



UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS Y ADMINISTRACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**"Diseño de un Sistema Supervisor en el Horno de Recalentamiento de Palanquillas
durante maniobra gruesa"**

PAULO CÉSAR MILLAR ALVEAL
2008



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS Y
ADMINISTRACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“Diseño de un Sistema Supervisor en el Horno de Recalentamiento de Palanquillas
durante maniobra de fuses”**

64547



**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELLECTRÓNICO**

Profesor Guía: Mg. Ing. Nelson Hernán Aros Oñate

**PAULO CÉSAR MILLAR ALVEAL
2008**

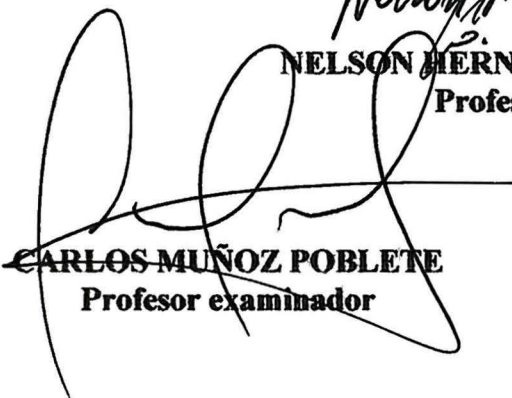
**“DISEÑO DE UN SISTEMA SUPERVISOR EN EL HORNO DE
RECALENTAMIENTO DE PALANQUILLAS DURANTE MANIOBRA GRUESA”**

PAULO CÉSAR MILLAR ALVEAL

2008

COMISIÓN EXAMINADORA


NELSON HERNAN AROS OÑATE
Profesor Guía


CARLOS MUÑOZ POBLETE
Profesor examinador


IVAN VELASQUEZ BRICEÑO
Profesor examinador

Nota trabajo escrito : 6.6
Nota examen : 6.6
Nota final : 6.6

A mis padres

RESUMEN

El trabajo de título tiene como objetivo el diseño de un Sistema Supervisor en el Horno de Recalentamiento de palanquillas en maniobra gruesa y fue desarrollado en las instalaciones de la Plana Renca de la empresa Siderúrgica Gerdau Aza.

Mediante el levantamiento del conocimiento del proceso de recalentamiento de acero que han adquirido durante años operadores y mantenedores, sumado al conocimiento de expertos asesores del Grupo Gerdau es que se desarrollo el Sistema Supervisor. Las tareas rutinarias de operadores en los transientes del proceso de recalentamiento fueron tabuladas en tablas, en las que se incorporan todas las variables que influyen en el manejo de consigna de temperatura del horno de recalentamiento, como son el ritmo de descarga, rampa y consigna de temperatura, de acuerdo los diferentes estados en que se puede encontrar el horno. Para las decisiones tomadas por el operador en el estado estacionario, que se basan exclusivamente en su experiencia, se utiliza la teoría de control difuso que se fundamenta a su vez en la teoría de conjuntos difusos.

Por último se propone una alternativa de implementación de acuerdo a los recursos tecnológicos con los que cuenta la planta, sean estos PLC y el sistema SCADA con el que se supervisa el proceso de recalentamiento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Introducción	2
1.2 Aspectos generales de la empresa	3
1.2.1 Organización Interna	4
1.2.1 Planta de laminación Renca.	4
1.3 Proceso productivo	6
1.4 Planteamiento del problema	8
1.5 Justificación	9
1.6 Objetivos	10
Objetivo general	10
Objetivos Específicos	10
1.7 Estructura del trabajo	11
CAPÍTULO II	12
PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO, CONTROL REGULATORIO Y OPERACIÓN DEL HORNO DE RECALENTAMIENTO DE AZA RENCA	12
2.1 Introducción	13
2.2 Hornos de recalentamiento de acero	13
2.2.1 Funcionamiento mecánico en Hornos	13
2.2.2 Tipos de calentamiento en Hornos	15
2.2.3 Fundamentos de Combustión	16
2.2.4 Tipos de combustión	17
2.2.5 Transferencia de calor en el acero	22
2.3 Control de Hornos de recalentamiento.	24
2.3.1 Niveles de control en hornos de Recalentamiento	24
2.3.2 Técnicas de control de combustión	26
2.3.3 Control de presión interna de bóveda y presión de aire de combustión.	30
2.3.4 Control del Ritmo de descarga	31
2.4 Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca	33
2.4.1 Modo Detención	34
2.4.2 Ajuste del laminador	36
2.4.3 Partida	37
2.4.4 Producción	37
2.5 Recopilación y Análisis de Datos	39
2.5.1 Consigna de temperatura real en función del Ritmo de Descarga.	40
2.5.2 Relación de temperatura de barra y corriente del Tren Desbastador versus Temperatura de Bóveda.	42
2.5.3 Distribución de Corrientes y Temperatura de barra.	44

CAPÍTULO III	46
DISEÑO DE SISTEMA SUPERVISOR.	46
3.1 Introducción	47
3.2 Diseño del Control Supervisor: Gestión de SP de Temperatura de horno	47
3.2.1 Operación anormal	49
3.2.2 Operación normal	55
3.3 Corrección de la Consigna de Temperatura basado en lógica difusa	56
3.2.1 Diseño de Controlador tipo Mandani para la corrección de la Consigna de Temperatura	57
3.4 Operación del Sistema de Control Supervisor	66
CAPÍTULO IV	71
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXOS	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1,	Niveles de control en un horno de recalentamiento	25
Tabla 2.2,	Técnicas de control de combustión	27
Tabla 2.3,	RATIO para gas y diesel	30
Tabla 2.4,	Dimensiones del horno de recalentamiento de Aza Renca	34
Tabla 2.5,	Extracto de padrón de operación Temperatura de Horno en detenciones	36
Tabla 2.6,	Extracto padrón de operación Temperatura de Horno por cantidad de barras	39
Tabla 2.7,	Estadísticos descriptivos de corrientes y temperatura de barra.	46
Tabla 3.1,	Parámetros para detenciones mayores a tres horas	50
Tabla 3.2,	Parámetros para interrupciones	52
Tabla 3.3,	Parámetros ajustes luego de una detención	53
Tabla 3.4,	Partida suave para interrupciones	54
Tabla 3.5,	Variables lingüísticas y sus valores lingüísticos	60
Tabla 3.6,	Parámetros de funciones de pertenencia	60
Tabla 3.7,	Base de reglas para el módulo fuzzy temperatura	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1,	Organigrama Gerdau Aza	5
Figura 1.2,	Layout organizacional - planta Renca	5
Figura 1.3,	Layout de la nave de laminación, planta Renca	7
Figura 2.1,	Desplazamiento de carga al interior del horno	15
Figura 2.2,	Diagrama de horno Aza Renca y disposición de quemadores	16
Figura 2.3,	Metodología para mejorar tablas de ratio	20
Figura 2.4,	Atomización de petróleo diesel	21
Figura 2.5,	Temperatura y flujo de calor a lo largo de un horno	23
Figura 2.6,	Flujo térmico a lo largo de horno de empuje	24
Figura 2.7,	Estructura sistema de control Horno de recalentamiento	26
Figura 2.8,	Control de combustión en paralelo con doble límite cruzado	29
Figura 2.9,	Control presión interna de horno	31
Figura 2.10,	CUT-OFF para bajos caudales	37
Figura 2.11,	Pantalla para exportar tendencias históricas de datos	40
Figura 2.12,	Frecuencia de Consigna para ritmo de 54 b/h	42
Figura 2.13,	Frecuencia de Consigna para ritmo de 50 b/h	42
Figura 2.14,	Temperatura de barra versus Temperatura de horno	44
Figura 2.15,	Temperatura de horno y Corriente 2º pase	45
Figura 2.16,	Distribución de corrientes en el desbaste	45
Figura 2.17,	Distribución de temperatura de barra	46
Figura 3.1,	Diagrama de bloques del sistema supervisor	56
Figura 3.2,	Curvas de calentamiento para estado de producción	58
Figura 3.3,	Estructura del bloque fuzzy	61
Figura 3.4,	Funciones de pertenencia para las variables a) corrientes, b) temp. 2º pase, y c) fc.	62
Figura 3.5,	Funciones de pertenencia para las variables a)2º pase, b)3º pase, c)4º pase, d)5º pase y e) 6º pase	64
Figura 3.6,	Superficie descrita por fc en función de corrientes y temp. 2º pase	69
Figura 3.7,	Diagrama de bloques de Sistema de Control Supervisor para el horno de recalentamiento Aza Renca.	
Figura 3.8,	Esquema para la implementación del Sistema de Control Supervisor	70

Capítulo I

Introducción y Aspectos Generales

1.1 Introducción

Gerdau Aza S.A. es una empresa perteneciente al Grupo Gerdau, con 53 años en el sector siderúrgico chileno, desarrollando productos acordes a las constantes exigencias del mercado.

La actividad de Gerdau AZA se orienta a la producción y abastecimiento de barras y perfiles de acero laminado, atendiendo sectores esenciales en el desarrollo del país, como son la construcción civil y la industria metalmecánica.

El trabajo de título que se presenta a continuación se centra en el horno de recalentamiento de palanquillas - Laminación Renca - teniendo como objetivo mantener un perfil de temperatura de laminación para la palanquilla de manera que se pueda llevar a cabo el proceso a máxima productividad y con la mayor eficiencia posible en términos de consumo específico de combustible. Este perfil también tiene que estar acorde a las exigencias del tren laminador, el cual es un factor determinante a la hora de controlar.

Para el control de perfil de temperatura se conjugan: i) factores tecnológicos, como es la instrumentación asociada al horno y al sistema de combustión, ii) aspectos teóricos como es la teoría de combustión, de sistemas y de control automático, y por último, iii) el factor humano que está representado por los operarios que se encargan de supervisar el correcto funcionamiento del proceso productivo.

La necesidad de conseguir un perfil de temperatura adecuado a las exigencias antes mencionadas, ha sido abordado de distintas formas, aplicando distintas tecnologías y filosofías de control como: control clásico PID, sistemas de control supervisor, sistemas de control distribuidos y el control difuso entre otros.

La lógica y el control difuso surgen como una alternativa innovadora a los conceptos clásicos de control de sistemas. El hecho de utilizar descripciones lingüísticas y una base de reglas de producción que abarcan el conocimiento global del sistema, que

simule la experiencia y el sentido común que un experto tendría sobre el proceso, permite entregar, una acción de control o consigna, que en vez de responder a la demanda de una relación lineal se ajuste a la situación particular del proceso.

1.2 Aspectos generales de la empresa

Gerdau Aza en 1992 pasó a ser propiedad del Grupo Gerdau, uno de los conglomerados siderúrgicos privado más importante del mundo, con una capacidad productiva de más de 7 millones de toneladas de acero al año. El Grupo Gerdau tiene plantas siderúrgicas en Brasil (10), Uruguay (1), Argentina (1), Canadá (2), EEUU (3) y Chile (2). Con la incorporación de AZA al Grupo Gerdau, se inició un importante aumento de las inversiones y las capacidades productivas, que le han permitido ampliar la gama, la calidad y el volumen de los productos ofrecidos.

Gerdau AZA, cuenta con dos plantas productivas ubicadas en el área industrial de la zona norte de Santiago, una en Renca con una producción de 80 mil toneladas y la segunda ubicada en Colina en operación desde el año 1999 con 280 mil toneladas de acero líquido al año satisfaciendo las necesidades de sus clientes, aplicando los principios, conceptos y prácticas de la Gestión de Calidad Total, que la llevó a recibir el año 2000 el premio nacional a la calidad otorgada por el Centro Nacional de la Productividad y la Calidad.

Los ejes fundamentales de la gestión de Gerdau Aza responden al mejoramiento continuo de sus procesos, el respeto por el medio ambiente, la aplicación de políticas de desarrollo profesional de las personas y el logro de resultados propuestos.

Los productos de Gerdau Aza están dirigidos a satisfacer dos grandes mercados industriales: el metal mecánico y la construcción civil. Para el primero de ellos, suministra barras y perfiles livianos, como son las barras cuadradas, redondas, planas, perfiles ángulos, etc. y para el segundo mercado, provee de barras de refuerzo y alambrón en rollos. La

mayor parte de la producción es para el mercado nacional, efectuando sólo algunas exportaciones a países de Latinoamérica.

1.2.1 Organización Interna

Para Gerdau Aza existe una independencia administrativa total con el Grupo Gerdau, habiendo sólo un control por resultados de acuerdo a lo planificado en forma anual y basada en los numerosos indicadores de gestión con los que cuenta.

Internamente la estructura jerárquica consta de tres niveles: Gerencia General, Gerencias y Jefaturas, y los operarios. Las Gerencias y Jefaturas dependen únicamente de Gerencia General tal como se muestra en la figura 1.1.

1.2.1 Planta de laminación Renca.

Laminación Renca cuenta actualmente con 98 colaboradores que se encuentran organizados en 6 células, estructurados de acuerdo a la figura 1.2.

Las células que componen la planta de laminación Renca responden a su sistema administrativo que tiene como objetivo que estas células sean independientes, capaces de autogestionarse y tomar sus propias decisiones, siempre con el apoyo de un grupo administrativo que hace las veces de facilitador de las necesidades de cada célula.

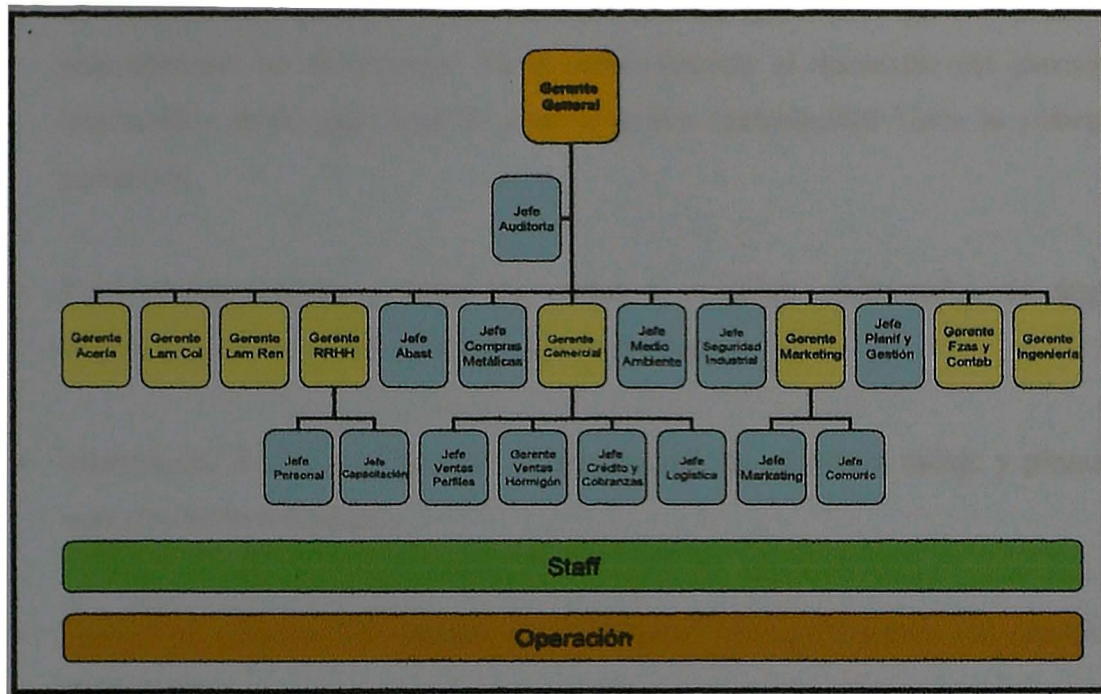


Figura 1.1 Organigrama Gerda Aza

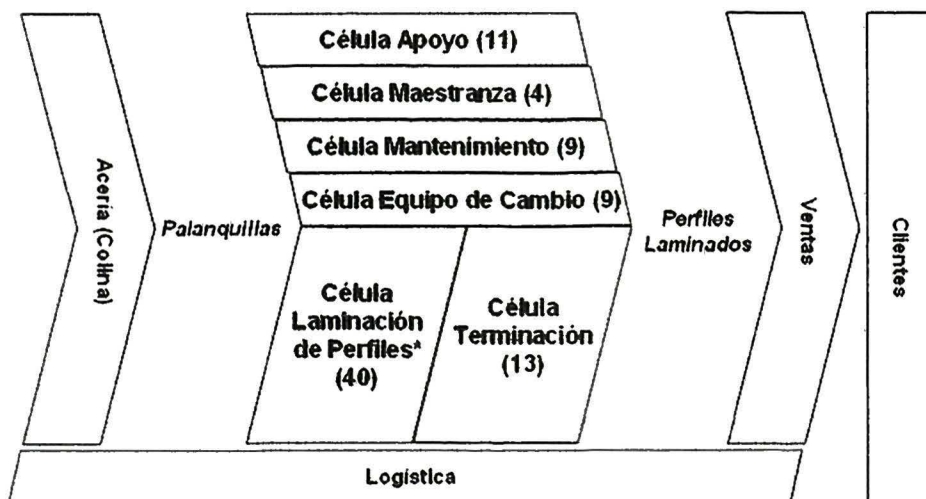


Figura 1.2 Layout organizacional - planta Renca.

Es así como la planta de laminación Renca cuenta con las siguientes células operacionales:

- **Laminación de perfiles:** Con sus tres turnos permiten que la producción prácticamente no se detenga. Tiene como función el desarrollo del proceso de laminación, desde que llega la materia prima (palanquilla) hasta la entrega de productos.
- **Terminación:** Llevan a cabo los cortes a medidas, enderezados de ángulos, empaquetado, etiquetado y almacenaje de productos.
- **Maestranza:** Realizan el proceso de mecanizado de cilindros, utilaje y piezas que sean necesario mecanizar.
- **Equipo de cambio:** Su función es la preparar los equipos para los cambios de producción.
- **Mantenición:** Cuentan con operarios de especialistas en mecánica, electrónica y eléctrica y tienen como tarea apoyar los procesos de las demás células.
- **Apoyo:** Está integrada por personas de diversas especialidades y tiene como misión: programación del laminador, planificación de metas para las distintas células, facilitador de gestión de células, entrega de apoyo técnico y logístico, planificación de capacitaciones, desarrollo de nuevos productos, auditar a los distintos sistemas, además de otras tareas importantes, como gestión en medio ambiente, seguridad y calidad.

1.3 Proceso productivo

El proceso de fabricación de barras y perfiles de acero consta de dos procesos, el primero es la fabricación de acero, por medio de la fundición de chatarra de acero, el que se subdivide a su vez en tres procesos: fundición, que se lleva a cabo en un horno eléctrico, fusión y refinación donde se le da una composición química bajo estrictos estándares de

calidad¹ y por último el proceso de colada continua en el que acero líquido es solidificado en lingotes refrigerados por agua obteniéndose un producto semiterminado llamado *palanquilla*.

El otro proceso, que sigue al de acerado en la producción de barras y perfiles, es el de *laminación*, este proceso se puede subdividir en dos etapas: i) el recalentamiento de la palanquilla en un Horno para la obtención de temperatura de laminación, y ii) el tren de laminación donde mediante un tratamiento termomecánico se va dando la forma del producto final.

