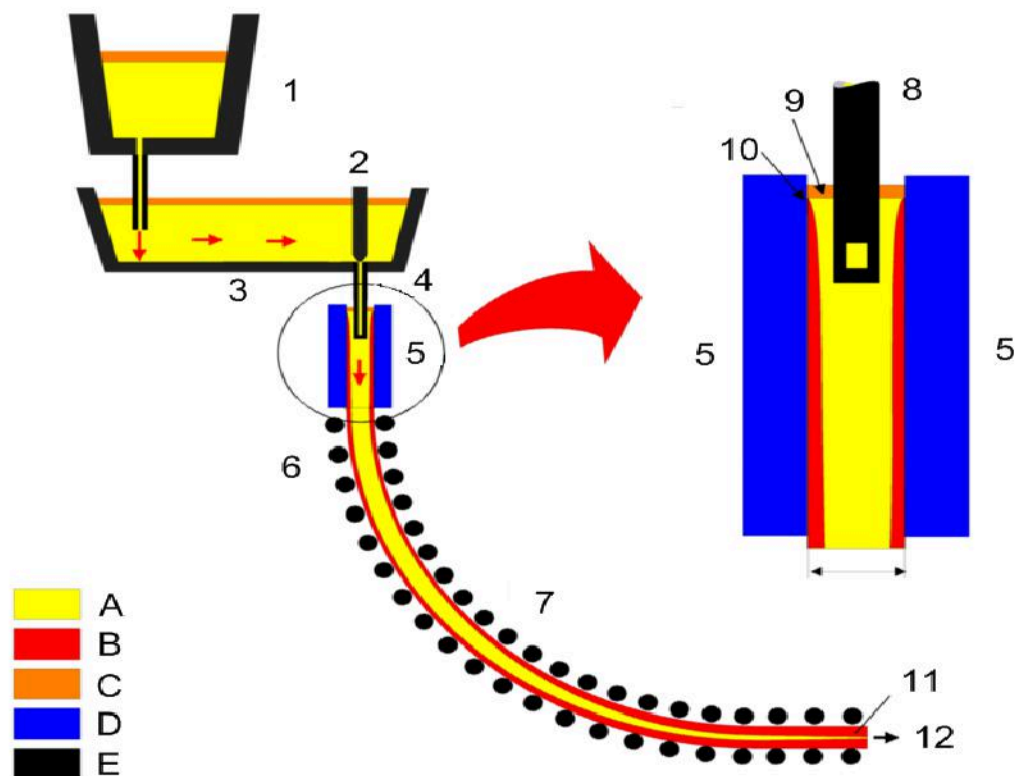


Figura 3.1 Colada Continua. 1: Olla 2: Obturador 3: Molde 4: Zona de enfriamiento 5: Molde 6: Soportes de rolado 7: Zona de giro 8: Obturador 9: Nivel del baño 10: Inicio de la solidificación 11: Salida 12: Barra de acero
A: Acero Líquido B: Metal Sólido C: Escoria D: Placas de cobre enfriadas por agua E: Material refractario

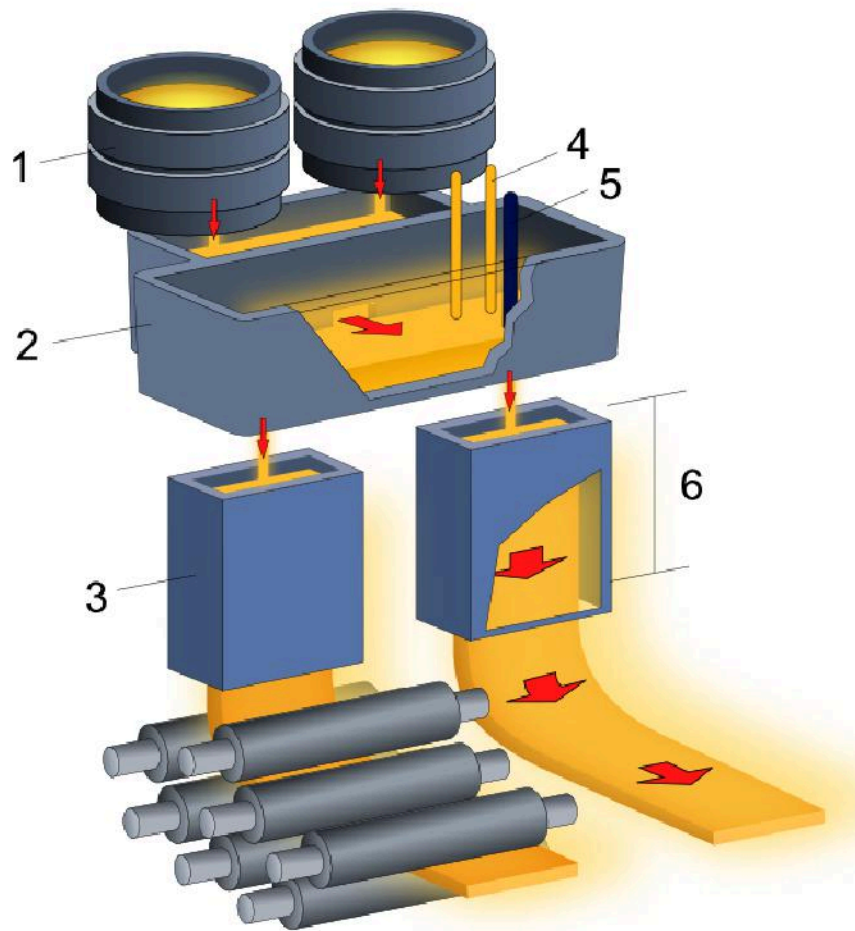


Figura 3.2 Colada Continua: 1. Ollas 2. Contenedor de descarga 3. Molde 4. Quemadores de plasma 5. Obturador 6. Zona de enfriamiento

Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_casting

Este vaciado es un vaciado continuo, en el que en vez de vaciar el acero líquido en moldes preformados y esperar a su enfriamiento. El vaciado continuo se realiza en un molde mientras es enfriado con agua, con esto el acero comienza a tomar forma y a solidificarse de manera parcial, al menos en la capa más externa. Así va creándose una plancha de acero que sale del vaciado continuo y es cortada a la medida necesaria

Posteriormente se le da un tratamiento térmico en hornos de gas para ajustar propiedades físicas, siendo los hornos de muy sobrada capacidad. Finalmente llegan a los laminadores tándem que pueden trabajar a una velocidad muy alta.

Es entonces, el vaciado continuo el cuello de botella de toda la línea, ya que es la única sección que no puede acelerarse mucho más, y que además no puede ser detenida de manera espontánea porque generaría demasiados problemas. Por lo tanto, no tiene caso producir más acero en los hornos del que es capaz de procesarse en el Caster, y tampoco tiene caso preparar los hornos túnel para una cantidad mayor de acero. Todo esto provocaría tener estancamientos, lo que obligaría a reprocesar el material y tener un desperdicio enorme de energía y además una merma en calidad.

3.2 Planteamiento de los objetivos del proyecto

Este proyecto se vislumbró desde un inicio como un proyecto de gran tamaño ya que debe analizar la línea en su totalidad –al menos en principio. Se plantea como objetivo final el poder controlar de manera “inteligente” el ritmo al que trabajan todos los equipos para poder tener una eficiencia en cuanto a tiempo y aprovechamiento de recursos, sin afectar a las líneas más sensibles a los paros, la capacidad productiva ni la calidad de la producción.

Es obvio que una automatización a tales dimensiones va más allá de controles comunes e incluso al tratar de pensar en un Sistema de control distribuido resaltan algunos detalles que podrían dificultar su implementación.

Al exponer la necesidad de llegar a este nivel de automatización, el personal de planta menciona un término que es básico para la implementación de este proyecto; se trata de que debemos basar las decisiones del sistema en la experiencia del personal que labora.

Este detalle nos hace inferir que se necesita un sistema experto para poder llevar a cabo dicha(s) tarea(s).

El objetivo final del proyecto es en sí gestionar y tener un control autónomo y distribuido de toda la planta, sin embargo, es una tarea muy difícil de lograr dado el hecho de que no toda la planta está preparada para lograr ese objetivo en la actualidad. Incluso antes de proponer este proyecto, los hornos de fusión no se encontraban listos para poder llevar a cabo dicha tarea.

A partir de lo anterior se decide dividir el proyecto en etapas; todos los métodos y análisis detallados para la división del proyecto no serán analizados aquí ya que el proceso por el que se tomó la decisión incluyó a muchas personas y criterios, sin embargo conviene enunciar las grandes etapas que habrán de cumplirse para poder alcanzar el objetivo final.