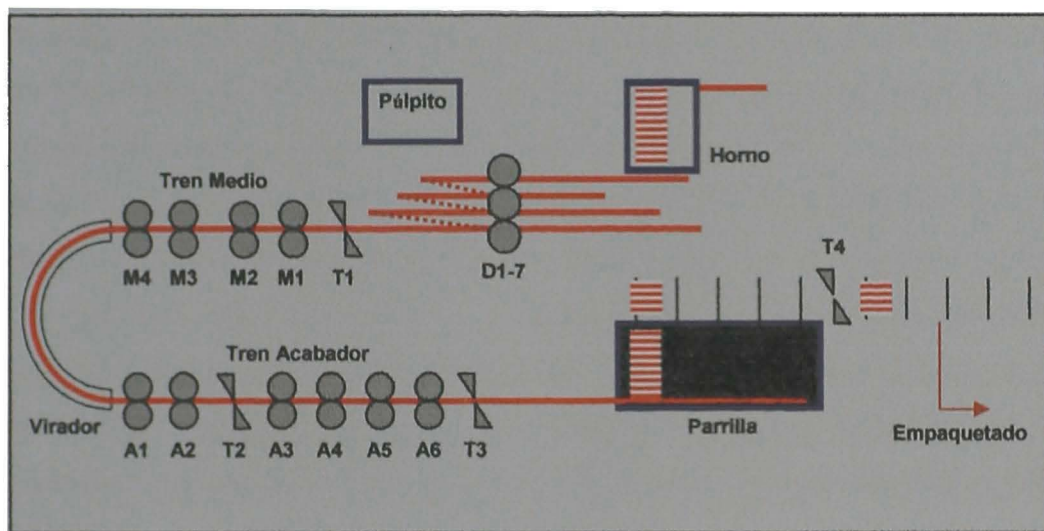


Figura 1.3 Layout de la nave de laminación, planta Renca.

En el layout que se muestra en la figura 1.3 se aprecia el proceso de laminación completo, el que se inicia con la carga de las palanquillas (materia prima entregada por planta de acería colina) en la mesa de carga, desde donde por medio de un camino de rodillos es llevada al interior del horno de recalentamiento; es en este horno que la palanquilla permanece idealmente poco más de una hora donde la barra alcanza la temperatura de laminación cercana a los 1200° C.

Los equipos que siguen al horno de recalentamiento son los encargados de dar el tratamiento termomecánico con el fin de obtener el producto deseado. El primer equipo se

encuentra formado por el desbaste y la mesa basculante, donde el primero es el que hace la mayor reducción de la sección transversal de la barra a lo largo del tren laminador y lo hace, dependiendo del producto, en un mínimo de 3 y un máximo de 7 pases donde la mesa es el mecanismo que permite realizarlos.

Una vez terminada la etapa del Desbaste, el lingote debe ser sometido a su primera etapa de corte, Cizalla T1. Esta se realiza para evitar el levantamiento y soslayar el enfriamiento de sus puntas y así continuar de manera normal el proceso.

El tren medio continúa reduciendo la sección transversal de la barra por medio de las cajas reductoras M1, M2, M3 y M3. Luego viene el virador (que nace como una solución al problema de no contar con el espacio suficiente para disponer de un tren laminador continuo como sería el caso ideal) que se encuentra antes de las cajas A1 y A2 que pertenecen al tren acabador y que siguen reduciendo la sección de la barra, a continuación al producto se le corta la punta por medio de la cizalla T2 antes de pasar por las últimas cajas reductoras A3, A4, A5 y A6 que pertenecen al mismo tren. Por último es la cizalla T3 la encargada de hacer el último corte en caliente de forma tal que el producto resultante no supere el largo de la parrilla de enfriamiento, que como su nombre lo dice, es donde el producto pierde calor en forma natural antes de ser empaquetado para ser llevado a terminación.

1.4 Planteamiento del problema

Uno de los equipos críticos en el proceso de laminación en caliente de acero antes descrito, en términos de consumo energético, es el horno de recalentamiento de palanquillas, es por esto que tener un control sobre dicho equipo es primordial de forma tal que garantice un consumo específico mínimo de combustible.

Ante dicha necesidad es necesario identificar todos los problemas que van de la mano al proceso de recalentamiento, con el fin de cumplir de la mejor forma con exigencias como:

- Homogeneidad de temperatura en toda la longitud de la palanquilla
- Diferencia de temperatura entre superficie y núcleo no sobrepase un cierto valor
- Las pérdidas por cascarilla sean bajas

Entre los principales desafíos que nacen en la búsqueda de estas exigencias están por ejemplo el control de una buena combustión que asegure una óptima utilización de combustible y a la vez cumpla con las exigentes leyes ambientales que existen en el país, también dado que un horno de recalentamiento se encuentra sujeto a fuertes oscilaciones térmicas y mecánicas es necesario tener una marcha o ritmo lo más homogénea posible que vaya de acuerdo a las calidades de acero a calentar como a la producción programada.

Es por esto que se desea diseñar un control supervisor que tenga como objetivo obtener un perfil de temperatura que nos asegure las exigencias antes mencionadas y para lo cual incorpore una solución a todos los problemas que conllevan el proceso de recalentamiento tomando como referencia la experiencia de las personas que llevan años operando el equipo y respaldada en todos los casos en el conocimiento experto de tal forma de aunar criterios a la hora de operar el horno de recalentamiento con el que cuenta Laminación Renca, tanto para una operación normal como para detenciones del laminador.

1.5 Justificación

El desarrollo de este trabajo se enmarca en la búsqueda por parte de Gerdau Aza, por ende de Laminación Renca, de un mejoramiento continuo de sus procesos como también en dos de sus objetivos estratégicos como son el *tener una variabilidad mínima en todos sus procesos* y *tener consumo energético mínimo*, los que se ajustan al objetivo principal de ser '*Benchmark*' en sus procesos productivos. Adicionalmente el alza sostenida

que han tenido los combustibles, y en el caso particular del gas natural su poca disponibilidad, ha llevado a laminación Renca y en general a la industria chilena a buscar optimizar sus procesos en los que intervengan el uso de combustibles.

1.6 Objetivos

Objetivo general

- Diseñar un Sistema Supervisor para el consumo específico de combustible en el Horno de Recalentamiento de Palanquillas, proceso de laminación, durante las Paradas y Puesta en Operación.

Objetivos Específicos

- Determinar las capacidades y eficiencia de los equipos involucrados en la combustión.
- Realizar un levantamiento de la instrumentación del proceso.
- Diseñar un sistema de control para el perfil de temperatura interior del horno, en caso de maniobra gruesa: Paradas y Puesta en Marcha.
- Analizar las rutinas de control existente para el proceso de recalentamiento, desarrolladas en PLC-5 Allen-Bradley.
- Implementar las rutinas del sistema diseñado en el PLC-5 marca Allen-Bradley para controlar el Horno de Recalentamiento en maniobras gruesas.
- Evaluar el Sistema Supervisor propuesto.

1.7 Estructura del trabajo

Este trabajo está organizado en 4 capítulos los cuales corresponden a:

- **Capítulo I: Introducción y Antecedentes Generales:** se hace una breve descripción de empresas Gerdau Aza, su organización interna y del proceso de fabricación y laminación de acero. Por último se plantea el objetivo principal del trabajo de título como también los objetivos específicos que permitirán lograrlo.
- **Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca:** se inicia con una revisión de los principios de funcionamiento de un horno de recalentamiento en términos mecánicos y de los sistemas de control existentes para la combustión, especificando los parámetros y los lazos de control que caracterizan el horno de Aza Renca. La segunda parte describe la operación del horno de recalentamiento conjugando el conocimiento del proceso por parte de operadores y mantenedores del equipo junto con un análisis de datos reales que justifican el diseño del sistema supervisor propuesto.
- **Capítulo III: Diseño del Sistema Supervisor:** En este capítulo se plantea el diseño del sistema supervisor para operación normal, basado en los fundamentos del control difuso de sistemas, y de operación anormal basado en la experiencia del personal a cargo del horno de recalentamiento. Se finaliza el capítulo presentando un análisis de factibilidad técnica para la implementación del supervisor.
- **Capítulo IV: Conclusiones:** se presentan las conclusiones del trabajo de título discutiendo el logro de los objetivos, las ventajas y desventajas del diseño propuesto y apreciaciones personales del autor.

Capítulo II

Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

2.1 Introducción

Se puede definir a un Horno de recalentamiento para laminación de acero en caliente, como grandes cámaras en las que varias decenas de quemadores proveen la energía necesaria para elevar la temperatura de la carga que pasa en forma continua por su interior.

En las últimas décadas, el proceso de laminación en caliente de acero, y en especial los hornos de recalentamiento, han experimentado un considerable avance tecnológico, encaminado, en gran parte, a hacer frente a las exigencias crecientes de los laminadores y a optimizar el consumo específico de combustible dado el aumento sostenido de éstos.

Para poder responder a estas exigencias es necesario en estos hornos industriales mantener fijas varias magnitudes físicas o seguir un programa predeterminado si se quieren obtener productos de calidad.

En este capítulo se hace una pequeña revisión somera de las principales características de los hornos de recalentamiento, como su mecánica de traslación de carga, tipo de calentamiento, equipos de combustión y la transferencia de calor al acero. En la segunda parte, se presentarán los distintos niveles de control que se puede encontrar en un horno de recalentamiento como en la mayoría de los procesos industriales caracterizando el horno de recalentamiento de Aza Renca. Por último, se presenta la operación del horno en los distintos estados en que se puede encontrar.

2.2 Hornos de recalentamiento de acero

2.2.1 Funcionamiento mecánico en Hornos

Al momento de querer presentar el funcionamiento mecánico del horno, el tema de mayor importancia, según lo expuesto por Alarco Lecuona [1], al tipo de desplazamiento de la carga de acero en su interior, pues no existe la necesidad de una descripción acabada,

por ejemplo, de la forma en que el acero se carga en el horno, así del el sistema de descarga, dado que estos aspectos, siendo aún importantes a la hora de definir un horno en particular, no lo son al momento de estudiar el proceso de recalentamiento de acero.

Hoppe en [8] que existen básicamente dos tipos de desplazamiento continuo de carga al interior de la bóveda del horno (el recalentamiento por lotes es muy poco usual en tratamiento de acero para su laminación), y se pueden clasificar en hornos de empuje y hornos de viga o solera móvil.

Los hornos de empuje trasladan la carga de acero al interior del horno a través de sistemas hidráulicos que empujan las piezas sobre rodillos refrigerados, mecanismo que es ayudado por lo general por una pequeña inclinación de la base del horno.

Desde el punto de vista mecánico Alarco Lecuona [8] también expone que los hornos de empuje aventajan los de viga galopante, los que serán descritos más adelante, pues son mucho más sencillos, dado que no hay habitualmente piezas móviles interiores al horno que siempre son críticas, dadas las altas temperaturas de la bóveda.

Por otro lado, en términos de operación se da el caso contrario, es el horno de viga galopante el que presenta ventajas, por ejemplo, si el horno de viga galopante trabajase sólo a uno o dos turnos, es posible al termino de éstos, descargar el horno completamente, no así en un horno de empuje, aquí la carga de acero no es posible descargarla, permaneciendo horas inactivo y sujeto a altas temperaturas lo que repercute en una mayor oxidación del acero, con la consiguiente pérdida de material y depósito de cascarilla, por otro lado, para paradas imprevistas de producción también se presenta en ocasiones el grave problema de que las piezas se suelden entre sí al estar expuestas durante mucho tiempo a altas temperaturas.

El horno con el que cuenta Aza Renca desplaza su carga en forma continua por medio del sistema de viga o solera móvil. Este sistema consta de dos partes, la solera fija y el larguero o solera móvil, estando éste último dividido en dos partes, siendo ésta la parte

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

móvil encargada de tomar la carga y desplazarla con un cierto paso (127 mm aprox.), para luego hacer descansar la carga nuevamente en la solera fija. El movimiento de la viga móvil se puede apreciar en la figura 2.1. No deja de ser importante el tamaño de paso que tenga el sistema de desplazamiento, pues tal como se expuso por Jaklic *et Al.* [11], existe una separación que hace óptima la productividad del horno dado que favorece la transferencia de calor entre piezas contiguas.

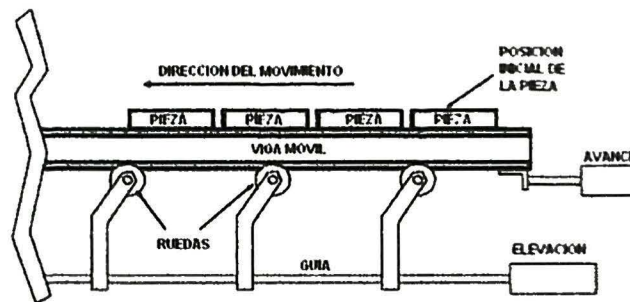


Figura 2.1 Desplazamiento de carga al interior del horno

2.2.2 Tipos de calentamiento en Hornos

En [1] y [8] se exponen los distintos tipos de calentamientos existentes, calentamiento que queda determinado por la disposición de los quemadores en la bóveda del horno, esto tiene como resultado una gran diversidad de diseños de hornos que se pueden encontrar en distintas plantas siderúrgicas. Dentro de los aspectos importantes a considerar cuando se diseña un horno se tiene por ejemplo, el nivel de producción (t/h), el tipo y tamaño de las piezas de acero, el tipo de desplazamiento de la carga, etc., como resultado, existen hornos de recalentamiento con quemadores dispuestos en forma superior e inferior o sólo con calentamiento superior, o como es el caso de Aza Renca, un horno con quemadores laterales. El número de quemadores también está sujeto a esto, y siendo el horno de Aza Renca de una baja producción consta de dos quemadores frontales tal como muestra la figura 2.2.

Ahora bien, también se puede encontrar restricciones a la hora de definir el tipo de quemadores, ya sean de tipo ambiental o eventuales problemas de suministro de combustible, como es el caso de hoy en Chile, en estos momentos por un lado se cuenta con una legislación ambiental estricta con respecto a emisión de gases y material particulado producto de combustión, por sobre todo en la Región Metropolitana, y por otro lado, tampoco se cuenta con un suministro asegurado de gas natural que es el combustible ideal, por ser limpio y de menor costo. Esto ha llevado a Aza Renca a contar con quemadores bajos en la emisión de NO_x y que puedan quemar tanto gas natural como petróleo diesel.

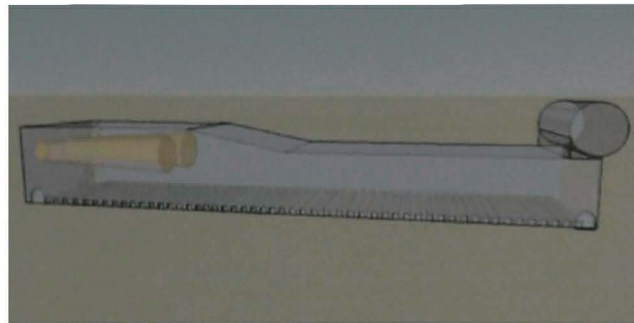


Figura 2.2 Diagrama de horno Aza Renca y disposición de quemadores

2.2.3 Fundamentos de Combustión

En El-Mahallawy [4] se define combustión como una combinación exotérmica rápida de oxígeno con un combustible, es decir, reacción química que se produce al hacer reaccionar oxígeno con un combustible desprendiéndose calor.

La fuente natural de abastecimiento de oxígeno se encuentra en el aire, donde el oxígeno es el 21% del volumen total y es la parte activa en el proceso de combustión, el

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca
79% restante corresponde en su mayoría a nitrógeno, siendo éste el elemento inerte en la combustión.

Los elementos químicos que tienen mayor importancia en la combustión son el carbono y el hidrógeno. Cada elemento necesita una cantidad específica de oxígeno para quemarse completamente, el aire y el combustible mezclados en las proporciones exactas, dan una mezcla perfecta o estequiométrica, proporción que se conoce como “razón aire/combustible”, que de aquí en más se le denominará **RATIO**.

2.2.4 Tipos de combustión

En función de la cantidad de aire aportada para la combustión, se pueden distinguir los siguientes tipos de combustión:

Estequiométrica:

La combustión estequiométrica se produce cuando se aporta el oxígeno (o aire) estrictamente necesario para quemar el combustible. La cantidad de aire requerida en este tipo de combustión se denomina aire teórico o estequiométrico y constituye un dato de suma importancia.

Sólo es posible realizar las combustiones estequiométricas en laboratorio, ya que es preciso que la mezcla aire-gas sea total y homogénea. Esto no puede lograrse en condiciones industriales con el aire estrictamente necesario.

Completa o perfecta:

Teniendo en cuenta que es prácticamente imposible obtener una mezcla homogénea y total del combustible con el comburente (oxígeno del aire), sobre todo en el corto espacio de tiempo en que ésta mezcla debe realizarse, se emplea una cantidad de aire mayor que la estrictamente necesaria si se quiere que el combustible se queme en su totalidad.

La combustión completa se produce, por lo tanto, cuando se aporta mayor cantidad de oxígeno (o aire) que el estrictamente necesario para quemar el combustible. También se le llama combustión con *exceso de aire*.

La relación entre el aire realmente utilizado y el aire estrictamente necesario se llama "Índice de exceso de aire" y se representa normalmente por la letra "n".

$$n = \text{Índice de exceso de aire} = \frac{\text{Aire utilizado}}{\text{Aire estequiométrico}} \quad (2.1)$$

El exceso de aire vendrá dado por:

$$\% \text{exceso_aire} = (n - 1) \times 100 \quad (2.2)$$

Otra forma de expresar esta relación es conocida como **RATIO**, y está expresada por:

$$RATIO = \frac{Nm^3 \text{ Aire}}{kg/Nm^3 \text{ combustible}} \dots\dots\dots(2.3)$$

La combustión con exceso de aire es la habitualmente utilizada, para tener la seguridad de que el combustible se quema totalmente (combustión completa). Entre los productos de la combustión (gases de combustión o humos) se encuentra, además de los compuestos ya señalados (CO₂ y H₂O), el oxígeno y el nitrógeno del aire aportado en exceso y que no es necesario para la combustión. Parte de la capacidad calorífica del combustible se gasta en calentar este aire que no interviene en la combustión.

En general se llama proporción aire/gas estequiométrica a aquella que asegura la combustión completa con el mínimo exceso de aire posible.

Incompleta:

La combustión incompleta se produce cuando se aporta menor cantidad de oxígeno (o aire) que el estrictamente necesario para quemar el combustible.

Entre los productos de la combustión (gases de combustión o humos) aparecerá monóxido de carbono (CO) e incluso moléculas no quemadas del propio combustible (inquemados). Al no completarse la combustión no se obtiene toda la capacidad calorífica disponible en el combustible aportado, desperdiciándose combustible y calor.

Por otra parte, la presencia del monóxido de carbono en los humos puede provocar post-combustiones peligrosas.

Imperfecta:

La combustión imperfecta se produce cuando se aporta aire en exceso, pero la combustión no es completa.

Los productos de la combustión (gases de combustión o humos) contienen todos los constituyentes de una combustión con exceso de aire y, además, moléculas no quemadas del propio combustible (inquemados).

Esta situación puede ser provocada por defectos en el estado o configuración de los quemadores, excesos de aire exagerados, alta presión en la cámara de combustión, etc.

Una de las formas de empíricas de poder conocer la calidad de un proceso de combustión, es mediante la visualización de la llama, otra alternativa, es tener la instrumentación adecuada que permita medir en línea, por ejemplo, la cantidad de O₂ que queda como resultado de la combustión, esto potencialmente permite tener un mejor control del proceso, pero la visualización de la llama permite una aproximación muy buena, y sobre todo cuando es hecha por personas expertas. Éste es el caso de Aza Renca, que durante el desarrollo de este trabajo, tuvo la visita en dos ocasiones de expertos provenientes de Alemania y Brasil, y tuvo como resultado la instauración de una metodología para la obtención de una combustión que estuviera muy cerca del ideal, esta metodología se basa

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

en curvas proporcionadas en [2] y consiste en tabular el RATIO para diferentes caudales y de acuerdo al combustible, sea este gas o petróleo diesel. Lo propuesto por el experto se basa en seguir dichas curvas de manera de encontrar el volumen de aire que asegure la máxima temperatura de llama para un caudal dado tal como se muestra en la figura 2.3. Si bien es cierto la figura hace mención sólo a combustión con gas natural, también es válida para otros combustibles como el petróleo diesel. En la figura se presenta la relación aire combustible como lambda (λ)¹.