- Etapa 1: Tener un sistema experto capaz de analizar la sección comprendida entre los hornos de fusión y el vaciado continuo. Dicho sistema debe poder crear de manera simulada el ritmo ideal de esta sección para el lapso de al menos un día; esta simulación se generará una sola vez al inicio del día de trabajo. Con lapsos constantes, el sistema debe comparar el status real de la planta contra el status creado en la simulación. A partir de esta comparación debe crear una nueva simulación para poder crear un pronóstico con base en datos reales y actualizados. El sistema debe mostrar siempre las diferencias entre los datos reales y la simulación inicial, además de las diferencias contra la última simulación creada. Todos estos modelos deben estar basados en los tiempos estándares de producción para cada tipo y calidad de material. Se debe utilizar un sistema experto que sea capaz de recibir “estatutos” sin la necesidad de crear código de programación. Finalmente, el sistema experto debe ser capaz de decir si la productividad (en cantidad de metal) está por debajo de lo normal para su situación exacta. En algún modo de visualización debe mostrarse qué sección de la línea trabaja con el ritmo más lento, comparado con su estándar ideal.
- Etapa 2: El sistema experto debe ser capaz de identificar las posibles causas que estén provocando las demoras y rompimiento de ritmo en la planta. Esta identificación debe estar basada en un sistema que tenga algoritmos que representen la experiencia de la gente de planta. Debe mostrarse toda esta información en el modo de visualización y, si es posible, generar consejos para estabilizar la planta según convenga: ralentizando las secciones que van rápido o mejorar la velocidad de la sección que provoca esta situación. En el caso de los Hornos EAF, ya debería ser posible realizar el control de los mismos, dependiendo si se encuentran trabajando en modo automático o manual. Es lógico que el porcentaje de uso del modo

automático debe ser muy alto, ojalá lo más cercano posible al 100%.

- Etapa 3: Esta etapa es la final. Aunque seguramente se encontrará fuera de los límites del proyecto, debe haberse creado la automatización en todas las secciones de la línea, esperando que sea de principio a fin, con esto la tercera etapa se encargará de realizar la coordinación de la planta, esperando obtener resultados óptimos en la producción de acero: Máximo aprovechamiento de energía y recursos y el tiempo de producción más veloz posible.
- En alguna etapa debe implementarse un sistema inteligente (quizá redes neuronales) que vayan aprendiendo el trabajo en la planta para poder mejorarlo cada vez

3.3 Recursos previos

Los recursos previos existentes para este proyecto son bastante limitados ya que no se había tomado en cuenta anteriormente realizar un proyecto de este tipo. Principalmente se cuenta con un viejo desarrollo de un sistema experto propiedad de la planta. Este sistema experto cuenta con la característica de que no es necesario que las personas tengan que realizar programación en código para crear reglas de funcionamiento y poder introducir los conocimientos al sistema.

Además de eso se proporcionaron recursos monetarios para llevar a cabo la adquisición de equipo, pago de horas hombre y movimientos necesarios.

3.4 Definición de los límites de la solución

Dado que el alcance final se vislumbra muy lejano y difícil de lograr en una sola implementación se definieron las tres etapas anteriormente mencionadas. Para la primera etapa es que se realizará el desarrollo, dejándolo abierto para poder continuar hasta el fin del proyecto sin tener contratiempos.

Inicialmente se comienza la carga de toda la información posible de parte de los empleados de planta. Ésta se realiza posterior a una capacitación en la que se les muestra el uso del sistema experto, con el cual no hay muchos contratiempos. El sistema experto sigue un diagrama basado en decisiones y acciones, las cuales pueden llevar a acciones finales o nuevas decisiones basadas en otras reglas programadas para otra sección de la línea.

De manera paralela, se montan dos servidores gemelos trabajando con QNX¹⁵ para poder hospedar a las bases de datos y el servidor web. La idea es que el sistema experto vacíe los datos generados en una base de datos redundante. Esta base de datos tendrá los datos disponibles en todo momento y además servirá como registro para poder analizar el rendimiento de la planta a través del tiempo.

En el servidor web residirá un sistema que tomará el análisis del día y lo mostrará en los dispositivos visuales, y conforme vaya avanzando el desarrollo de la producción mostrará la diferencia entre el avance real y el ideal del mismo.

Para la base de datos, por facilidad y por tratarse de software libre, se utilizará MySQL¹⁶ y el resto del sistema se programará por capas. Se proponen en un inicio HTML simple, PHP apoyado por *Java Script*, dada la necesidad de tener datos dinámicos se requiere encontrar alguna manera de recargar datos específicos sin necesidad de recargar la página.