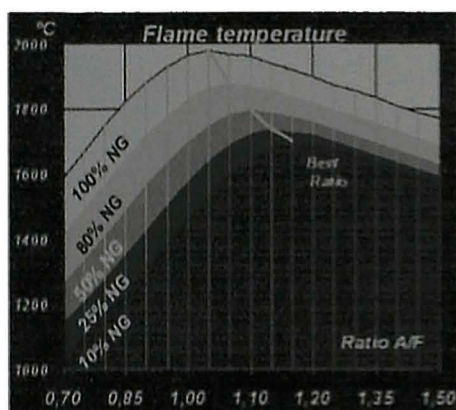


Figura 2.3 Metodología para mejorar tablas de ratio.

Cuando se está en presencia de exceso de aire, se pueden identificar tres problemas: primero se tiene un considerable aumento de laminilla en la superficie del material (menor rendimiento metálico) al tener una atmósfera conocida como oxidante (facilita la oxidación), además hay pérdidas de energía a través de los gases de combustión, ya que este exceso de aire no toma parte del proceso de combustión, es decir, sólo se ha calentado innecesariamente el exceso de aire, por último, este exceso de aire enfría la temperatura de la llama desfavoreciendo el calentamiento de las piezas de acero. En el caso que exista

¹ Lambda es una de las formas de presentar la relación aire/combustible en función de la relación estequiométrica, así, si lambda es 1 no existe exceso de aire, si lambda es 1,1 existe un 10% de exceso de aire respecto de la cantidad estequiométrica.

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca
deficiencia de aire no es posible quemar todo el combustible por lo que en este caso tampoco es posible tener la temperatura máxima para un caudal dado.

Atomización de diesel

Lo antes expuesto en relación a la mezcla de aire y combustible para llevar a cabo el proceso de combustión, aplica muy bien cuando se trata de combustible como el gas natural, esto por su naturaleza gaseosa, ahora cuando se quiere combustionar un combustible líquido, como lo es el petróleo diesel, es necesario disponer de un medio de pulverización o atomización del combustible, esto es necesario para que el combustible líquido pueda tener el mayor contacto posible con el aire de combustión y así tener un aprovechamiento máximo de la capacidad calórica del combustible.

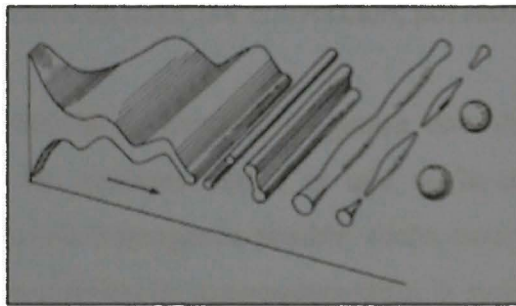


Figura 2.4 Atomización de petróleo diesel

La atomización se realiza en el quemador, inyectando aire a alta presión de manera que se produzca el efecto que se aprecia en la figura 2.4 donde se ve que el combustible es pulverizado para que tenga mayor superficie de contacto con el aire de combustión.

El proceso de combustión genera gases de combustión que alcanzan una temperatura 800°C , es aprovechada mediante un recuperador de calor, para aumentar la temperatura del aire de combustión, el que se precalienta en torno a los 400°C , otro factor importante que se logra es disminuir la temperatura de humos que son liberados a la atmósfera, por otro lado el precalentamiento del aire de combustión permite un ahorro

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca
energético considerable, cercano al 20 o 25% según [1], en comparación con aire de combustión a temperatura ambiente. En las instalaciones del horno de recalentamiento de Aza Renca, se cuenta con un recuperador de calor tipo canal que lleva a cabo este aprovechamiento de energía, el intercambio de calor es por convección y los flujos, de los gases y del aire de combustión, son en contracorriente.

2.2.5 Transferencia de calor en el acero

En el interior de la bóveda del horno, a medida que la carga es trasladada en contra corriente a los gases de combustión y de la llama, la energía o calor que es entregada por los quemadores, es transferida al acero por las tres formas existentes de transferencia de calor, las que son: transferencia de calor por convección, por radiación y por conducción.

Una buena transferencia de energía, asegurará uno de los objetivos de diseño principales de un horno de recalentamiento, el que es la obtención de un perfil de temperatura en la carga lo más homogénea posible, dicha homogeneidad se traduce en la obtención de una diferencia mínima de temperatura entre la superficie de la pieza de acero y el centro de ésta, diferencia que para evitar problemas en tren laminador y lograr productos de calidad no debe superar idealmente los 40 °C aproximadamente.

En la figura 2.5 se muestra como evoluciona la temperatura en la superficie y en centro de la pieza a medida que es transportada en el interior del horno. También se presenta en dicha figura el flujo calórico transferido al acero.

Un estudio acucioso de la transferencia de calor en el acero, se escapa de los objetivos de éste trabajo, no obstante, se presenta de acuerdo a lo expuesto [Iecuona], curvas características, figura 2.4 empíricas en el proceso de transferencia de calor en una pieza de acero en horno de similares características al que está en cuestión.

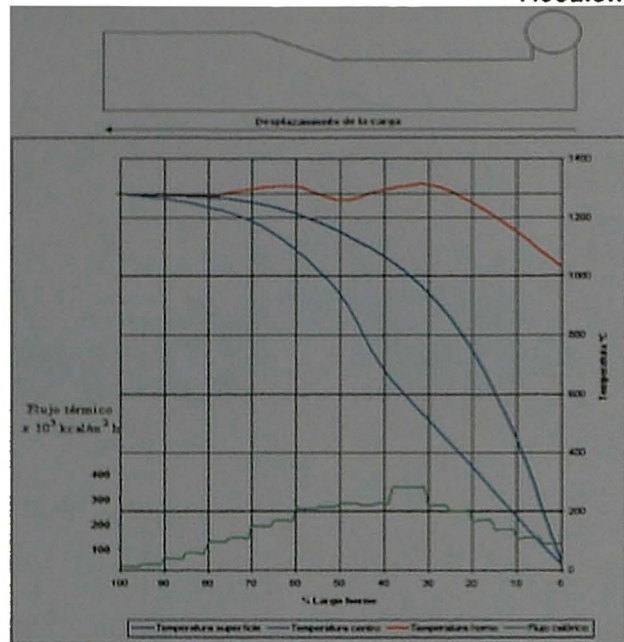


Figura 2.5 Temperatura y flujo de calor a lo largo de un horno

La transferencia de calor, depende directamente de la conductividad, la que varía con la temperatura y con la calidad del material. Adicionalmente, a baja temperatura, en la zona de carga o enhornamiento, se tiene un gradiente mayor entre la temperatura del horno y la temperatura de la pieza a calentar, lo que favorece el flujo de calor que penetra en el acero. Por ello, puede observarse que aproximadamente el 85% de la cantidad de calor total absorbida por el acero es cedida en la primera mitad del horno, cerca de la zona de carga tal como se deduce de la variación de flujo calórico.

Por otra parte, la mayor transferencia de calor en la zona más caliente del horno tiene lugar por radiación (más del 90%), tanto de llama y humos como de bóveda y paredes. Para favorecerla hay que crear una atmósfera radiante en el horno, exenta de polvo y hollines que la perturben, lo que se logra con unos gases ricos en CO_2 (combustión con un exceso de aire), y vapor de agua, que son buenos radiantes de infrarrojo. En estas condiciones, la radiación de los gases aporta aproximadamente el doble de calor a las piezas que la radiación de paredes y bóveda, figura 2.6. Se observa que transferencia de calor por convección es sumamente reducida.

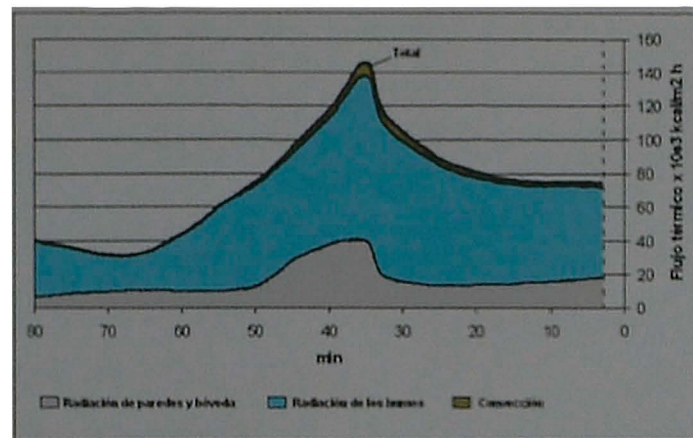


Figura 2.6 Flujo térmico a lo largo de horno de empuje.

Si bien es cierto, estas curvas son de un horno de empuje para una palanquilla de 80 [mm] de sección, representan muy bien lo que sucede en un horno como el de Aza Renca.

2.3 Control de Hornos de recalentamiento.

2.3.1 Niveles de control en hornos de Recalentamiento

En un horno de recalentamiento se pueden describir 5 niveles de control:

Tabla 2.1 Niveles de control en un horno de recalentamiento.

Nivel	Elemento
Cero	Campo (sensores, accionadores, etc.)
1	Panel de control de temperatura
2	Gerenciador (envía set point a nivel 1)
3	Gestión de planta
4	Corporativo

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

Este apartado se centra en el control Nivel I, encargado de mantener todas las magnitudes físicas asociadas al funcionamiento de un horno de manera que este se encuentre en una temperatura deseada en un momento dado, por lo tanto, el punto de operación siempre estará definido por la temperatura que se desee en el horno, ajustándose en forma automática las variables a controlar, en el nivel I del horno de Aza Renca dichas son las siguientes:

- Caudal, presión y temperatura de Aire de Combustión
- Caudal de combustible (Gas o Diesel)
- Caudal de Aire de atomización.

La estructura de control jerarquizada del actual del sistema de control con el que cuenta Aza Renca se muestra en la figura 2.7.

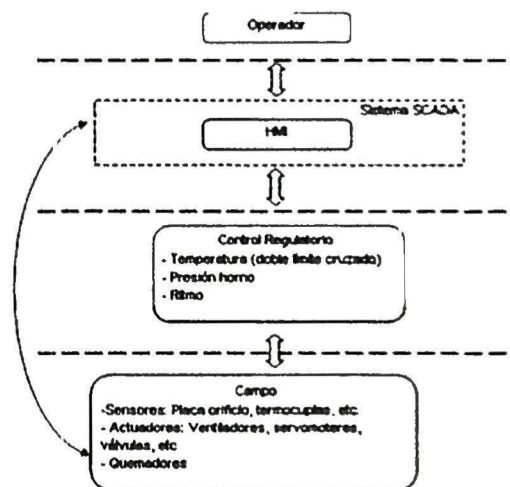


Figura 2.7 Estructura sistema de control Horno de recalentamiento.

Actualmente el horno es operado de modo manual y remoto, no habiendo un modo automático que gerencie la consigna del lazo de control de temperatura. En modo manual el operador manipula todos los actuadores de manera directa, en modo remoto, el operador puede manipular sólo la consigna de temperatura de bóveda, que desencadena el sistema de control de doble límite cruzado que se expone a continuación.

A continuación se presentan las características de distintas técnicas para el control de combustión que se pueden presentar en el nivel I o regulatorio antes descrito, para luego describir los distintos lazos de control antes mencionados.

2.3.2 Técnicas de control de combustión

Se mencionó que una buena combustión se obtiene, con una relación entre el aire y el combustible lo más cercana a la relación estequiométrica. Para alcanzar esta relación entre el aire y el combustible, y no tener exceso de aire o exceso de combustible, se han desarrollado distintas técnicas que han evolucionado en el tiempo, en la tabla 2.2 se presentan distintas técnicas para el control de la combustión junto con sus características.

Tabla 2.2 Técnicas de control de combustión.

Técnica	Característica
Aire tira Combustible	A falta de combustible habrá exceso de aire comprometiendo la calidad. • Incremento temperatura: ocurre exceso de aire. • Decremento temperatura: ocurre exceso de combustible.
Combustible tira Aire	A falta de aire habrá exceso de combustible comprometiendo la seguridad • Incremento temperatura: ocurre exceso de combustible. • Decremento temperatura: ocurre exceso de aire.
Paralelo	• A falta de aire habrá exceso de combustible. • A falta de gas habrá exceso de aire.
Cascada con límites cruzados	• A falta de combustible habrá exceso de aire comprometiendo la calidad
Cascada con doble límite cruzado	• Control eficaz de exceso de aire y combustible, no habiendo compromiso de calidad y seguridad.

El control en paralelo con doble límite cruzado, es hoy, una de las más innovadoras aplicaciones en términos de control de combustión. En este tipo de control, el controlador de temperatura actúa en cascada y en paralelo con los controladores de flujo de aire y combustible. En operación normal el lazo trabaja como un típico control paralelo en cascada, pero es en los transientes donde sus ventajas son percibidas. Este control permite mantener un máximo exceso de aire o combustible cuando ocurre un incremento o decremento de los caudales en respuesta a un cambio en la consigna de temperatura, esto se logra por los dobles límites cruzados definidos como:

- $K1$ - determina el máximo exceso de gas cuando el calentamiento es hacia arriba.
- $+ K2$ = determina el máximo exceso de aire cuando el calentamiento es hacia abajo.
- $K3$ - determina el máximo exceso de aire cuando el calentamiento es hacia arriba.
- $+ K4$ - determina el máximo exceso de gas cuando el calentamiento es hacia abajo.

En la figura 2.8 se muestra el diagrama de control en cascada con dobles límites cruzados. Donde se aprecia los lazos que intervienen en el control de temperatura, estos son:

- Lazo de control PID de temperatura donde la variable de proceso es la temperatura del horno.
- Lazo de control del caudal de aire de combustión. Variable de proceso corregida por la temperatura cuyo elemento final de control es la válvula de regulación de aire.
- Lazo de control del caudal de combustible. Variable de proceso con su elemento final de control la válvula de regulación de combustible.

Controlador de proporción: Cuya función es mantener la relación entre el aire y combustible con el fin de mantener una atmósfera interior del horno en las condiciones deseadas. La variable final de control es la relación (Ratio, FK).

La lógica de funcionamiento del control en cascada con doble límite cruzado es la siguiente:

A partir de la medida de temperatura se desencadena el control en cascada, cuyo objetivo final es conseguir y mantener la temperatura del horno en la consigna establecida. Cuando existe un error entre la temperatura demandada y la temperatura real, el PID de temperatura realiza el cálculo cuya salida de control será la consigna de demanda de potencia. Ante una variación de la potencia, demandada por el PID de temperatura, el doble límite cruzado controla de acuerdo si la demanda es positiva o negativa.

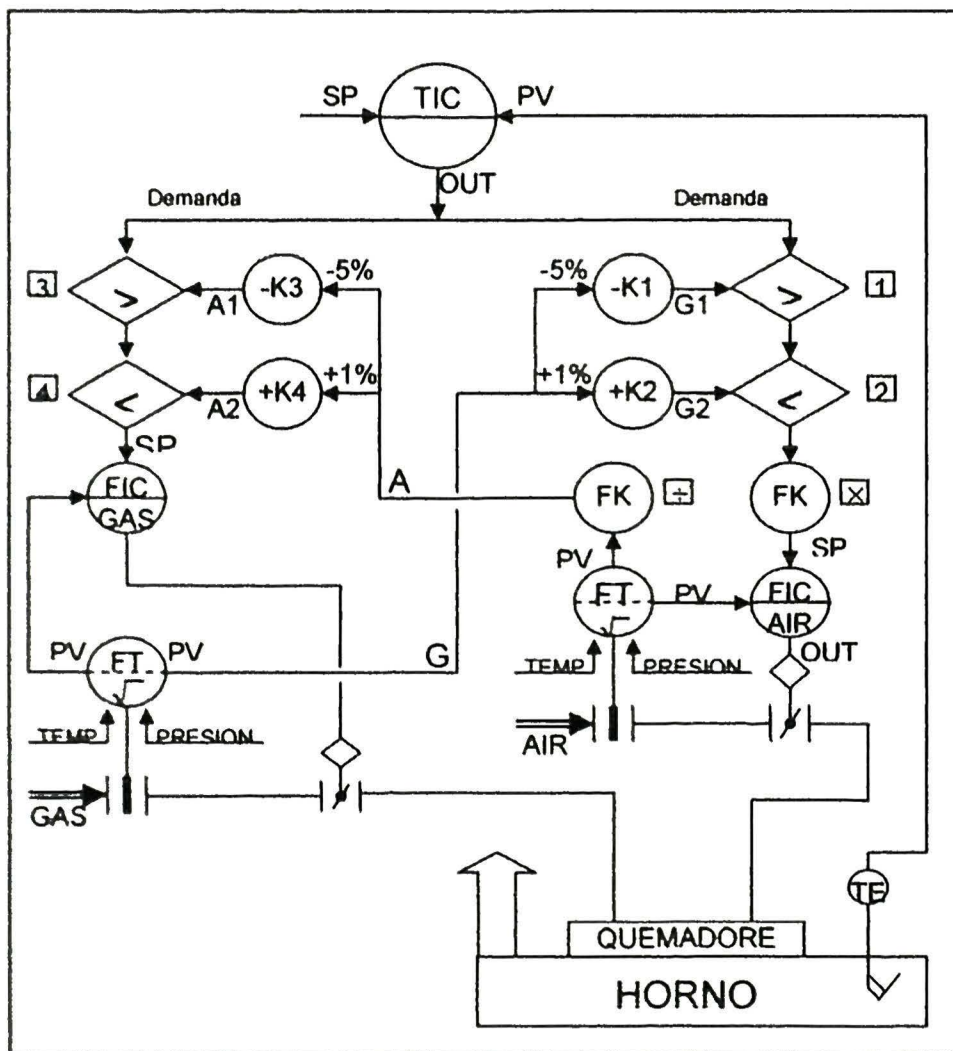


Figura 2.8 Control de combustión en paralelo con doble límite cruzado.

Cuando la demanda es positiva actúa primero aportando más aire y el combustible seguirá al aire manteniendo la relación que se haya fijado (SP de RATIO), con la particularidad de que la relación será predominante a la consecución de la temperatura, pudiéndose dar el caso de que no se pueda aportar toda la potencia existente porque alguno de los fluidos, aire o combustible, no consiga los valores demandados, por lo tanto se deduce que en un control con doble límite cruzado es predominante la relación aire combustible (RATIO).

Cuando no se consigue toda la potencia, el doble límite congela ó hace retroceder el fluido que va adelantado, tanto en un sentido como en el otro, para que la relación se cumpla. Mientras dura este ajuste se mantiene bloqueada la demanda de potencia. Cuando la demanda es negativa el doble límite actúa sobre el combustible cerrándolo hasta los valores calculados y en este caso es el aire quien seguirá al combustible manteniendo siempre la relación.