3.5 Implementación y programación (primera etapa)

La implementación del sistema comenzó con la introducción de reglas de análisis del proceso que nos permitan conocer el status de alguna sección. Cabe recalcar que las secciones principales a analizar al menos para esta etapa son las siguientes:

- Hornos de fusión.
- Hornos de Aceración y sus camas de espera.
- Casters.

¹⁵ Sistema operativo en tiempo real (RTOS por sus siglas en inglés) está basado en UNIX que cumple con la norma POSIX. <http://www.qnx.com/>

¹⁶ Sistema de gestión de base de datos de software libre. <http://www.mysql.com/>

Los empleados comenzaron a generar las reglas apoyados por el área de diseño de procesos para poder tener bases sólidas a partir de las cuales pueda analizarse el proceso no precisamente de manera empírica. De esta manera se mezcló la experiencia del personal con los procesos diseñados idealmente y se espera poder refinar el análisis.

Como se mencionó anteriormente, se propone realizar la programación del sistema por capas. Aquí se definen tales capas basadas en modelos estándar de programación, agregando una que corresponde a la generación de datos:

- La primera es una capa que no está contemplada en la mayoría de los modelos de programación, que es el mismo sistema experto, donde se generan datos dinámicos a partir del análisis del status de la línea. Esta capa tiene sus propios métodos para llevar a cabo el guardado de datos en la siguiente capa.
- La segunda capa sí está contemplada en los modelos de programación, y está definida como la capa de datos. Aquí residen los datos históricamente, los procesos de almacenamiento, se gestiona la redundancia y se basa en la gestión misma de las bases de datos. Esta programación y gestión se llevará a cabo con el lenguaje estándar SQL.
- La tercera capa, igual contemplada en los modelos de programación, es la capa de negociación: En esta capa existirán "programas" que recibirán solicitudes de datos con ciertas reglas para cumplirse y poder entregar un resultado. Así mismo, se encargará de realizar la petición de datos a la capa anterior. Como bien lo dice su nombre, se encargará de esa negociación de datos y el acomodo de los mismos para entregar y recibir correctamente en ambos sentidos. Por la facilidad de programación, y dado que es relativamente sencillo crear interfaces web con él, se propone el uso del preprocesador de texto PHP. De este lenguaje se pueden explotar las clases para el acomodo de datos, bibliotecas para la comunicación con bases de datos y bibliotecas para la comunicación web asíncrona.
- Esta capa también está definida en los modelos de programación, y es la capa de presentación de datos. Esta capa,

como su nombre lo indica, presentará los datos al usuario; comúnmente se encarga también de recibir peticiones del usuario, pero en el inicio de la implementación no se perciben gran cantidad de datos que puedan ser introducidos para hacer peticiones. Se pretende tener un mecanismo de actualización automática por el cual se hagan peticiones concretas a la capa de negociación y poder mostrar los datos en tiempo real. Se contempla un análisis histórico, pero esto traería el mismo tipo de datos, sólo cambiando los rangos de adquisición. Por sus características, se pretende utilizar PHP auxiliado de bibliotecas JQuery y herramientas AJAX, para poder crear interfaces web que actualicen sólo ciertos datos y no la página completa.

Mientras los empleados llevaban a cabo la recopilación de instrucciones se generaron las tablas, ejecuciones, registros, y demás configuraciones en el gestor de base de datos, para comenzar a tener listo dónde hacer el vaciado de resultados que fuera arrojando el sistema experto. Esta configuración se hizo junto con el jefe de procesos de planta para poder saber qué resultados deben ser comparados después de pasar por el análisis de las reglas. Se hizo una lógica de redundancia utilizando índices impares y pares para evitar sobre escribir datos.

Esta programación se hizo en lenguaje SQL y comenzó a tener información conforme se avanzaba la recopilación de experiencia del sistema.

A partir de que se finalizó la implementación de esta base de datos, se decidió extender la filosofía de "utilizar el menor código posible para realizar modificaciones". Con base en esta decisión se consideró la implementación de la primera capa como temporal ya que se deben definir todas las capas para poder llevar a cabo una comunicación óptima y simplificar, en lo posible, los códigos haciendo uso de *storedprocedures*, nuevas bibliotecas y clases y quizá algunos otros lenguajes de programación.

El equipo se dividió entonces en dos, encargados de realizar el análisis y programación de las dos capas restantes, tomando en cuenta la

comunicación entre ellas y el hecho de que para futuras modificaciones se debe requerir el menor código posible.

Ambos equipos de trabajo deciden cambiar el lenguaje de programación de la capa de presentación de datos: Se elige la tecnología *Silverlight*¹⁷.