La relación aire combustible o RATIO está representada en el diagrama por FK y corresponde a una tabla en función del caudal de combustible y distinta para cada combustible. En Aza Renca se dispone de la tabulación del RATIO en función del caudal de combustible ya sea este gas o petróleo diesel, existiendo una rutina de interpolación lineal para el cálculo de RATIOS entre rangos. La tabulación de la que se dispone se muestra en tabla 2.3

Tabla 2.3 RATIO para gas y diesel

Nm3Aire/Nm3GN		Nm3Aire/kgDiesel	
RATIO Gas/Aire		RATIO Diesel/Aire	
Caudal Nm3/h	RATIO	Caudal kg/h	RATIO
70,0	12,5	80,0	13,0
200,0	12,0	120,0	13,0
350,0	11,5	300,0	12,5
550,0	10,8	500,0	12,0
780,0	10,4	600,0	11,5

2.3.3 Control de presión interna de bóveda y presión de aire de combustión.

El control de la presión interna o presión de bóveda, según lo expuesto en [8], afecta las pérdidas por los gases de combustión a través de las aberturas del horno como también el ingreso de aire frío al interior del horno por dichas aberturas. Se entiende que con una presión en el interior del horno mayor a la ambiental, las pérdidas por gases de combustión pueden ser tan altas que puede llegar a ser necesario, por ejemplo, aumentar la capacidad de los quemadores para compensar esto. El aumento de temperatura en los gases también destruye la vida útil del recuperador de calor. Por otro lado, con una presión interna más baja que la presión de la atmósfera circundante al horno, la filtración de aire frío causa una disminución en la temperatura de la bóveda con el consecuente aumento en el consumo de combustible para mantener la temperatura deseada. El ingreso de aire frío también ayuda a la oxidación del acero disminuyendo el rendimiento metálico del laminador. No obstante, debe señalarse que el espesor de la cascarilla o su peso, formado en cada unidad de superficie de la carga, depende más de la temperatura del horno y del tiempo de exposición a estas temperaturas.

Es por esto, que la atmósfera interior del horno debe mantenerse en forma neutra, es decir, que no ingrese aire frío al interior del horno ni perder energía por el escape de gases calientes de combustión. Una metodología de control y que es la empleada en el horno de Aza Renca se muestra en la figura 2.9.

La señal de presión medida en el interior del horno es comparada con la presión en el exterior del mismo y transmitida al regulador de presión. Este regulador en función de la consigna establecida actuará sobre la válvula de regulación de tiro instalada en el conducto de humos aumentando o disminuyendo el tiro de la chimenea.

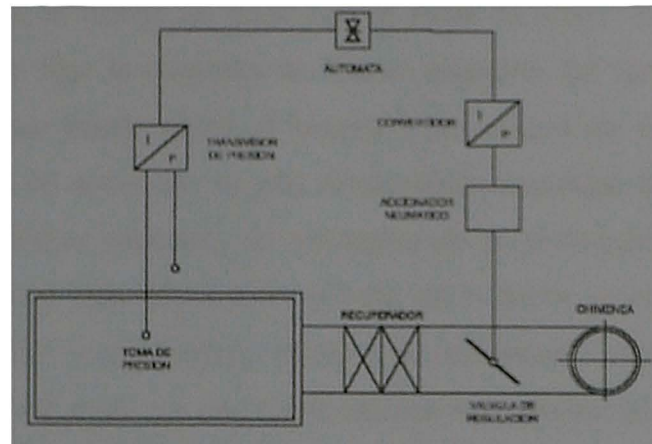


Figura 2.9 Control presión interna de horno

Otro variable a controlar en un horno de recalentamiento y en cualquier sistema de control de combustión es la presión del aire de combustión. Es preciso mantener constante la presión en los quemadores para que estos se encuentren alineados, y el mayor agente perturbador de este equilibrio es precisamente la presión del aire de combustión. El control de presión de un flujo de aire se puede obtener de dos maneras, una con un “damper de entrada” que se encuentra a la salida del ventilador que provee el aire, y otra manejando las RPM del motor del ventilador. El set point de la presión del aire de combustión viene dado por la mínima presión que permita obtener, a un máximo de apertura de válvula controladora de flujo, el caudal nominal aceptado por los quemadores. En el caso de que el control de presión se realice por un variador de frecuencia, la acción de control es inversa, pues en el caso de presentarse una baja en la presión de línea, es necesario aumentar las revoluciones por minuto del variador de frecuencia que controla el motor del ventilador, en caso de existir un damper, éste debe cerrarse por medio del servomotor correspondiente, por lo que la acción de control es directa.

2.3.4 Control del Ritmo de descarga

La mecánica de traslación de la carga debe ser controlada de forma tal, que se pueda tener un tiempo constante entre descarga y descarga de barras. Con esto es posible saber,

entre otros parámetros, el tiempo de residencia de pieza de acero en el interior del horno con el sólo hecho de fijar la consigna de Ritmo, ecuación 2.4 (conociendo además la cantidad de barras que puede alojar el horno). Este control de ritmo es crítico pues dependiendo del tipo de acero que se esté recalentando (cantidad de carbono) se puede estimar el tiempo mínimo necesario de residencia de la palanquilla de manera que la diferencia entre la parte más fría y más caliente de la pieza se encuentre en el rango aceptable. Cabe recalcar que el tiempo mínimo de residencia depende directamente del contenido de carbono del acero, ya que a más carbono mas tiempo debe estar la pieza en el interior dado que el carbono no es buen conductor de calor.

El ritmo se define como piezas descargadas y laminadas por unidad de tiempo, es decir,

$$RITMO = Frecuencia (f) \quad (2.3)$$

La capacidad nominal de barras que se encuentran en el interior del horno permite conocer el tiempo de residencia de cada barra para distintos ritmos, estos es

$$\text{Tiempo de residencia} = \frac{\text{Capacidad de barras horno}}{\text{ritmo}} \quad (2.4)$$

La consigna de ritmo es función del producto o campaña a laminar, en particular en el horno de Aza Renca se tiene como límite un SP de 54b/h y que es la capacidad máxima que se ha logrado después de un conjunto de modificaciones que se han hecho al horno desde su puesta en marcha. El ritmo de descarga del horno viene dado por el cuello de botella que se puede encontrar a lo largo del conjunto horno-laminador, cuando se tiene el ritmo máximo es porque el cuello de botella es justamente el horno, ahora bien, se encuentran productos, por ejemplos los más pequeños, en que la parrilla de enfriamiento es el cuello de botella, por lo que el ritmo de descarga se baja al valor que puede acoger la parrilla de enfriamiento. Otro cuello de botella, por ejemplo en el tren laminador, es la velocidad de corte que tienen las cizallas en el tren laminador.

En Aza Renca la consigna de ritmo se maneja de acuerdo a los históricos que el hornero maneja, así si en la última campaña de un plano de 25x3 se logró una descarga de 50b/h, es éste el ritmo a setear.

2.4 Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

Para la operación de un equipo industrial se debe tener absoluto conocimiento de sus capacidades de diseño y hasta donde se puede llevar la operación en pos de una mayor producción o productividad. En el caso del horno de recalentamiento de Aza Renca, se cuenta con horno que originalmente fue diseñada para producir 15 t/h. Mediante un cambio en el combustible utilizado y de los tipos de quemadores que se disponían se logró llevar esa capacidad a 18 t/h, pero con el tiempo y bajo estas últimas condiciones, pero con un pequeño cambio en las dimensiones de la pieza de acero a recalentar, se logró una producción de hasta 22 t/h. Este nivel de producción es pocas veces alcanzado, pero la operación siempre está enfocada en alcanzar estos niveles. En la tabla 2.4 se muestra un resumen de las principales dimensiones y características actuales del horno de Aza Renca.

Tabla 2.4 Dimensiones del horno de recalentamiento de Aza Renca

Ancho Interior (mt)	3,40
Largo útil (mt)	12,50
Ritmo de descarga (barras/hora)	54
Paso de la Palanquilla (mm)	176
Largo de barra (mm)	2900 – 3200
Tiempo de Calentamiento (min)	66,67

Actualmente el horno trabaja a un ritmo de descarga máximo de 54 barras/hora lo que le da a la pieza de acero una residencia en el interior de horno de 67 minutos, teniendo la capacidad de recalentar en forma nominal 22 t/h. Cabe resaltar que este límite del ritmo de

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

descarga lo entrega el delta de temperatura entre la parte más caliente y más fría de la pieza de acero, pues mientras un mayor de ritmo de descarga se tendrá un menor tiempo de residencia de la pieza en el interior del horno, por lo que este delta será mayor y tendrá que ser absorbido por el tren de laminación, por ejemplo, con quiebres de cilindros.

Modos de operación del Horno de recalentamiento

Los modos o estados de operación en el horno se pueden dividir en cuatro modos:

- Detención
- Ajuste del laminador
- Partida
- Producción

2.4.1 Modo Detención

La naturaleza de una detención puede ser diversa y las podemos subdividir en paradas programadas, que pueden ser por mantenimiento, cambio de producto o cambio de turno y las interrupciones del proceso, las cuales son más diversas aún y no dependen exclusivamente del horno

La diferencia de una parada programada respecto a una interrupción radica en que en la primera sabemos a priori cuando será y cuanto durará dicha detención, caso contrario en una interrupción, que se puede presentar en cualquier momento mientras se está en producción y tampoco se sabe cuanto será su duración.

Actualmente las detenciones o paradas programadas junto con las interrupciones son trabajadas de acuerdo a un padrón de operación mostrado en la tabla 2.5, la que está en

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca
 función del tiempo que tendrá la detención y donde el operador está encargado de actuar sobre el SP de temperatura y la rampa² del horno.

Tabla 2.5 Extracto de padrón de operación Temperatura de Horno en detenciones

Parada programada o interrupción se deberá trabajar con la siguiente tabla:			
Duración	Gas natural	Petróleo Diesel	
15 min.	1240°	1320°	.- 1 Espacio en la carga
30 min.	1240°	1300°	.- 2 Espacio en la carga
45 min.	1220°	1280°	.- 2 Espacio en la carga
60 min.	1220°	1240°	.- 2 Espacio en la carga
90 min.	1180°	1180°	.- 2 Espacio en la carga
120 y + min.	1100°	1100°	.- 2 Espacio en la carga

Los espacios que se dejan en la carga nacen de la experiencia de personal a cargo del equipo, dado que debido a la disposición de los quemadores, las barras próximas a salir pierden temperatura comprometiendo una buena laminación. Eventualmente esto se podría solucionar, por ejemplo con una llama más corta por ejemplo, pero el diseño de quemadores no permite combustionar de manera eficiente por debajo del 20% del caudal nominal de diseño.

Como los quemadores de los que se disponen no son capaces de combustionar en forma eficiente caudales bajos, es necesario utilizar otra estrategia de control que permita obtener temperaturas bajo los 1100°C, esto por que si pensamos que el caudal mínimo a combustionar, para diesel, será de 140kg/h, difícilmente se logrará una temperatura inferior, para ello se utiliza una estrategia de control que emula el control PWM (pulse width modulation) conocida como CUT-OFF, así para poder obtener una temperatura de 800°C

² La rampa se define como los °C/h en que se quiere que la temperatura de bóveda o zona alcance el nuevo SP, y la que puede ser cambiada por el operador.

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca
función del tiempo que tendrá la detención y donde el operador está encargado de actuar sobre el SP de temperatura y la rampa² del horno.

Tabla 2.5 Extracto de padrón de operación Temperatura de Horno en detenciones

Parada programada o interrupción se deberá trabajar con la siguiente tabla:			
Duración	Gas natural	Petróleo Diesel	
15 min.	1240°	1320°	.- 1 Espacio en la carga
30 min.	1240°	1300°	.- 2 Espacio en la carga
45 min.	1220°	1280°	.- 2 Espacio en la carga
60 min.	1220°	1240°	.- 2 Espacio en la carga
90 min.	1180°	1180°	.- 2 Espacio en la carga
120 y + min.	1100°	1100°	.- 2 Espacio en la carga

Los espacios que se dejan en la carga nacen de la experiencia de personal a cargo del equipo, dado que debido a la disposición de los quemadores, las barras próximas a salir pierden temperatura comprometiendo una buena laminación. Eventualmente esto se podría solucionar, por ejemplo con una llama más corta por ejemplo, pero el diseño de quemadores no permite combustionar de manera eficiente por debajo del 20% del caudal nominal de diseño.

Como los quemadores de los que se disponen no son capaces de combustionar en forma eficiente caudales bajos, es necesario utilizar otra estrategia de control que permita obtener temperaturas bajo los 1100°C, esto por que si pensamos que el caudal mínimo a combustionar, para diesel, será de 140kg/h, difícilmente se logrará una temperatura inferior, para ello se utiliza una estrategia de control que emula el control PWM (pulse width modulation) conocida como CUT-OFF, así para poder obtener una temperatura de 800°C

² La rampa se define como los °C/h en que se quiere que la temperatura de bóveda o zona alcance el nuevo SP, y la que puede ser cambiada por el operador.

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca
por ejemplo, se queman 140kg/h en porcentajes de ciertos periodos de tiempo de tal forma que en promedio el combustible combustionado sea, por ejemplo de 80kg/h en ese periodo.

En la figura 2.10 se muestran datos reales donde se ve el funcionamiento del CUT-OFF para cuando hay un cambio de SP desde 1200°C a 800°C

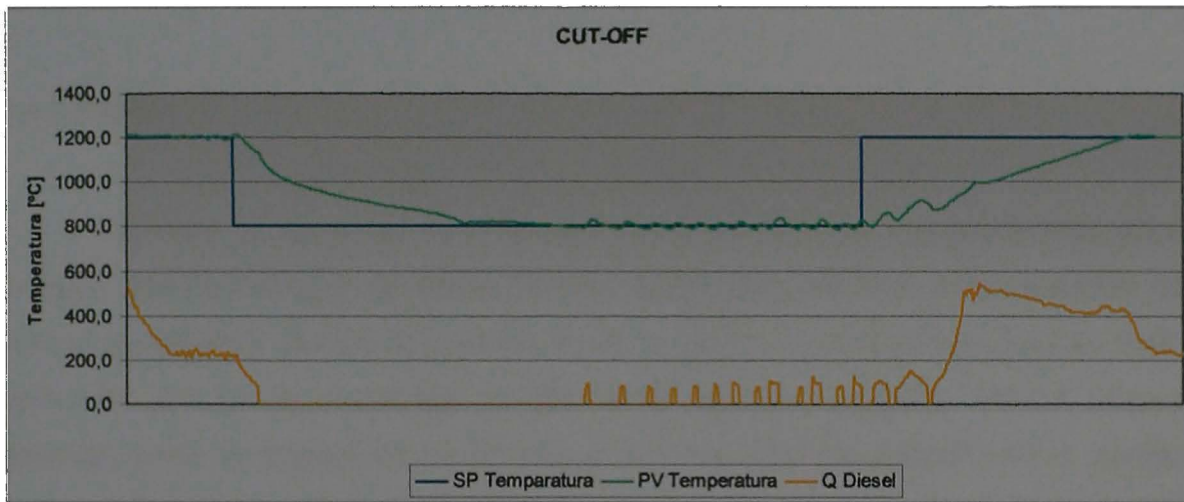


Figura 2.10 CUT-OFF para bajos caudales.

2.4.2 Ajuste del laminador

El modo de ajuste del laminador se presenta cada vez que se tiene una parada programada, y tiene como objetivo ajustar los Stand del tren laminador para obtener la medida y calidad del producto deseado. En este caso el Horno de recalentamiento se lleva a la temperatura mínima en donde es capaz de deshornar una barra a ritmo cero, es decir, se descarga una única barra o las que sean necesarias para el ajuste en modo manual.

La temperatura necesaria para poder descargar una barra con temperatura de laminación también es distinta según el tipo de combustible. Esto no se tiene padronizado,

pero la según la experiencia de operadores cuando se trabaja con GN la consigna de temperatura de zona es de 1200°C y para cuando se trabaja con diesel el SP es de 1280°C. Estos valores de consigna son muy importantes a la hora de pretender automatizar las tareas del operador, pues es un punto al que se puede llevar la temperatura de zona y estar preparado para descargar barra en cualquier momento, sobre todo para diseñar estrategias que ataquen las interrupciones.

2.4.3 Partida

Tal como se mencionó en el apartado anterior, luego de una parada programada, siempre viene un periodo de ajuste del tren, ahora bien, una vez el tren ajustado para obtener la calidad y medida de la nueva colada se inicia el proceso de producción. Para el inicio del proceso de producción se debe llevar en forma paulatina, tanto el ritmo de descarga como la temperatura de bóveda, a su nivel máximo nominal para el producto dado, procedimiento que tampoco se encuentra padronizado y que es puesto en práctica sólo en ocasiones por el operador.

2.4.4 Producción

En el estado de producción el operador es quien supervisa la calidad del calentamiento que llevan las barras hacia el tren de laminación, para eso cuenta con la medición de la temperatura superficial de la barra después que ésta pasa el 2º pase del tren desbastador. Ahora la mayor referencia que utiliza es la visual y el golpe que tiene la barra al entrar en cada pase del desbaste, y en base a esto toma la decisión de aumentar o disminuir la temperatura del horno.

La consigna de temperatura está relacionado únicamente con el ritmo de descarga al que se trabaja un producto dado, y como se mencionó en un apartado anterior este ritmo

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca
depende de qué equipo es el cuello de botella a lo largo de todo el tren laminador, incluido el horno.

En estos momentos se cuenta sólo con un padrón de operación, que se muestra en la tabla 2.6, y que se toma como referencia para parte del diseño del sistema de control supervisor.

Tabla 2.6 Extracto padrón de operación Temperatura de Horno por cantidad de barras

RANGOS DE TEMPERATURA IDEAL			
Cantidad Palanquillas	Toneladas Hora	Gas Natural	Petróleo diesel
25	10	1230°C	1290°C
33	13	1240°C	1300°C
44 - 50	16 – 18	1260°C	1340°C
50 - 54	18 – 20	1280°C	1350°C

En producción normal el operador tiene la facultad de detener la descargar automática de barras pasándola a manual, por ejemplo cuando se presenta una interrupción en el tren laminador, caso en que dependiendo del tiempo de duración de la interrupción fijará el SP de zona de acuerdo al padrón de operación presentado en el apartado anterior.

Como se ha presentado a lo largo de este capítulo, gran parte de las tareas de operación, por no decir todas, son hechas por el operador sin existir un control supervisor o de nivel 2, y los métodos para la toma de decisiones son casi absolutamente basados en la experiencia de operadores y técnicos encargados del equipo, quienes son los encargados de generar los padrones.

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

2.5 Recopilación y Análisis de Datos

La red industrial con la cuenta Aza Renca cuenta con un sistema de gestión operacional soportada en el SCADA iFix2.5³, en el cual se tiene, además del programa y seguimiento completo de producción del laminador, tendencias históricas de las variables de proceso a las que se puede tener acceso desde cualquier computador conectado a la red. La pantalla desde la cual se puede acceder a las variables de proceso del horno y del laminador se puede ver en la figura 2.11. Desde acá se pueden desplegar gran parte de las variables de proceso en donde se puede configurar la duración del gráfico, el tiempo de muestreo de datos y la fecha que se desea desplegar con tendencias históricas de hasta tres meses.

Con esta herramienta es posible exportar datos en formato .CSV y de donde se recopiló gran parte de los datos para realizar el análisis que sigue. La limitante de este método de recolección de datos es que el mínimo tiempo de muestreo posible es de 30s por lo que, por ejemplo, para la recolección de los datos de corriente no es posible utilizarlo, en este caso se recurrió a un osciloscopio Fluke y desde terreno se recopilaron dichos datos.

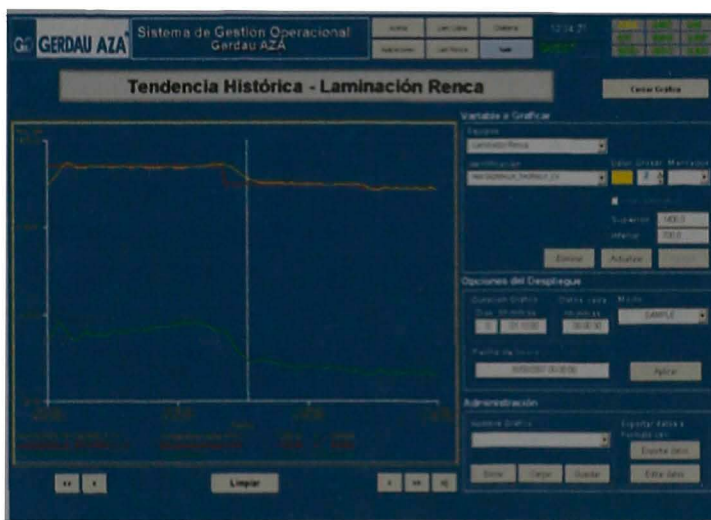


Figura 2.11 Pantalla para exportar tendencias históricas de datos.

³ SCADA iFix2.5: Supervisory Control And Data Acquisition, software de automatización desarrollado por Intellutions

El siguiente análisis de datos se divide en dos partes, la primera intenta mostrar la disparidad de criterios en la operación del horno de recalentamiento que sirva para fundamentar la necesidad de tener un sistema de control supervisor que gerencia la consigna de temperatura del horno, entre otras variables, para eliminar la variabilidad en el proceso de recalentamiento; y la segunda parte muestra la distribución de las corrientes presentes en el tren desbastador y la distribución de temperatura de barra cuando ésta pasa por el desbaste con el fin de diseñar las funciones de pertenencia en que se basará la fuzzificación del sistema corrector de temperatura basado en lógica difusa, diseño que presenta en el próximo capítulo.

2.5.1 Consigna de temperatura real en función del Ritmo de Descarga.

La fijación del Consigna de temperatura del horno es tarea exclusiva del hornero, y como se comentó en un apartado anterior obedece a la tabla 2.6. También se mencionó que el padrón de operación permite variabilidad innecesaria por contar con rangos de operación. En la figura 2.12 se muestra un levantamiento de datos en donde se puede apreciar los distintos Consigna de temperatura para un ritmo de descarga de 54b/h, en la figura 2.12a) se muestra la frecuencia para el funcionamiento con diesel y en b) para el funcionamiento con gas natural.

Se puede apreciar en las frecuencias de consigna que es posible laminar productos con una temperatura de bóveda de 1300°C, pero la mayoría de los turnos trabajan con una temperatura de 1330°C incluso a 1340°C.

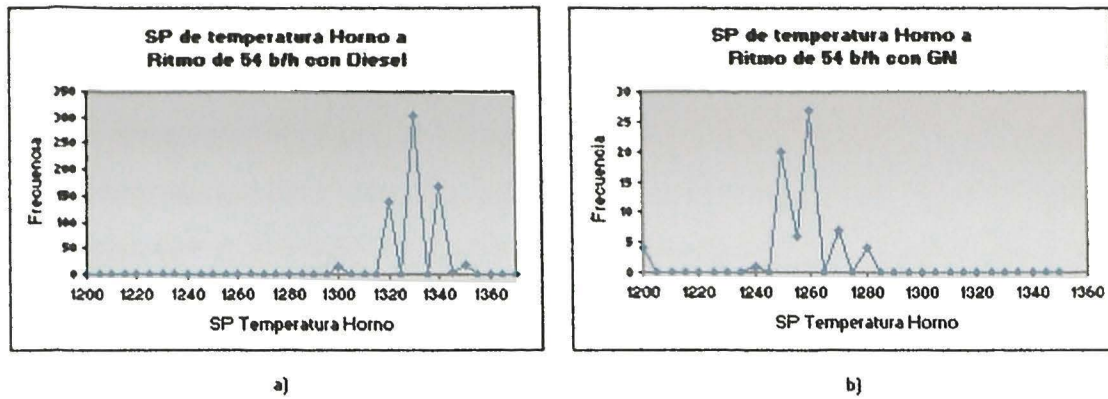


Figura 2.12 Frecuencia de Consigna para ritmo de 54 b/h.

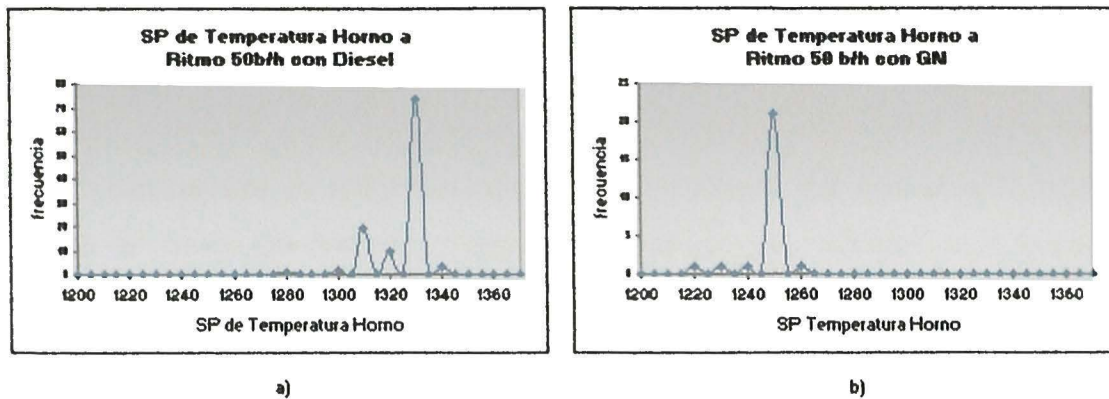


Figura 2.13 Frecuencia de Consigna para ritmo de 50 b/h.

En la figura 2.13 se puede ver que un cambio de ritmo no escapa de tener variabilidad, en ambos casos hay horneros que trabajan a distintas temperaturas encontrándose bajo las mismas condiciones

Para decidir trabajar con 30°C menos o 30°C más el operador tiene dos tipos de referencia, estas referencias se dividen en:

- Medición de temperatura superficial de barra en el segundo pase por el desbaste.
- Basado en su experiencia utilizando dos criterios:
 - Chequeo visual de la barra.

- Percepción auditiva del motor del tren desbastador.

La percepción del operador se tratará de representar, de acuerdo a la opinión del experto asesor de Aza Renca, por las corrientes presentes en el motor del tren desbastador, bajo la lógica que si la diferencia de temperatura entre la superficie y centro de la barra es muy alto, es decir, un deficiente calentamiento de la pieza de acero, las corrientes deben de aumentar, en caso contrario la corriente debe disminuir, pues el trabajo para reducir la sección transversal de la barra es menor.

2.5.2 Relación de temperatura de barra y corriente del Tren Desbastador versus Temperatura de Bóveda.

En este apartado se muestra la relación directa entre la temperatura de la barra y las corrientes del motor del desbaste, respecto de la temperatura presente en la bóveda del horno. Sólo se quiere mostrar la existencia de dicha dependencia y no buscar una relación matemática o regresión entre las variables, pues sólo se desea utilizar para el diseño del un bloque difuso que corrija el consigna de temperatura siguiendo sólo aspectos intuitivos, como los ratificados a continuación.

En la figura 2.14 se ratifica la relación existente entre la temperatura de la bóveda presente en el interior del horno y la temperatura de barra, claramente se ve que a mayor temperatura de bóveda aumenta la temperatura superficial en la barra.

La figura 2.15 muestra la prueba realizada para ver el comportamiento de la corriente presente en el segundo pase en el motor del desbaste, para realizar esta prueba fue necesario que durante tres horas el laminador trabajara si interrupciones, por lo que dicha prueba no fue simple de realizar, dado que por un lado no es simple lograr 3 horas de laminación sin interrupciones, por otro se suma la voluntad de operadores para realizarla, los que esperan tener un mínimo de interrupciones y barras perdidas para lograr las metas impuestas por producción.

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

La prueba consistió en llevar la temperatura del horno a 1340°C y laminar con esa temperatura de bóveda durante una hora, luego llevar el horno a 1330°C también durante una hora, para repetir la experiencia a 1320°C. En la figura 2.8 se puede ver el leve incremento de la corriente en el 2º pase a medida que la temperatura interna del horno disminuye, lo que ratifica lo sugerido por el experto. También es posible ratificar el retardo que existe en el cambio en la corriente luego de un cambio en la temperatura (la corriente está retrasada respecto de la temperatura).

La experiencia fue posible realizarla en la medida que los indicadores utilizados por los horneros, como la temperatura de la barra y la apreciación visual de la barra por parte del operador, estuviesen en los rangos aceptados según indica su experiencia.

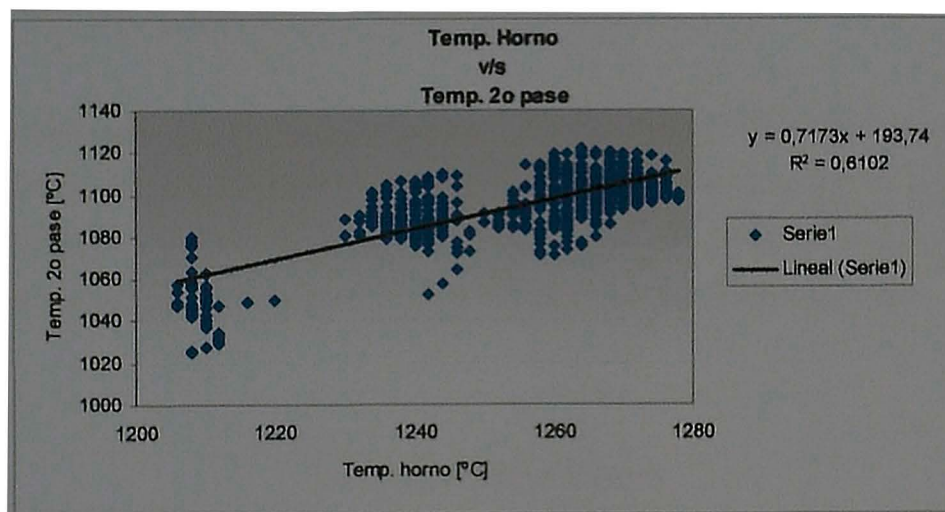


Figura 2.14 Temperatura de barra versus Temperatura de horno.

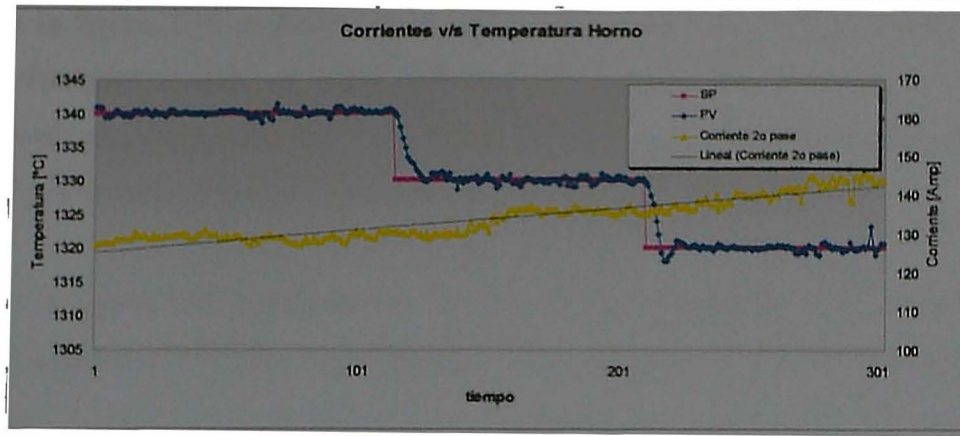


Figura 2.15 Temperatura de horno y Corriente 2º pase.

2.5.3 Distribución de Corrientes y Temperatura de barra.

La búsqueda de una distribución de corrientes y temperatura de barra tiene como único objetivo, servir de base para el diseñar las funciones de pertenencia que permitirán diseñar el sistema corrector de consigna de temperatura de horno que formará parte del Sistema de control Supervisor, que es el gran objetivo de éste trabajo de título.

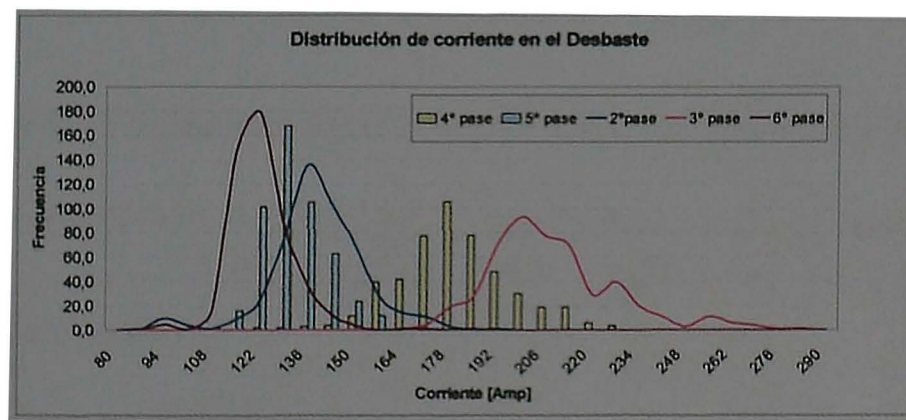


Figura 2.16 Distribución de corrientes en el desbaste.

Capítulo II: Principios de Funcionamiento, Control Regulatorio y Operación del Horno de Recalentamiento de Aza Renca

En la figura 2.16 se presentan las distribuciones de las corrientes presentes en el motor desbastador cuando la barra pasa por el 2°, 3°, 4°, 5° y 6° pase. Con estas distribuciones es posible encontrar los valores estadísticos que describen las variables en cuestión, un resumen de la estadística descriptiva se resume en la tabla 2.7.

En la figura 2.17 se muestra la distribución de temperatura superficial de la barra cuando esta pasa por el 2° pase y su estadística descriptiva se adjunta a la tabla 2.7.

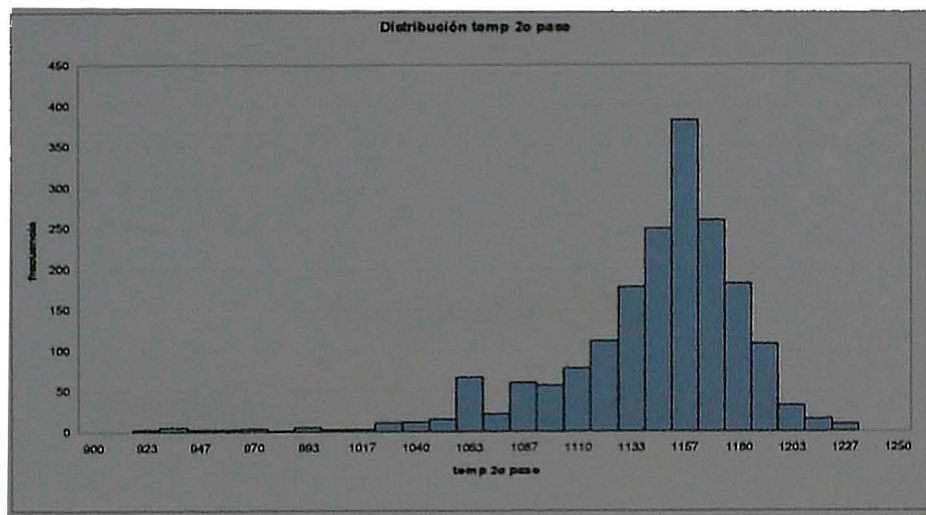


Figura 2.17 Distribución de temperatura de barra.

Tabla 2.7 Estadísticos descriptivos de corrientes y temperatura de barra.

	2o pase	3o pase	4o pase	5o pase	6o pase	Temp. 2o pase
Media	136,2	205,0	176,1	128,6	119,3	1106,2
Desviación estándar	14,1	19,3	17,0	8,8	9,3	112,4
Mínimo	87,0	161,3	118,2	107,9	84,8	894,1
Máximo	191,0	276,5	226,7	156,4	180,0	1224,2

Capítulo III

Diseño de Sistema Supervisor.

3.1 Introducción

En el capítulo 2 se definieron los distintos niveles de control que se pueden encontrar en un horno de recalentamiento, y que en general se pueden aplicar a cualquier proceso industrial, también se describió la operación en términos de manejo del SP de temperatura y la relación que tiene con el ritmo de descarga con que se trabaja el proceso de recalentamiento, y se mostraron los datos que relacionan estas dos variables en pos de un buen proceso de laminación. Descrito todo lo anterior, en este capítulo se propone un sistema de control supervisor que conjugue todo lo antes expuesto desde dos puntos de vista; i) primero se tabulan todas las operaciones que realiza el operador con el fin de eliminar por completo la variabilidad del proceso y ii) se propone un sistema basado en lógica difusa que sea capaz de encontrar el mínimo SP de temperatura que permita trabajar al ritmo nominal de descarga de un producto determinado.

3.2 Diseño del Control Supervisor: Gestión de SP de Temperatura de horno

Se entiende por gestión de operación como la dirección y el control sistemático de un proceso y es esto precisamente lo que se plantea en este apartado, se plantea una gestión de la consigna de temperatura del horno de recalentamiento en todo momento basado en la experiencia de operadores y mantenedores recopilada a lo largo del desarrollo de este trabajo de título, básicamente se propone automatizar los padrones de operación del horno respecto a la consigna de temperatura, adicionando también el conocimiento experto del Consultor Internacional del Grupo Gerdau a dichos padrones, el Sr. Bruno Hoppe, con quién en el desarrollo del trabajo de título se concertaron 3 visitas, sumado al trabajo vía telefónica y correo electrónico.

Si bien es cierto, se pretende desarrollar un gestor o gerenciador de consigna de temperatura, esta variable por sí sola no permite llevar a cabo el objetivo, es necesario apoyarse en dos variables más que van íntimamente ligadas a los cambios en de consigna de temperatura, las que son el ritmo de descarga del horno y rampa o tasa de cambio de

temperatura, por esto, el diseño del control supervisor no se limita sólo a la Consigna de temperatura sino que también debe manejar las consignas de ritmo y rampa.

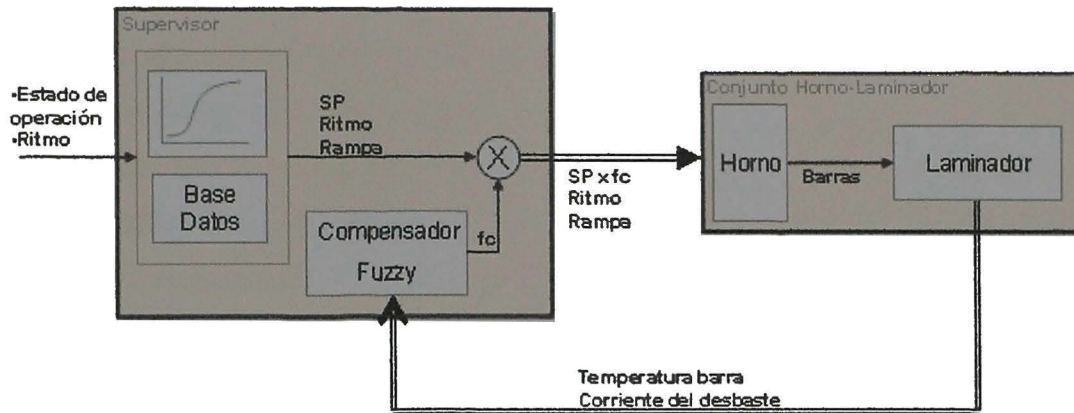


Figura 3.1 Diagrama de bloques del sistema de control supervisor

En la figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques que representa el funcionamiento del sistema supervisor diseñado. Este diseño contempla como agente iniciador y más importante al operador encargado del equipo, él es quien decide el estado de operación en el que se encontrará el horno, estados que serán clasificados a lo largo de este capítulo. Una vez ingresado el estado en que operará el horno se procede a cargar desde la base de datos todos los parámetros necesarios para el funcionamiento del horno en dicho estado, los que son consigna de temperatura, rampa y ritmo de descarga. Sólo para el caso de operación normal se contempla un compensador de consigna de temperatura, este compensador tiene como objetivo en primer lugar inferir, por medio de la medición de la temperatura superficial de la pieza de acero y de las corrientes que se presentan en el motor del tren desbastador, el perfil de temperatura de la barra que se está laminando en ese instante. Una vez inferido el perfil de temperatura de la barra se decide si la consigna de temperatura es la idónea, es decir si el perfil inferido muestra que la pieza va fría entonces el compensador aumentará el set point de temperatura de bóveda, en caso contrario, si la inferencia de dicho perfil indica que la pieza está sobrecalentada, entonces el compensador disminuirá la consigna.