Esta tecnología de desarrollo web permite la creación de objetos, clases y comunicaciones, siendo programados de una manera sencilla, apoyados en el lenguaje de programación .NET de Microsoft; por lo tanto al crear clases principalmente, se deja una estructura clara y que necesita poco código para poder implementar mejoras basadas en los primeros desarrollos.

La presentación multimedia y el uso de controles también es una de las razones importantes para poder realizar este cambio, ya que se pueden tener animaciones y efectos visuales muy atractivos a la vista sin la necesidad de involucrarse en un código muy extenso.

Además de esto, se buscó la manera de recoger los datos de la capa de negociación, se pensó en crear una clase para este fin en estas capas, una clase uniforme para esta comunicación. Sin embargo, se optó por un protocolo de intercambio de datos ligero y ya existente, disponible para los lenguajes de ambas capas: JSON. Se prefirió JSON a XML por su facilidad de crear clases y que ya existen bibliotecas dedicadas al acomodo de datos bajo este formato.

El equipo encargado de la capa de negociación se encargó de dar forma a los *queries* o peticiones a la base de datos y realizar la ejecución de los *storedprocedures* o procedimientos almacenados. Esta capa se programó de manera que se recibían las peticiones de los usuarios y se creaba un objeto con dicha información, posteriormente un proceso tomaba ese objeto y lo convertía en una petición para la base de datos, regresando los datos en forma de tablas con un orden definido. Estos datos eran acomodados en objetos JSON y posteriormente entregados a la capa de presentación de datos.

¹⁷Microsoft Silverlight es una estructura para aplicaciones web que agrega nuevas funciones multimedia como la reproducción de vídeos, gráficos vectoriales, animaciones e interactividad.

El objetivo de esta capa no era visual, sin embargo en la etapa de pruebas se tuvieron que implementar algunos métodos para poder visualizar la información y corroborar que esta capa estuviera trabajando de una manera correcta y sin errores. Lo mismo se implementó un método para hacer un muestreo constante de los datos existentes en las bases de datos. Y se hicieron pruebas de comunicación en este nivel.

Conviene mencionar que todas las capas residen en los mismos servidores, pero todo está configurado para seguir funcionando de manera "transparente" si llegasen a dividirse físicamente estas capas de programación.

La programación de la capa de presentación de datos llevó un proceso parecido de pruebas de comunicación y presentación de datos al usuario.

De esta manera se creó el sistema que estaría encargado de ser la primera etapa de este proyecto, hablando de manera técnica en el ámbito de programación. Quizá no es necesario profundizar mucho más en el código, ya que se trata de un tema más relacionado con programación de sistemas, sin embargo hago la mención de que formé parte activa de la programación de todas las capas, no sólo dirigiendo a los equipos de trabajo y el análisis, sino también en la creación de los programas y redacción de códigos fuente.

Dada la configuración del sistema, es sencillo explicar cómo trabaja el sistema.

En primer lugar, el sistema experto analiza todos los datos disponibles en las bases de datos de los niveles de gestión, hace peticiones de cientos de variables y con base en las instrucciones guardadas va definiendo ciertos "estados" que permiten decidir si la producción se está llevando a cabo de una manera eficiente. Por ejemplificar, si el consumo de energía por unidad de tiempo está por encima del estándar para cierta calidad de acero en los hornos de fusión, seguramente el lapso en el que se lleva a cabo una fusión de un horno será corto; entonces hay que analizar los datos de eficiencia de las otras secciones, y si existe acero en espera en los hornos de aceración o si el vaciado continuo es lento, no tiene caso acelerar la primera fusión.

Los análisis pueden tomar la profundidad necesaria con el objetivo de contemplar más datos y poder hacer más fino el análisis para lograr saber si el rendimiento es óptimo.

El resto del sistema recoge los datos arrojados por el sistema experto en las bases de datos y hace una consulta al área de procesos para obtener los tiempos estándares definidos de manera ideal y que no están en manos de la gente de la planta.

De esta manera se obtienen dos datos importantes, la eficiencia de alguna sección al compararse con el estado real de cada una de las demás, y la eficiencia comparada contra el ideal de producción propuesto por el área de procesos. El área de procesos a partir de este punto propuso recursos para el avance del proyecto, ya que de esta manera ellos pueden saber si las idealizaciones de los estándares que proponen están muy alejadas de la realidad.