A continuación se procede a entregar en forma detallada el diseño del supervisor considerando la base de datos que contiene los parámetros para cada estado, las curvas de calentamiento que entregan la consigna de temperatura de bóveda de acuerdo al ritmo de laminación y por último la descripción del compensador basado en lógica difusa.

El laminador solo tiene dos estados, laminando o no laminando, y para el horno se ha determinado dividir también en dos estados, los que son producción y no producción o también llamadas de operación normal y operación anormal. La operación normal es una sola y se refiere a cuando el horno se encuentra trabajando a plena capacidad. La operación anormal se subdivide en tres estados, los que son las detenciones, ajustes y partidas.

- Operación normal
- Operación anormal
 - Detención
 - Ajuste
 - Partida

A continuación se presenta el diseño propuesto para la gestión de operación de la consigna de temperatura en base a la clasificación mencionada.

3.2.1 Operación anormal

Estado de detención

La detención del horno, tal como se mencionó en el capítulo II, puede presentarse de dos formas o tiene dos naturalezas distintas, pueden ser planeadas o no planeadas. En caso que por programa de producción se establezca una detención, a priori se conoce lo dos aspectos fundamental de ésta, primero se conoce cuando se iniciará y segundo se conoce el tiempo de duración; no así en el caso de una detención no planificada o interrupción del proceso, dado que en ningún caso se puede conocer cual será la duración de esta detención

como tampoco cuando se puede presentar. Es por esto que el estado de detención del horno se subdivide en estos casos; detenciones programadas e interrupciones del proceso de laminación.

Detenciones programadas

Para las detenciones programadas del laminador, ya sean estas para mantención o cambios de productos por ejemplo, se espera llevar la temperatura del horno a la mínima permitida⁴, que va a depender del tipo de combustible que se esté utilizando. La manera de llevarlo a esa temperatura depende de la rampa (dado que el horno sigue un Consigna de temperatura interno, y es función de la rampa). Esta rampa nos debe asegurar un consumo de combustible igual a cero, es decir, llevar el Consigna interno del horno de forma instantánea a establecido para una detención. Las observaciones y la experiencia de los operadores ayudaron a determinar estos parámetros, así como también la temperatura mínima a la cual llevar el horno en una detención prolongada. La tabla 3.1 muestra la rampa y la temperatura para detenciones mayores a 3 horas.

Tabla 3.1 Parámetros para detenciones mayores a tres horas

	GN	Diesel
Temperatura [°C]	850	950
Rampa [°C/h]	1000	1000
Ritmo [b/h]	0	0

Se ha tomado como medida para hacer las detenciones más eficientes en términos energéticos dejar el horno a máxima carga cuando no es necesario realizar mantención a la solera del horno, en caso contrario, el horno se deja cargado a la mitad de su capacidad⁵.

⁴ El horno trabaja a 3 turnos y es apagado una vez al año siempre que sea necesario para reparaciones estructurales, refractarios, entre otros.

⁵ Era común observar el horno descargado completamente en horario de mantenimiento, con la idea errónea de generar oxidación en el acero. La oxidación del acero se encuentra con la exposición a temperaturas mayor a 900°C.

Detenciones no programadas

Las interrupciones son muy diversas y como lo dice su nombre inesperadas, y se ha observado que los operadores no toman acción alguna respecto en la operación del horno ya que esperan estar siempre listos para cuando el laminador lo esté, esto es, se espera que la duración de la interrupción sea siempre mínima, lo cierto que la realidad dista mucho de lo esperado por los operadores tanto del horno como del laminador, y es así como la mayoría de las interrupciones tienen una duración muy superior a la que dicta su experiencia, es por esto que se propone una estrategia que logre atacar las interrupciones desde el punto de vista de ahorro energético, así que se propone integrar las interrupciones del laminador al horno. En este caso no es recomendable llevar la temperatura en forma brusca al mínimo antes planteado, pero si existe un punto, en el cual el horno está preparado para deshornar una barra para ajustes del laminador, y es el punto al cual se propone llevar la temperatura del horno, no en las condiciones antes mencionas, sino que en forma paulatina, de acuerdo a la inercia que presenta este horno en particular.

La interrupción en el horno estará comandada por el bit de interrupción existente para el laminador, luego, si el laminador acusa estar detenido de inmediato se llevará la temperatura del horno al mínimo necesario para que este pueda descargar una barra (como se hace en el periodo de ajuste del laminador) en forma paulatina, la velocidad con que alcanzará dicha consigna depende de la consigna de rampa que se fije. En la tabla 3.2 se muestran los parámetros a fijar para la consigna de temperatura y ritmo inmediatamente después que el laminador acuse una interrupción.

Cuando se está trabajando a máxima capacidad, es decir, con un ritmo de descarga de 54b/h, para el GN se tendría antes de la interrupción una consigna de temperatura de 1280°C y de 1340°C para diesel, por lo que el tiempo que llevaría alcanzar las consignas fijadas en una interrupción son de 16 y 12 minutos respectivamente de acuerdo a una rampa de 300°C/h ó 5°C/min.

Tabla 3.2 Parámetros para interrupciones

Consigna	GN	Diesel
Temperatura [°C]	1200	1260
Rampa [°C/h]	300	300
Ritmo [b/h]	0	0

Esta fijación de consigna debe ser válida para toda interrupción y una vez que la duración del estado de espera alcanzado supere los 20 minutos (tiempo definido por operadores y mantenedores) se deben llevar los parámetros del horno como si se tratara de una detención programada, tal cual fue definido en el apartado anterior, con la salvedad de la consigna de la rampa, que debe permanecer igual, a no ser que el operador acuse lo contrario activando la opción de parada programada.

Esta estrategia para atacar las interrupciones tiene que ser integrada por la estrategia de partida suave del horno, que será descrita en un apartado siguiente.

Estado de ajustes del laminador

Se habla de ajuste del laminador cuando se afinan detalles en el tren para obtener la medida y calidad necesario para un producto determinado, es así como luego de una detención programada se requiere deshornar palanquillas a temperatura de laminación en forma manual, es decir, a ritmo cero. Como en este caso no necesita tener el horno a plena producción se lleva a un estado en que es capaz de entregar una barra con la temperatura deseada para ser laminada o probada en el tren. Generalmente son tres a cuatro las barras necesarias para el ajuste del laminador (idealmente es sólo una), pero nunca se sabe a priori cuantas serán las necesarias. La práctica más común vista en la operación en esta condición, es llevar la temperatura del horno desde la mínima definida en la tabla 3.1 a la máxima definida en la tabla 3.2. Dada la inercia del horno no es aconsejable aumentar la temperatura de bóveda demasiado rápido, es por esto y basado en la experiencia de operadores, que se necesitan aproximadamente 1,5 hrs para que la barra alcance la

temperatura deseada. Por lo que en estas condiciones es necesario definir rampas distintas las que se presentan en la tabla 3.3 junto con los Consigna de temperatura.

Tabla 3.3 Parámetros ajustes luego de una detención

	GN	Diesel
SP temperatura inicial	850	950
SP temperatura final	1200	1260
Rampa	240	210
Ritmo	0	0

Una vez ajustado el tren laminador el conjunto horno-laminador está en condiciones de pasar al siguiente estado definido, el que es llamado partida de producción.

Estado de partida de producción

En el inicio de descarga del horno, luego de una detención las primeras barras descargadas, no poseen el perfil de temperatura necesario para ser laminadas, esto se debe, a la inercia de la masa del material refractario.

La propuesta consiste en que después de una detención, y luego del ajuste del laminador, no se lleve el ritmo de descarga de barras desde cero al nominal de descarga para el producto a laminar, si no que se realice de forma gradual, las 3 primeras barras saldrán del horno con un 'RITMO 1', las 3 siguientes con un 'RITMO 2' y las siguientes 3 barras con un 'RITMO 3', para llegar a la décima barra la que saldrá al RITMO nominal para el producto que se está laminando. La definición de dichos ritmos es:

- 3 barras al 50% del RITMO de producción normal.
- 3 barras al 66% del RITMO de producción normal.

- 3 barras al 85% del RITMO de producción normal.
- 10ª barra al 100% del RITMO de producción.

El ajuste de los porcentajes debe hacerse para este horno en particular, dado que es una aproximación inicial dada por el asesor de Aza Renca. Con esta estrategia siempre se dejarán de laminar barras respecto al caso de comenzar a descargar desde el horno barras al 100% de su capacidad, en este caso son 9 las barras que se dejan de laminar y una vez implementado y testeadas las corrientes del tren desbastador se obtendrá el número de barras necesarias que se deben dejar de laminar en el comienzo de la producción.

Tabla 3.4 Partida suave para interrupciones

Temperatura de Bóveda [°C]		Partida Suave (% de Ritmo nominal)
GN	Diesel	
1280	1340	100%
1253	1313	85%
1227	1287	66%
1200	1260	50%

Tal como se mencionó en la definición del estado de detenciones por interrupciones, es necesario integrar una partida suave luego de una interrupción. En la implementación práctica es necesario evaluar la temperatura de bóveda que existe en el momento en que se decide que la interrupción llegó a su fin, y en base a esta temperatura se debe iniciar la partida suave, ya sea en su totalidad o en forma parcial.

3.2.2 Operación normal

Para el estado de producción u operación normal se proponen dos estrategias para controlarlo en forma automática, una sigue la línea de rescatar la experiencia y datos históricos de operación como se han presentado hasta este momento en los distintos estados en que se puede encontrar el horno, y una segunda que utiliza fundamentos del control difuso de sistemas. En este apartado se presenta la primera opción y se deja para el siguiente apartado la presentación completa del diseño del control basado en lógica difusa.

Básicamente el control del estado de producción se define como un control por ritmo al que le asociamos una única consigna de temperatura independiente del tipo de acero y de producto a laminar, sólo depende del ritmo. Los históricos de operación y los padrones de operación mostrados en el capítulo 2 muestran que este tipo de control es una realidad en el horno de recalentamiento de Aza Renca, pero dado que se manejan rangos de temperaturas para rangos de ritmo, da pie a la utilización de los distintos criterios de los operadores, lo que le da al proceso una alta variabilidad. Es por esto que se proponen dos curvas llamadas de calentamiento, donde se tiene la consigna de temperatura del horno en función del ritmo de descarga, de tal forma que siempre que se quiera operar el horno a un cierto ritmo de descarga, se aplique siempre una única consigna de temperatura.

Las dos curvas de calentamiento, una para gas y otra para diesel se presentan en la figura 3.2.

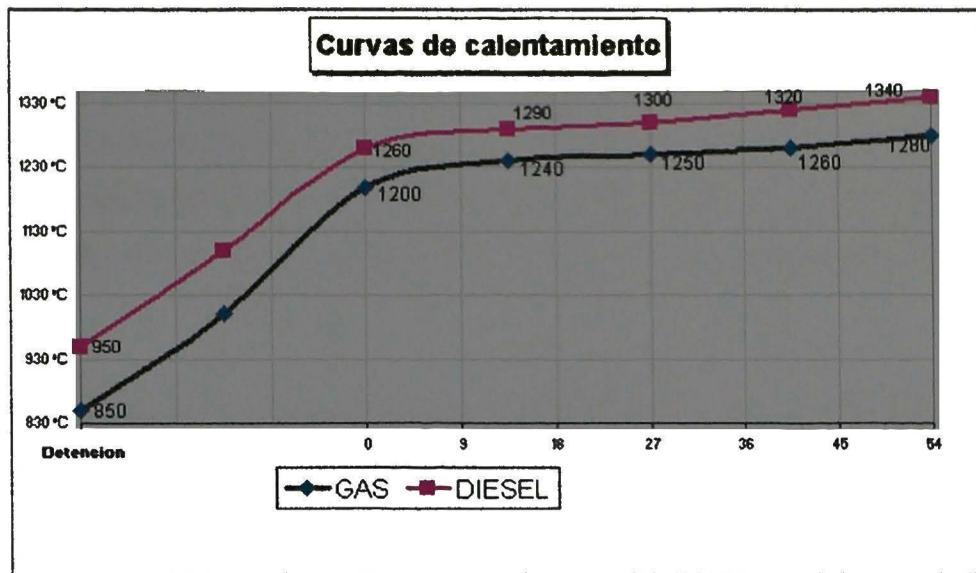


Figura 3.2: Curvas de calentamiento para estado de producción

Con esto quedan determinados los parámetros a fijar en el manejo del horno para cada estado de operación. En le siguiente apartado se muestra el control difuso que actuará sobre la consigna de temperatura del horno sólo cuando éste se encuentre en operación normal, en cierta literatura este tipo de corrección es llamada también compensador.

3.3 Corrección de la Consigna de Temperatura basado en lógica difusa

Como ya se ha mencionado los hornos de recalentamiento son sistemas altamente no lineales y sujetos a muchas perturbaciones, por esto es que el control basado en lógica difusa nace como una muy buena alternativa para mejorar los sistemas de control desarrollados hasta hora que en la mayoría utilizan modelos físicos.

También se ha mencionado que la gran dificultad, sino la mayor, en el diseño de sistemas de control para hornos, esta es no contar con una medición del objetivo principal que tiene un proceso de recalentamiento, el que es obtener un perfil de temperatura homogéneo en la pieza de acero disminuyendo lo más posible la diferencia de temperatura de la parte más caliente de la pieza (superficie) y la parte más fría (centro). En base a esta

necesidad es que nace como una opción el medir la corriente en el tren desbastador para así tener una idea de cuan bueno es el perfil de la pieza de acero. En el capítulo 2 quedó demostrada la influencia que tiene el perfil de temperatura de la pieza en estas corrientes, así que sumando la medición de la temperatura superficial de la barra, tenemos variables para determinar de forma aproximada la calidad del perfil de temperatura de la pieza de acero.

A continuación se presenta el diseño de un controlador tipo Mandani para la corrección de la consigna de temperatura del horno basado en las corrientes presentes en el tren desbastador y la temperatura superficial de la barra cuando se está en operación normal o estado de producción.

3.2.1 Diseño de Controlador tipo Mandani para la corrección de la Consigna de Temperatura

Un buen comportamiento de un controlador difuso tipo Mandani depende directamente de dos factores, una es la forma en que se realiza el proceso de inferencia y segundo la composición de base de conocimiento que maneja. Por esto el diseño del controlador tipo Mandani que a continuación se presenta engloba dos tareas principales:

1. *Obtención de una base de conocimiento* que contenga información adecuada con respecto al problema que representa la corrección de la consigna de temperatura del horno.
2. *Diseño del sistema de Inferencia difusa*, es decir la elección de los distintos operadores de conjunción e implicación que se emplearán.

Antes de iniciar las descripciones de diseño antes mencionadas, se plantea la estructura completa que tendrá el bloque fuzzy, encargado de la corrección de la consigna de temperatura con sus entradas y salidas. Por simplicidad, debido al número no menor de

variables a utilizar, es que el diseño del bloque fuzzy consta de dos controladores tipo Mandani en cascada, con la configuración mostrada en la figura 3.3.

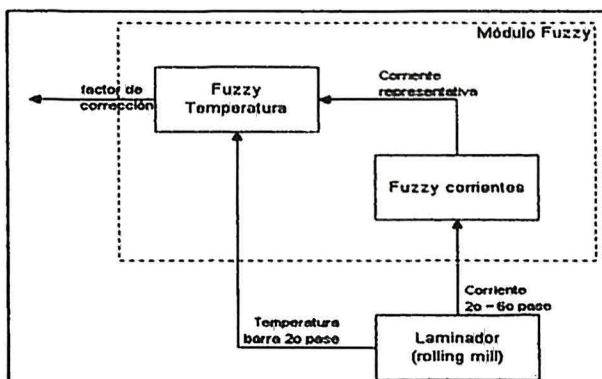


Figura 3.3 Estructura del bloque fuzzy

En el diagrama del bloque fuzzy, se proponen dos módulos fuzzy, llamados *fuzzy corrientes* y *fuzzy temperatura* respectivamente, el primero tiene como Input las corrientes del tren laminador, que para cuando éste trabaje a 7 pases, serán 5 corrientes (se descartan corrientes del primer y séptimo pase por solapamiento) y como Output tendrá una corrientes representativa de las corrientes de entrada. El segundo módulo fuzzy, llamado fuzzy temperatura, tiene como Input la corriente representativa que es la salida del módulo fuzzy corrientes y la temperatura superficial de la barra capturada cuando ésta se encuentra en el segundo pase del tren desbastador.

Resumiendo, en el bloque fuzzy, compuesto por dos módulos fuzzy en cascada, se definen las siguientes Input y Output:

Módulo fuzzy corrientes:

➤ INPUTS

- corriente del 2º pase (llamada 2º pase)
- corriente del 3º pase (llamada 3º pase)
- corriente del 4º pase (llamada 4º pase)

- corriente del 5° pase (llamada 5° pase)
- corriente del 6° pase (llamada 6° pase)
- OUTPUT
 - Corriente representativa (llamada corrientes)

Módulo fuzzy temperatura

- INPUTS
 - Corriente representativa.
 - Temperatura de barra en segundo pase (llamada Temp.2° pase)
- OUTPUT
 - Factor de corrección (llamado fc)

Definición de la Base de Conocimiento

Para definir la base de conocimiento es necesario el diseño de la base de datos y la base de reglas; definiciones que se adjuntan en anexo A. En la base de datos se definen las variables de entrada y sus etiquetas o valores lingüísticos, junto con sus funciones de pertenencia. En la base de reglas, se definen las reglas lingüísticas que relacionarán las variables de entrada y salida del controlador.

Definición de base de datos:

El total de las variables a utilizar con sus respectivas etiquetas lingüísticas se resumen en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Variables lingüísticas y sus valores lingüísticos.