Después de hacer estas comparaciones, se envían los datos a la capa de presentación de datos, la cual los mostrará en forma de gráficas y "semáforos". Expresando si la sección está trabajando eficientemente, si está en el límite permitido o si la línea no tiene dicha eficiencia.

En realidad esta implementación tomó cerca de 4 meses y cerca de tres mil horas hombre de trabajo y programación, dado que la definición de los elementos de comunicación fue muy detallada y cuidada para prevenir dificultades futuras. Y además, el estar al tanto de la introducción de instrucciones al sistema experto llevó bastante tiempo.

Finalmente, las aplicaciones web también fueron compiladas para poder instalarse como aplicaciones fijas. De este modo los equipos cliente tienen la forma de tener las aplicaciones instaladas sobre un sistema operativo Windows y además es posible acceder al sitio web en línea desde otros equipos, con la opción de instalarse de manera fija.

3.6 Instalación de hardware

El hardware de este sistema fue relativamente sencillo. Se contó con la instalación de dos computadoras industriales que harían las veces de servidores redundantes, estas fueron conectadas directamente a la red.

Los equipos cliente no necesitaron gran configuración debido a las bondades del sistema, la configuración de Windows instalado sin mayor cambio que Internet Explorer 9 con el *plugin* de Microsoft Silverlight. Posteriormente se accede a la aplicación en línea y se realiza la instalación, y ésta quedará residente en pantalla. Una conexión a la red fue lo único necesario para poder acceder a la aplicación. También correspondiente a esta parte del hardware se instalaron pantallas de 72" en los púlpitos de control de cada sección, para tener una vista amplia del sistema.

Como podemos ver, un diseño bien planteado puede facilitar muchas cosas innecesarias como configuraciones complejas o instalación de sistemas adicionales.

3.7 Arranque del sistema

El arranque del sistema fue gradual desde el inicio de las pruebas. Realmente no hubo un arranque o periodo de arranque, sino que el sistema fue tomando forma hasta que no hubo necesidad de llevar a cabo cambios en los códigos. Siempre existió una vigilancia de la planta y del equipo de desarrollo. Una vez que todo el personal estuvo conforme con el avance se encendieron las pantallas y los operadores comenzaron a usarlo para apoyarse en sus decisiones.

3.8 Resultados del proyecto

Después de un par de meses de utilizar continuamente el sistema de coordinación como un apoyo para la planta hubo bastante interés por parte de los operadores quienes ya lo consideraban una herramienta necesaria para la mejoría de la producción.

Entre los detalles importantes se encuentra el ahorro de energía. Cuando el vaciado continuo se encuentra trabajando al tope, las camas y torretas donde esperan las ollas provenientes de los hornos de aceración se ocupan, quedando a la espera de vaciar el acero en los casters; muchas veces esa espera se vuelve más larga de lo esperado y es necesario regresar el material a ser reprocesado para conseguir nuevamente las características necesarias para el vaciado. Después de utilizar el sistema por los primeros meses, esta situación se redujo enormemente, ya que los operadores encargados de los hornos de

aceración sabían si el ritmo al que trabajaban los casters era veloz o no. Incluso, al principio del uso del sistema llegó a haber algunos espacios entre coladas de los hornos de fusión debido a que no tenía caso comenzar con la fusión, con el resto de la línea trabajando de manera lenta.

La zona de los casters también tuvo una mejoría bastante notoria. Ya que durante el lapso analizado comenzaron a reducirse las alertas por paro de dicha zona. Esta es una situación bastante crítica ya que la velocidad de trabajo de esta maquinaria está limitada: Si se acelera de más, el acero no alcanzará a tomar su consistencia sólida y temperatura lo suficientemente baja como para formar la plancha, caso contrario, si la velocidad es muy baja se corre el riesgo de provocar problemas al interior del caster o perder la temperatura de vaciado de la olla.

Aunque al principio el personal de la planta consideró que la producción disminuía de ritmo, con el paso del tiempo fue homogeneizándose y fueron disminuyendo situaciones críticas en las que peligrara la continuidad de la producción o que tuvieran que ver con un desperdicio de recursos.

Se espera que al final del año de funcionamiento pueda verse un ahorro sustancial en energía utilizada por los hornos de aceración y de fusión.

Una vez constatados algunos de los beneficios de este sistema se espera la estabilización de la producción para determinar su mejor ritmo y poder continuar con la implementación de las siguientes etapas de este proyecto, que al parecer repercutirán de manera muy importante en la reducción de costos, aprovechamiento de recursos y mejora de la calidad del producto.