Tipo	Variable lingüística							
	INPUT	INPUT	INPUT	INPUT	INPUT	I/O	INPUT	OUTPUT
Nombre	2° pase	3° pase	4° pase	5° pase	6° pase	Corrientes	temp.2° pase	fc
valores lingüísticos	pequeña esperada Grande	flaca correcta fuerte	decrementada idónea incrementada	reducida neutra elevada	disminuida cero aumentada	baja optima alta	fría esperada caliente	enfriar mantener calentar

Las funciones de pertenencia encargadas de la fuzzificación son del tipo trapezoidales, ecuación A.19, y los parámetros que definen la función de pertenencia para cada etiqueta lingüística de las variables señaladas se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Parámetros de funciones de pertenencia

Variable	Rango	Izquierda				Centro				Derecha			
		a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
2o pase	80-290	79	80	115	136	115	136	136	157	136	164	290	291
3o pase	80-290	79	80	178	199	171	199	206	241	199	227	290	291
4o pase	80-290	79	80	143	178	143	178	178	213	178	213	290	291
5o pase	80-290	79	80	108	129	108	129	129	143	129	143	290	291
6o pase	80-290	79	80	108	122	198	122	122	136	122	136	290	291
I/O corrientes	62-137	61	62	90	100	90	100	100	110	100	110	138	139
temp 2o pase	900-1400	899	900	1067	1150	1083	1150	1167	1217	1150	1200	1400	1401
Out fuzzy	0,985-1,015	0,994	0,995	0,997	1	0,998	1	1	1,004	1	1,004	1,015	1,016

En la figura 3.4 se presentan las funciones de pertenencia de las variables temperatura de barra, corrientes y factor de corrección y en la figura 3.5 las funciones de pertenencia para corrientes del segundo al sexto pase

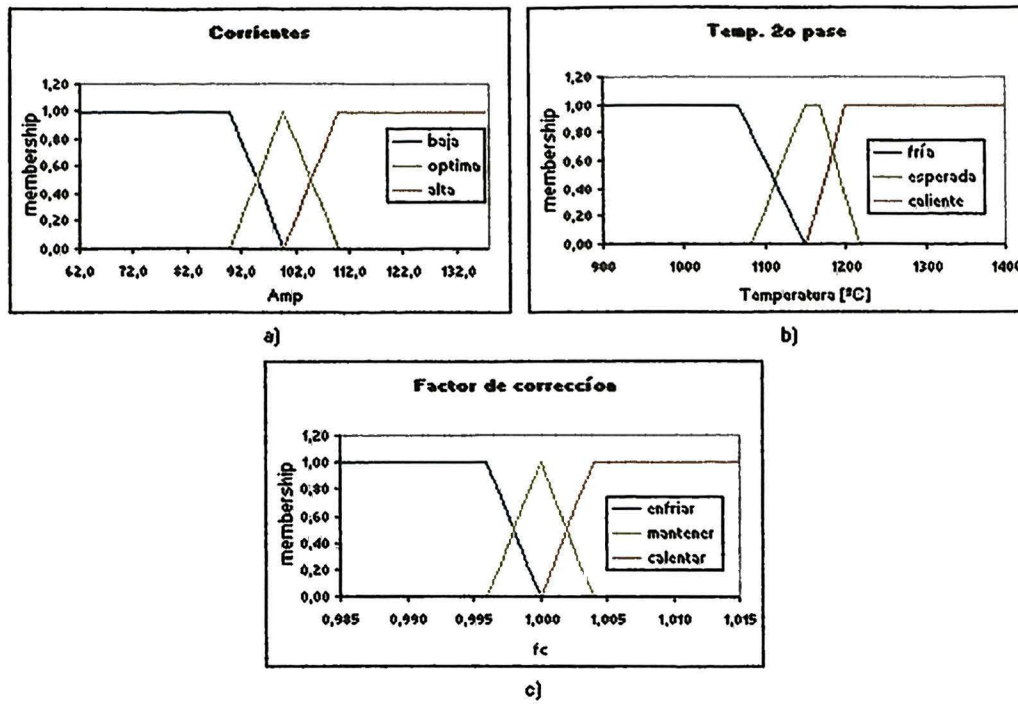


Figura 3.4 Funciones de pertenencia para las variables a) corrientes, b) temp. 2º pase, y c) fc.

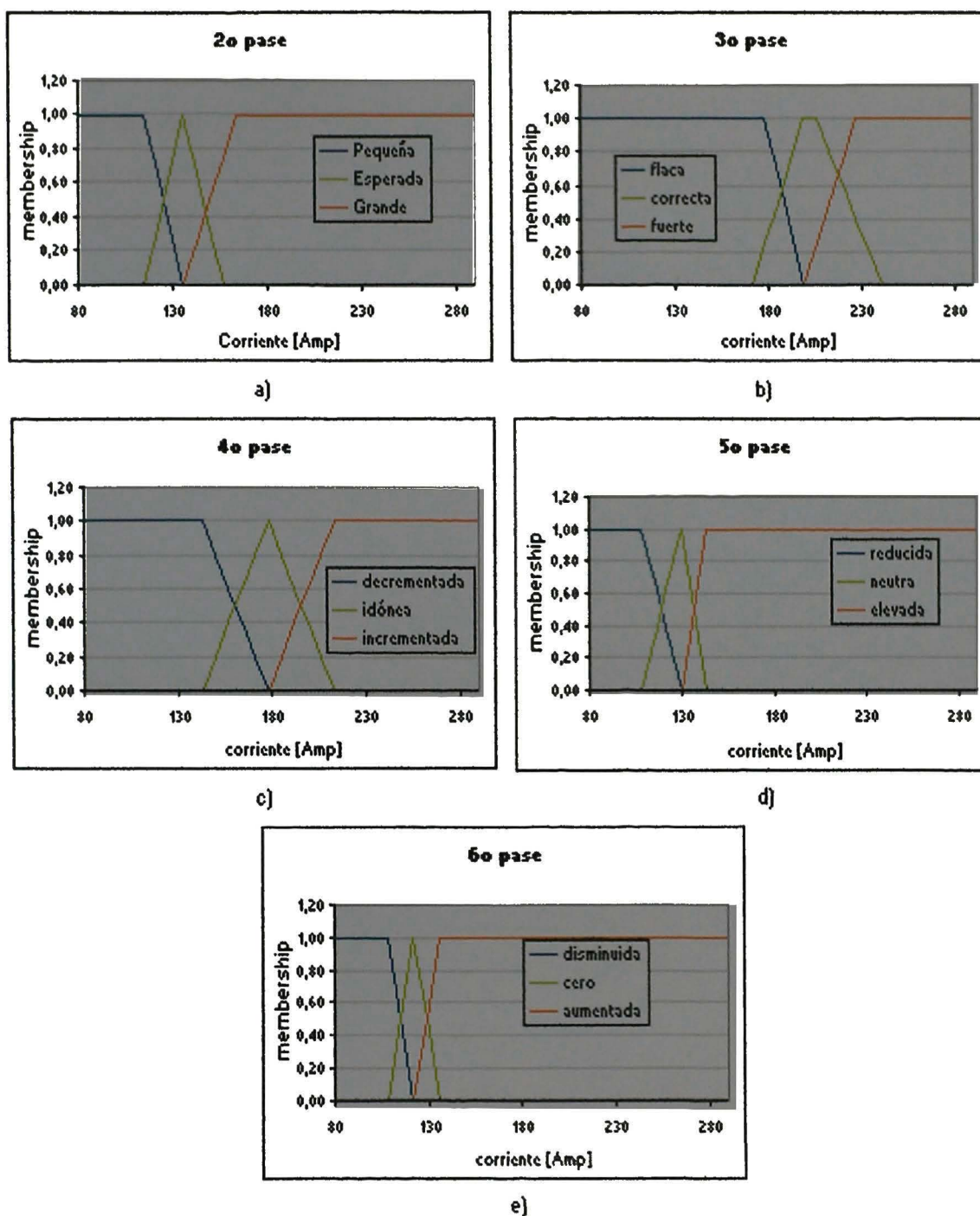


Figura 3.5 Funciones de pertenencia para las variables a)2º pase, b)3º pase, c)4º pase, d)5º pase y e) 6º pase.

Definición de base de reglas:

Es necesario crear dos bases de reglas para cada uno de los módulos fuzzy, por simplicidad, sólo se muestra el diseño de la base de reglas del módulo fuzzy temperatura pues sólo cuenta con 9 reglas, dadas por las dos entradas y una única salida. El diseño de la base de reglas del módulo fuzzy corrientes se adjunta en el Anexo C.

La forma de reglas de un controlador tipo Mandani, vienen definidas de acuerdo a la ecuación A.13. Teniendo en cuenta la definición de las variables lingüísticas y sus correspondientes valores lingüísticos, la base de reglas para el módulo fuzzy temperatura son definidas como se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Base de reglas para el módulo fuzzy temperatura

	Input	Etiqueta		Input	Etiqueta		Output	Etiqueta
IF	Corrientes	baja	AND	Temp.2º pase	fría	THEN	fc	mantener
IF	Corrientes	baja	AND	Temp.2º pase	esperada	THEN	fc	Enfriar
IF	Corrientes	baja	AND	Temp.2º pase	caliente	THEN	fc	Enfriar
IF	Corrientes	optima	AND	Temp.2º pase	fría	THEN	fc	Mantener
IF	Corrientes	optima	AND	Temp.2º pase	esperada	THEN	fc	Enfriar
IF	Corrientes	optima	AND	Temp.2º pase	caliente	THEN	fc	Enfriar
IF	Corrientes	Alta	AND	Temp.2º pase	fría	THEN	fc	Calentar
IF	Corrientes	Alta	AND	Temp.2º pase	esperada	THEN	fc	Calentar
IF	Corrientes	Alta	AND	Temp.2º pase	caliente	THEN	fc	Mantener

La definición en forma preliminar tanto de ésta base de regla como la del módulo fuzzy corrientes fueron creadas y apoyadas en la experiencia de operadores y mantenedores, una vez definidas, se utilizó la herramienta FIS del inglés *Fuzzy Inference System Editor* de Matlab. Con esta herramienta es posible visualizar la superficie o manto de la variable de salida en 3D en función de las variables de entrada y corregir la base de reglas en caso de que se visualice un comportamiento anormal. En el caso del módulo temperatura no fue necesario cambio alguno en la base de reglas, dado que es una base que cuenta tan solo con 9 reglas, no así el módulo fuzzy corrientes que cuenta con una base de 243 reglas, y dado lo extensa de ésta, la complejidad de crear una base de reglas que

responda en términos de calidad aumenta notoriamente. Cuando se habla de la calidad de un modelo fuzzy se refiere a que a medida que las variables de entrada se mueven en una dirección, la salida debe estar en consonancia con lo establecido en la base de reglas. En la figura 3.6 se muestra la superficie o manto que describe la variable de salida factor de corrección en función de las dos variables de entradas, corrientes y temp. 2º pase.

Se puede apreciar en la figura, que por ejemplo a altas temperaturas detectadas en la barra en su paso por el segundo pase del tren desbastador y corrientes bajas de éste, el factor de corrección está bajo su valor esperado que es uno, esto significa que al ser ésta variable un factor multiplicador de la consigna de temperatura ésta disminuirá.

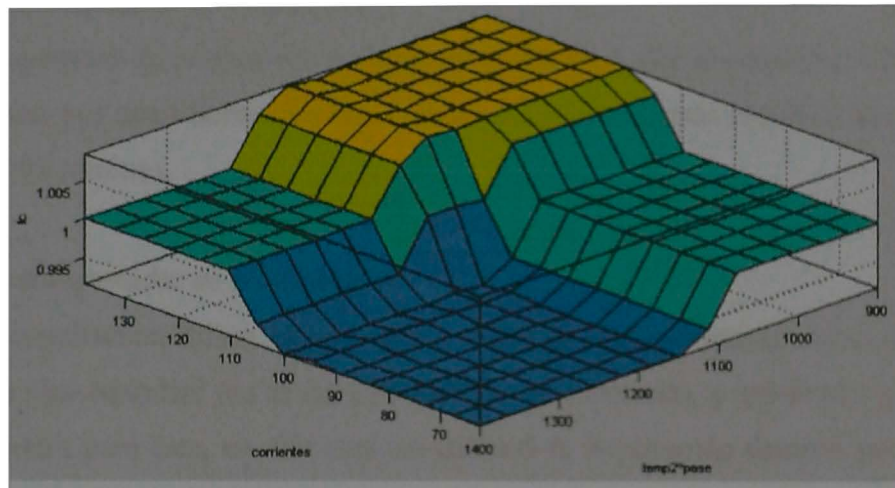


Figura 3.6 Superficie descrita por f_c en función de corrientes y temp. 2º pase

Las superficies descritas por la variable corriente, salida del módulo fuzzy corrientes, se adjunta en el anexo B. En este caso fue posible analizar el manto en función sólo de dos variables, manteniendo las otras corrientes en su valor esperado, este análisis dio cuenta de lo equivocadas que estaban algunas reglas, porque como se mencionó, esta

herramienta es muy potente para ver la dirección en que se mueve la salida en función de las variables de entrada.

Definición del Sistema de Inferencia

La definición del sistema de inferencia en un controlador tipo Mandani conlleva definir el conectivo lógico AND, es decir el operador de conjunción, definir el operador de implicación en las reglas lingüísticas del tipo “*Si-entonces*”, es decir elegir el operador de implicación I que se empleará para modelar la implicación y por último el tipo de defusificación a utilizar para obtener una salida concreta desde el controlador.

Definición del operador de conjunción:

El operador de conjunción definido en el anexo A por la ecuación A.26 se modela habitualmente por una t-norma, en este caso se utilizará el de más uso en la literatura que es la t-norma del mínimo.

Definición del operador de implicación:

La implicación difusa es uno de los aspectos más importantes en el diseño de un controlador tipo Mandani (en el del tipo TSK no es necesario), y existe una gran variedad de definiciones para éste, en este caso se utilizará la implicación descrita por Mandani y que se presenta en la tabla A.2.

Definición de Defusificación

Para la defusificación se puede emplear primero una agregación y luego una defusificación o primero una defusificación y luego una agregación. Por lo tanto es necesario definir primero el orden en que se desarrollará la defusificación y luego el método de agregación y defuzificación.

Considerando los aspectos técnicos en la implementación del bloque fuzzy, el que se desarrollará en el ambiente Visual Basic, se optó por una defusificación primero y luego una agregación por ser más simple su programación. Otro motivo por el cual se prefiere la estrategia FITA (*first infer, then aggregate*), es por el hecho de que este método considera cada conjunto difuso de salida por separado, teniendo en cuenta el solapamiento que se puede dar entre los conjuntos difusos de salida.

Es por esto que se utiliza el método de defusificación de la ecuación A.35, éste método es la suma de los centros de gravedad de cada conjunto difuso ponderado por el área de dicho conjunto.

3.4 Operación del Sistema de Control Supervisor

El supervisor tendrá dos modos de operación a elección del operador en la pantalla de operación del SCADA del horno:

- Manual recomendado
- Automático

En el modo manual recomendado, el módulo de cálculo indicará el consigna que manualmente debe escribir el operador al SCADA del Horno. En modo automático, el módulo escribirá directamente la consigna al PLC a través del SCADA del Horno.

La operación del módulo será periódica. Cada cierto tiempo realizará las siguientes operaciones:

- Leerá un conjunto de variables de tiempo real desde el SCADA del Horno además del factor de corrección calculado por el módulo fuzzy.
- Determinará el estado en que se encuentra el Horno.

- Calculará el consigna de temperatura en función del estado del horno, temperatura actual del horno, ritmo de operación, combustible utilizado y factor de corrección.
- Escribirá el valor de consigna que corresponda según el modo de operación en que se encuentre el módulo.

Partida del Horno:

En este estado el supervisor evaluará la temperatura actual de la bóveda para luego obtener el porcentaje de aplicación de la partida suave. Con esta información obtendrá un valor de ritmo y Consigna de temperatura aconsejado de acuerdo a la tabla 3.3. El contador de barras descargadas indicará cuando es necesario incrementar el ritmo y Consigna de temperatura. La temperatura siempre adelantará al ritmo.

Horno en operación:

En este estado y de acuerdo al ritmo de producción, que debe ser ingresado por el operador, el módulo leerá el consigna de la tabla de Consigna v/s Ritmo de acuerdo al ritmo y combustible utilizado (petróleo o GN) y este valor lo multiplicará por el factor de corrección entregado por el bloque Fuzzy para obtener finalmente la Consigna de temperatura a escribir al PLC del Horno a través del SCADA.

Horno detenido:

En este estado, el módulo esperará 3 minutos antes de modificar la última Consigna fijada de acuerdo al estado de Horno en Operación y colocarlo en una Consigna de interrupción en caso que el operador no acuse la interrupción. El supervisor fijará la Consigna para esa condición dependiendo del combustible utilizado y de acuerdo a la tabla 3.2 quedando en estado de interrupción. Luego de esto el supervisor esperará 20 minutos, si no hay acción alguna por parte del operador pasa al estado de detención de acuerdo a los parámetros definidos en la tabla 3.1.

Partida inicial del Supervisor

En la partida inicial el módulo no escribirá ni calculará ningún valor de consigna hasta que haya evaluado el estado del Horno a partir de la selección que haga el operador respecto del estado del horno (Operando, Partiendo o Detenido) desde la pantalla del SCADA del horno.

Integridad del Supervisor:

Debido a que el Supervisor funcionará en un computador remoto conectado al SCADA del horno mediante la red de la planta, se informará con una alarma en el computador SCADA que el Supervisor dejó de funcionar por problemas en el computador que lo aloja (equipo apagado) o bien por que se han perdido las comunicaciones con el computador del SCADA. En esta situación el operador podrá seguir la operación en forma manual.

Descripción Funcional del Módulo Fuzzy

El bloque Fuzzy se desarrollará en Visual Basic para aplicaciones dentro del entorno de programación del software iFix2.5 en el Computador DATA_RENCA. El módulo realizará las siguientes tareas en forma cíclica dentro de un lapso no superior a 1 minuto:

- Lectura de las variables de entrada.
- Fuzzificación de las variables según las funciones de membresía definidas.
- Evaluación de las Reglas.
- Defusificación de las salidas.
- Escritura interna de las variables de salida:
 - Corriente representativa
 - Factor de corrección

Los parámetros de las funciones de membresía de cada una de las variables de entrada y salidas estarán definidos en una base de datos Access, Así como el rango de cada variable. Estos parámetros serán accesibles para modificar las funciones de membresía.

La base de reglas estará escrita dentro del código Visual Basic en un formato que permita la edición de estas reglas utilizando el editor de Visual Basic incorporado en el software iFix2.5.

Integridad del módulo Fuzzy

Si ocurre una falla de comunicación con alguna o todas las variables de entrada del módulo, este mantendrá el valor de corrección en 1 de manera de no afectar al cálculo del Consigna de temperatura.

En la figura 3.7 se presenta un diagrama de bloques del Sistema de Control Supervisor diseñado para el horno de recalentamiento de Aza Renca.

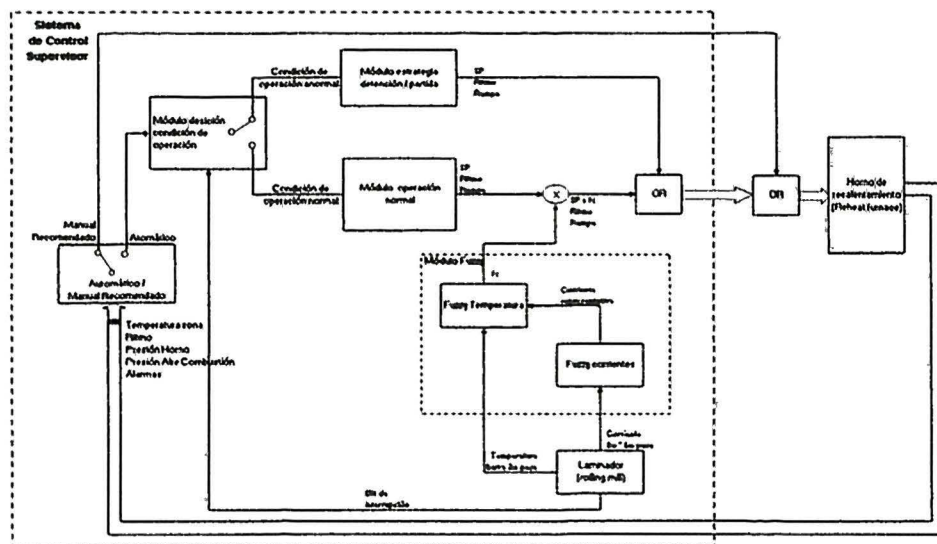


Figura 3.7 Diagrama de bloques de Sistema de Control Supervisor para el horno de recalentamiento Aza Renca.