4 CONCLUSIONES

Además de la implementación de estos sistemas tecnológicos y de automatización estuve presente en varios proyectos más, incluso fui el jefe de automatización en nivel de gestión de una línea de laminación en caliente. Esto me dejó las bases para poder conocer de una manera más amplia mi profesión e incluso extender más mis límites.

La Mecatrónica como bien se puede inferir de su nombre envuelve a disciplinas como la mecánica, electrónica, sistemas, automatización; pero no se limita a ellas, sino que las utiliza para extender el campo de estudio y aplicación de una manera que se puede ver en pocas profesiones; es así como podemos ver a ingenieros mecatrónicos instrumentando hospitales médicos, diseñando instrumentos musicales, programando sistemas de control, realizando modelos mecánicos e infinidad de labores que parecieran no tener nada que ver una con la otra.

El llevar a cabo la dirección de estos proyectos, al menos en el área correspondiente a mi puesto, me llevó a conocer de manera muy amplia el proceso de fabricación de acero y muchas de las implicaciones que pueden existir a la hora de hacer mejoras en los sistemas y maquinaria instalados o incluso la instalación de nuevos dispositivos, más modernos.

En el primer proyecto pude identificar la infinidad de variables que deben tomarse en cuenta a la hora de realizar un proyecto de automatización de tales dimensiones; éste va mucho más allá del alcance de los proyectos escolares, donde escribir algunas líneas de código y configurar algunos dispositivos es suficiente para lograr el objetivo. En la vida real nos encontramos con sistemas enormes donde miles de variables pueden ser pocas, y ninguna debe ser dejada de lado; donde la distribución de los dispositivos se vuelve tan compleja que es imposible realizar un análisis sin guías, planos, especificaciones y códigos previos.

Es un hecho importante conocer de la manera más precisa posible el proceso que está siendo automatizado, ya que de ello depende por completo el éxito que pueda tenerse o no a la hora de los resultados. No cabe duda que para llevar a cabo una automatización muchas veces debe venir de un método que alguna vez fue manual, y que muchos de los conocimientos deben ser modelados matemáticamente o a través de la lógica.

La conceptualización de uno de estos modelos matemáticos puede tornarse compleja hasta el nivel de "perfección" que se quiera obtener. Es importante decir que siempre habrá más de un método para realizar todos estos proyectos, y que no existe el mejor o peor, ni siquiera el más adecuado o a veces el más barato. Para poder definir todo esto sería necesario implementarlos y hacer una comparación después de un tiempo considerable para analizar todas las repercusiones que se han tenido desde el inicio. Es aquí donde juega un papel muy importante la capacidad de los ingenieros envueltos en el proyecto, quienes deben ser capaces de poder identificar todos estos detalles sin llevarlos a la práctica siquiera.

Obviamente es muy difícil que un ingeniero pueda tener de primera vista esa decisión, aunque la experiencia ayuda bastante a mejorar la pericia de cualquier ingeniero, nunca estará de más el equipo de trabajo.

Durante el desarrollo del primer proyecto estuve en contacto con gente de todos los niveles (hablando de la jerarquía dentro de la empresa), desde los ayudantes generales hasta el director de la línea, teniendo oportunidad de trabajar con todos ellos e identificar las necesidades y sentir acerca de su trabajo y sus intereses. Pude ver que la automatización va mucho más allá de lograr que un artefacto se mueva por sí mismo de manera sincronizada, sino que implica analizar muchos detalles, como el hecho de poder crear un simulador que genere todos los datos de un proceso tan complejo como es la fusión con estos hornos.

Los códigos fuente no pueden ser mostrados en este escrito pero para tener una idea, se trata de programas en C que tienen una extensión de miles de líneas de programación para cada uno de los hornos. Esto sin contar las aplicaciones residentes con las que ya se contaba para el monitoreo y seguimiento de variables.

La mayor parte del proyecto requirió la utilización de software libre, esto abarata muchísimo los costos, en cuanto a la adquisición de licencias, sin embargo las horas hombre en el desarrollo pueden incrementarse demasiado. También se pueden generar modificaciones a placer sin tener tantas limitaciones, sin embargo no existe la garantía de un desarrollo hecho por un tercero, cualquier falla será responsabilidad propia.

Quizá para muchas empresas la implementación de sistemas automatizados puedan parecer un gasto excesivo e innecesario, pero viéndolo más allá de la simple inversión se generan grandes beneficios, como la derrama económica que se analizó para el primer proyecto. El segundo proyecto no cuenta con el análisis monetario porque no hay datos suficientes para poder evaluar dichos beneficios, incluso en un principio se creyó que el sistema ralentizaría los procesos por el hecho de que los tiempos estaban alargándose y pareciera que el tiempo de proceso ganado con la automatización de los hornos se había perdido. Pero con el paso de los días, la planta fue ajustando su ritmo y se fueron apoyando cada vez más en esta herramienta para poder eliminar ciertos desperdicios de recursos, a la larga esto también puede dejar una derrama económica bastante importante en la producción y ganancias.

Tratando ya en estos niveles numéricos el costo de licencias parecería no ser tan importante a la hora de la implementación de los sistemas, tomando en cuenta que para el primer proyecto, la inversión fue del orden de unos tres millones de dólares, y para la implementación de la primera etapa del segundo proyecto, se invirtió cerca de un millón de dólares. Sin embargo, el tener la libertad de realizar un desarrollo propio y cuidar cada detalle de la implementación sin tener que realizar una inversión mayor puede ser mucho más conveniente. No obstante, el tiempo de desarrollo se eleva de manera sustancial. Como se mencionó anteriormente, no hay siempre una sola manera de lograr la solución, y mucho menos la manera correcta, pero sí es posible tener una manera que satisfaga de ampliamente a la mayoría de las necesidades y requerimientos planteados.

Durante el desarrollo e implementación de "Colada Automática" pude ampliar mis conocimientos, entendiendo de manera un poco más profunda el proceso metalúrgico por el que pasa el acero en esta línea, incluso conocer de manera más amplia la definición del modelo matemático y poderlo expresar en números, variables, tablas y líneas de código.

Además de esto, pude observar los alcances de la realización de un proyecto de gran magnitud, que no se cierran al área física, sino que en muchos lugares es necesario tocar mayores niveles, incluso hasta llegar a realizar herramientas que en niveles de gerencia permitan una visión

amplia del sistema o de la planta; o hasta tomar decisiones generales, que deben ser interpretadas para poder bajar la información y concretarlas de una manera mucho más técnica.

En cuanto al proyecto del “Modelo de coordinación” es un proyecto que quizá salga del contexto precisamente mecánico, y que bien puede ser catalogado como meramente un sistema computacional. Sin embargo, la intención de mostrarlo es hacer ver los alcances que puede tener un desarrollo mecatrónico, y que tiene las bases para lograr una amplia variedad de aplicaciones.

Ese proyecto es muy amplio y a futuro requerirá modificaciones en todas las áreas de automatización relacionadas con la línea, desde los niveles de conexión y proceso hasta niveles gerenciales en donde se podrán –o al menos deberían- tener nuevas herramientas para el monitoreo y control de la planta.

Seguramente este sistema incrementará sus capacidades de una manera muy compleja, actualmente es un sistema experto y hay relativamente pocas funciones trabajando como una red neuronal, pero con el paso de los años se espera que este sistema sea mucho más “inteligente” y cuente con toda la experiencia recopilada a través del tiempo.

Un dato muy importante es cuidar el desplazamiento que tienen las personas al compararlos con este tipo de sistemas, hoy por hoy la creación de tales sistemas no implicó el despido de ninguna persona; sin embargo, facilitaron enormemente su trabajo y funciones, siendo auxiliados uno por otro. Pero en algún momento habrá algunas funciones realizadas completamente por máquinas o programas. Estas funciones incluso deben ser monitoreadas por una persona, recordemos que la automatización debe crear herramientas de mejora, más no sustitutos.

5 BIBLIOGRAFÍA

A.T. Peters. *Producción siderúrgica*: Editorial Limusa. (1987)

Apraiz Barreiro José. *Fabricación de hierro, aceros y fundiciones Tomos 1 y 2*: Urmo Ediciones. (1978)

P.A. Pezzano. *Siderurgia*: Librería y Editorial Alsina. (1963)

Castillo/Hadi/Gutiérrez. *Sistemas expertos y modelos de redes probabilísticas*. Academia española de ingeniería. (1998)

Nick Lecrenski. *Silverlight 4 Problem-Design-Solution*. Wrox (2010)

Raj Bhargava. *OpenVMS Architecture, use and migration*. McGraw Hill. (1995)

Peter Van Der Linden. *Expert C Programming, Deep Secrets*.

Direct current arc furnaces. TechCommentary, publicado por EPRI Center for Materials Production. CMP-603 1991.

K Bergman, R. González. *Twin-Cathode DC EAF Concepts and results at HyLSA*, publicación del ATS International Steelmaking Conference, París 2001.