Un esquema representativo de las herramientas a utilizar para la implementación del Sistema de control Supervisor se puede apreciar en la figura 3.8.

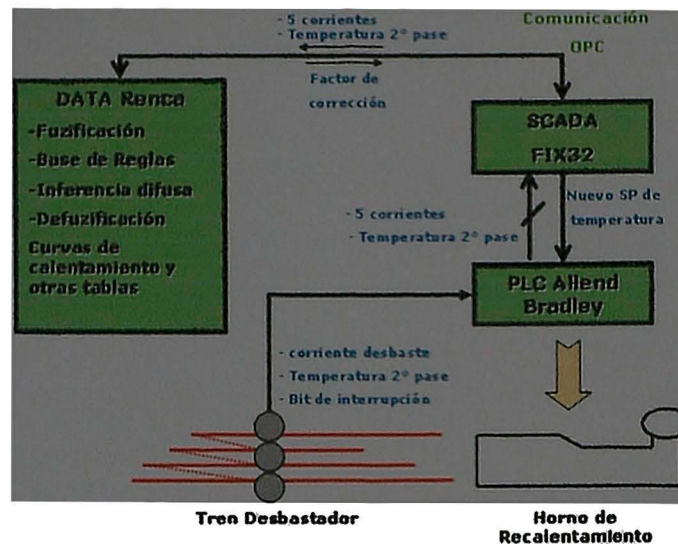


Figura 3.8 Esquema para la implementación del Sistema de Control Supervisor

Se espera que el módulo fuzzy entregue un factor de corrección por cada barra que pase por el tren desbastador. En la puesta en marcha se calculará un promedio de 5 factores de corrección antes de que éste actúe sobre el consigna de temperatura del horno, esto porque la inercia térmica del horno es bastante alta, y para estos efectos aún desconocida, por lo que el número de barras a considerar para el cálculo del promedio está sujeto a los datos reales que se obtengan una vez implementado el Supervisor.

Capítulo IV

Conclusiones

- El proceso de laminación de perfiles consta de dos elementos altamente relacionados, esto son el proceso de recalentamiento de palanquillas y el proceso de laminación en caliente. Si bien es cierto, el proceso de recalentamiento tiene una inercia térmica, en este caso, mucho mayor que el proceso de laminación, es éste último el que comanda todas las acciones o decisiones del proceso de laminación, es decir, es el laminador de perfiles el que demanda barras o palanquillas para laminar y no el horno el que entrega o fornece barras al laminador, como debería de suceder a favor de un uso eficiente de la energía teniendo en cuenta las inercias de los elementos por separado. Esto se debe a que es el nivel de producción el objetivo principal a alcanzar por el proceso productivo, por lo que el horno siempre debe estar listo para cuando lo esté el laminador.
- Los supervisores desarrollados en hornos de recalentamiento disponían de tantas curvas de calentamiento como de productos se laminaran, considerando modelos físicos de los hornos y de las piezas de acero para su obtención, y teniendo en cuenta que el mix de productos de la gran mayoría de los laminadores supera los 100 productos, la cantidad de curvas a diseñar hacen de este tipo de supervisores un trabajo difícil de llevar a la práctica. En este trabajo de título se emigra a una única curva de calentamiento, de acuerdo al tipo de combustible utilizado, que es función del ritmo de descarga de un producto puntual, independiente del tipo de acero a recalentar (a más carbono en el acero, menor el ritmo y por ende mayor el tiempo de residencia de pieza al interior del horno) por lo que la obtención de la curva se puede generar en base a datos históricos, sin la necesidad de recurrir a complejos y costosos modelos. Con la ayuda del módulo fuzzy se pueden ajustar dichas curvas, ya sean temperaturas o ritmos, para que las corrientes presentes en tren desbastador se encuentren en los valores esperados.
- De los aspectos más importantes, sino el mayor, a la hora de diseñar un Sistema Supervisor, es la experiencia de operadores, quienes cuentan con un conocimiento detallado del proceso, en este caso del proceso de recalentamiento de acero, con lo que con su ayuda es posible determinar de manera aceptable los parámetros del proceso de forma que éste se comporte de manera estable. Otro aspecto que no se puede soslayar es la resistencia por éstos al cambio de sus tareas rutinarias, pues ellos ven que se puede

prescindir de ellos, idea errónea dado que sin la ayuda de ellos es casi imposible poner en práctica un Supervisor, ellos junto con el desarrollador son quienes deben velar por una buena puesta en marcha y un buen proceso de maduración del sistema. Se cree también de suma importancia que las tareas desarrolladas por el Supervisor sean transparentes, no modificables, para los operadores, de manera de generar confianza en que el sistema responde de acuerdo a como ellos actuarían, es por esto, que en el diseño propuesto y con el objetivo de facilitar la confianza antes señalada, es que se incorpora un modo de operación llamado “Manual Recomendado”, donde el supervisor le indicará los parámetros a fijar en función del estado actual en que se encuentre el horno. Por último, se cree que es esencial para el buen funcionamiento del supervisor un continuo seguimiento, ya que el diseño propuesto no pretende ni es definitivo.

- Por último, en términos de desarrollo de una industria en particular, se rescata que el intercambio de información y conocimiento entre diferentes plantas, en este caso pertenecientes al mismo Grupo, es de vital importancia para la mejoría continua de procesos, pues conocer los desarrollos en otros lugares del mundo en que se desarrolla la misma actividad tiene como consecuencia, por ejemplo, la motivación de estudios como el que se presenta en este trabajo de título.

Bibliografía

Alarco Lecuona, R., 1987. "Hornos de recalentamiento para instalaciones de laminación". Vol. 1, 1º Edición, Editorial Hurmo, Barcelona.

About Furnaces. www.aboutfurnaces.com.

Claudio Robles, 2000,: "Desarrollo e Implementación de técnicas de control automático asociadas al supervisor de proceso en el área de secado en CMPC Celulosa S.A. Planta Pacífico", Tesis para optar a Ingeniero Civil Electrónico, Universidad de La Frontera.

El-Mahallawy, F., El-Din Habik S., 2002, "Fundamentals and Technology of Combustion", 1º Edición, Elsevier Science Ltd., Oxford.

Fuentes García H. 1989: "Balance térmico en el horno de palanquillas de la Compañía Siderúrgica Huachipato". Tesis para optar al título de Ingeniero Ejecución Químico Universidad Santiago de Chile.

Ferguson B.L., Li Z., Freborg A.M. (2005). "Modeling heat treatment of steel parts", *Computational Materials Science* **34**: 274–281

Honner M., Vesely Z., Svantner M. (2003), "Temperature and heat transfer measurement in continuous reheating furnaces", *Scandinavian Journal of Metallurgy*; **32**: 225–232

Hoppe B. "Curso sobre fornos de reauecimiento", 1998.

Instrument Society of America (1986). "Instrumentation Symbols and Identification"

Jaklic A., Glogovac B., Kolenko T., Zupancic B. Tezak B. (2002). "A simulation of heat transfer during billet transport", *Applied Thermal Engineering*; **22**: 873–883

Jaklic A., Kolenko T., Zupancic B. (2005), "The influence of the space between the billets on the productivity of a continuous walking-beam furnace", *Applied Thermal Engineering*; **25**: 783–795

Martín del Brío, B., Sanz M. A., 2002. "Redes neuronales y sistemas difusos". 2º Edición, Alfaomega, México.

Mcneill, D., Freiburger, P. 1992. "Fuzzy logic, The revolutionary computer technology that is changing our world". 1º Edición, TOUCHSTONE - ROCKEFELLER CENTER, USA.

Mawhinney M. 1976. "Hornos Industriales" Volumen I y II. URMO S.A. Ediciones.

Morales-Luna G. (2002). "Introducción a la lógica difusa", Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN.

Passino, K., Yurkovich, S., 1998. "Fuzzy Control" Editorial Addison-wesley, California.

Pérez Pueyo R. 2005 Tesis Doctoral: "Procesado y Optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales Pictóricos", Universidad Politécnica de Cataluña.

Rene Jara, Mitzi Omega, 2004, "Diseño e Implementación de un Sistema de Control Supervisor para la Planta Generadora de Dióxido de Cloro, Proceso R-8, en CMPC Celulosa S.A. Planta PACÍFICO", Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de La Frontera.

Sala A., Guerra T. M., Babusca R. (2005). "Perspectives of fuzzy system and control", Fuzzy Sets and Systems: **156**; 432–444.

Wang W., Han-Xiong Li, Zhang J. (2003) "A hybrid approach for supervisory control of furnace temperature", Control Engineering Practice **11** 1325–1334.

Zimmermann, H., 1934. "Fuzzy set theory--and its applications". 3º Edición, Kluwer Academia, Boston

Anexos

Anexo A: “Conjuntos, Lógica y Control Difuso”

A.1 Conjuntos Difusos: Lógica Difusa

La lógica difusa fue investigada, por primera vez, a mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley (California) por el ingeniero Lofty A. Zadeh cuando se dio cuenta de lo que él llamó principio de incompatibilidad: “Conforme la complejidad de un sistema aumenta, nuestra capacidad para ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye hasta el umbral más allá del cual, la precisión y el significado son características excluyentes”. Introdujo entonces el concepto de conjunto difuso (Fuzzy set) bajo el que reside la idea de que los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas. La lógica difusa permite representar el conocimiento común, que es mayoritariamente lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos. Permite trabajar a la vez con datos numéricos y términos lingüísticos; los términos lingüísticos son inherentemente menos precisos que los datos numéricos pero en muchas ocasiones aportan una información más útil para el razonamiento humano.

El aspecto central de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que a diferencia de los que se basan en la lógica clásica, tienen la capacidad de reproducir aceptablemente los modos usuales del razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Más formalmente se puede decir que si la lógica es la ciencia de los principios formales y normativos del razonamiento, la lógica difusa o borrosa se refiere a los principios formales del razonamiento aproximado, considerando el razonamiento preciso (lógica clásica) como caso límite. Así pues, las características más atractivas de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no-lineales, y su base en el lenguaje natural.

En 1974, se encuentra un hito importante en el desarrollo de la lógica difusa establecido por Assilian y Mamdani al desarrollar el primer controlador difuso diseñado

para una máquina de vapor, pero la primera implementación real de un controlador de este fue realizada en 1980 por F.L. Smidth & Co. en una planta cementera en Dinamarca. En 1983 Fuji aplica la lógica difusa para el control de inyección química en plantas depuradoras de agua por primera vez en Japón y en 1987 Hitachi pone en marcha un controlador fuzzy para el control del metro de Sendai, y la empresa Omron desarrolla los primeros controladores difusos comerciales.

Por otra parte, y en forma paralela al desarrollo de aplicaciones de la lógica difusa, en la década de los ochenta, Takagi y Sugeno desarrollan la primera aproximación para construir reglas fuzzy a partir de datos de entrenamiento que más tarde se convierte en el punto de partida para investigar la identificación de modelos fuzzy. Otro de los factores que contribuye a seguir con la investigación en este campo es el creciente interés en las redes neuronales y su similitud con los sistemas fuzzy; la tendencia es buscar vías de relación entre las dos técnicas y los resultados son los llamados neuro-fuzzy system, sistemas fuzzy que usan métodos de aprendizaje basados en redes neuronales para identificar y optimizar sus parámetros. B. Kosko es conocido por su contribución a los sistemas neuro-fuzzy y con sus aplicaciones introdujo en la lógica difusa a muchos lectores interesados en las redes neuronales.

En las décadas de los noventa, además de las redes neuronales y los sistemas fuzzy, hacen su aparición los algoritmos genéticos. Estas tres técnicas computacionales, que pueden combinarse de múltiples maneras y se pueden considerar complementarias, son herramientas de trabajo muy potentes en el campo de los sistemas de control en las últimas décadas.

A.2 Teoría de Conjuntos Difusos. Lógica difusa

Introducción

El Cálculo Proposicional trata de las combinaciones de variables lógicas en proposiciones arbitrarias que representan a su vez variables lógicas. Básicamente estas proposiciones representarán las reglas heurísticas de control. Los elementos básicos para la construcción del cálculo proposicional son las sentencias y conectivos lógicos, mediante los cuales se pueden interrelacionar varias sentencias para constituir otras más complejas.

A partir del Cálculo Proposicional, la verdad o falsedad de una sentencia compuesta puede determinarse a partir de la verdad o falsedad de sus sentencias componentes, siempre que éstas se hayan construido de acuerdo con el cálculo operacional establecido.

Las diferentes Lógicas que se utilizan como bases para el razonamiento pueden distinguirse esencialmente por tres características concretas:

- Valores de Verdad.
- Vocabulario (Operadores lógicos, p. ej. AND, OR, etc.).
- Procedimiento de Inferencia o Razonamiento.

En Lógica Booleana (Lógica “Clásica” o Lógica Bivaluada), los *valores de verdad* pueden ser 0 (FALSO) ó 1 (VERDADERO) y los operadores se definen por medio de tablas de verdad perfectamente determinadas como la que se muestra en la tabla A.1.

La introducción de nuevos valores de verdad (p. ej., lógica tri-valuada, tetra-valuada, n-valuada o incluso valuada continuamente) dio lugar a la aparición en los años 20 de diversos sistemas de Lógica Multivaluada, pero su desarrollo no pasó de lo puramente académico.

Tabla A.1 Tabla de verdad de la función lógica AND

A	B	AND
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

La Lógica Difusa, que hoy en día se encuentra en constante evolución, nació en los años 60 como la lógica del razonamiento aproximado, y en ese sentido podía considerarse una extensión de la Lógica Multivaluada. La Lógica Difusa actualmente está relacionada y fundamentada en la teoría de los Conjuntos Difusos. Según esta teoría, el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto va a venir determinado por una función de pertenencia, que puede tomar todos los valores reales comprendidos en el intervalo $[0,1]$, diferencia de la teoría de conjuntos clásica, donde un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto otorgándole un grado de pertenencia 1 ó 0. La representación de la función de pertenencia de un elemento a un Conjunto Difuso se representa según la figura A.1.

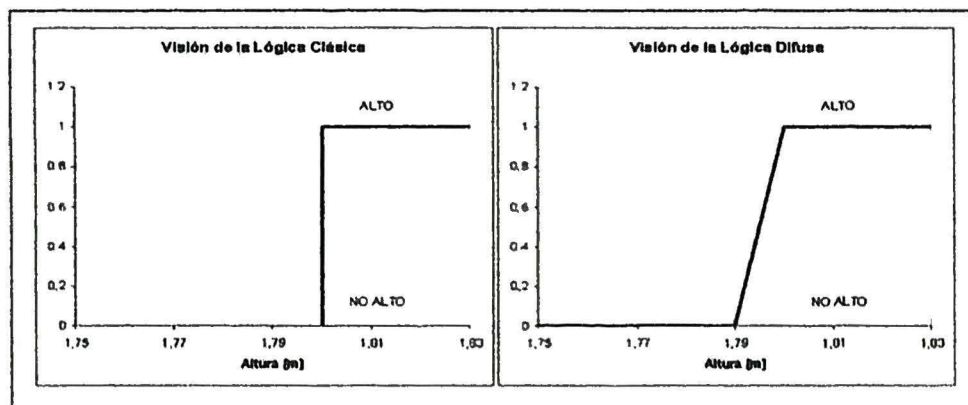


Figura A.1 Lógica clásica versus lógica difusa

Los *operadores lógicos* que se utilizarán en Lógica Difusa (AND, OR, etc.) se definen también usando tablas de verdad, pero mediante un "principio de extensión" por el

cual gran parte del aparato matemático clásico existente puede ser adaptado a la manipulación de los Conjuntos Difusos y, por tanto, a la de las variables lingüísticas.

La operación más importante para el desarrollo y creación de reglas lógicas es la implicación, simbolizada por " $\rightarrow$ " que representa el "Entonces" de las reglas heurísticas: Si (...) Entonces ($\rightarrow$) (...).

Así, en la lógica difusa hay muchas maneras de definir la implicación. Se puede elegir una "función (matemática) de implicación" distinta en cada caso para representar a la implicación.

La última característica de los sistemas lógicos es el *procedimiento de razonamiento*, que permite inferir resultados lógicos a partir de una serie de antecedentes. Generalmente, el razonamiento lógico se basa en silogismos, en los que los antecedentes son por un lado las proposiciones condicionales (nuestras reglas), y las observaciones presentes por otro (serán las premisas de cada regla).

Los esquemas de razonamiento utilizados son "esquemas de razonamiento aproximado", que intentan reproducir los esquemas mentales del cerebro humano en el proceso de razonamiento. Estos esquemas consistirán en una generalización de los esquemas básicos de inferencia en lógica binaria (silogismo clásico).

Tan importante será la selección de un esquema de razonamiento como su representación material, ya que el objetivo final es poder desarrollar un procedimiento analítico concreto para el diseño de controladores difusos y la toma de decisiones en general.

Una vez que dispongamos de representaciones analíticas de cada uno de los elementos lógicos que acabamos de enumerar, estaremos en disposición de desarrollar formalmente un controlador "heurístico" que nos permita inferir el control adecuado de un

determinado proceso en función de un conjunto de reglas “lingüísticas”, definidas de antemano tras la observación de la salida y normas de funcionamiento de éste.

Conjuntos Difusos: Lógica Difusa.

Los conjuntos clásicos se definen mediante un predicado que da lugar a una clara división del Universo de discurso X en los valores “Verdadero” y “Falso”. Sin embargo, el razonamiento humano utiliza frecuentemente predicados que no se pueden reducir a este tipo de división: son los denominados *predicados vagos*.

Por ejemplo, tomando el Universo de discurso formado por todas las posibles temperaturas ambientales en una habitación, se puede definir en dicho universo el conjunto A como aquél formado por las temperaturas “cálidas”.

Por supuesto, es imposible dar a A una definición clásica, ya que su correspondiente predicado no divide el universo X en dos partes claramente diferenciadas. No podemos afirmar con rotundidad que una temperatura es “cálida” o no lo es. El problema podría resolverse en parte considerando que una temperatura es “cálida” cuando su valor supera cierto umbral fijado de antemano. Se dice que el problema tan sólo se resuelve en parte, y de manera no muy convincente, por dos motivos: de una parte el umbral mencionado se establece de una manera arbitraria, y por otro lado podría darse el caso de que dos temperaturas con valores muy diferentes fuesen consideradas ambas como “cálidas”. Evidentemente, el concepto “calor” así definido nos daría una información muy pobre sobre la temperatura ambiental.

La manera más apropiada de dar solución a este problema es considerar que la pertenencia o no pertenencia de un elemento x al conjunto A no es absoluta sino gradual. En definitiva, definiremos A como un conjunto difuso. Su función de pertenencia ya no adoptará valores en el conjunto discreto $\{0,1\}$ (lógica booleana), sino en el intervalo cerrado $[0,1]$. En conclusión podemos observar que los conjuntos difusos son una generalización de los conjuntos clásicos.

Mediante notación matemática se define un conjunto difuso B como:

$$\begin{aligned} A &= (x, \mu_A(x) / x \in U) \\ \mu_A(x) &: U \rightarrow [0,1] \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

La función de pertenencia se establece de una manera arbitraria, lo cual es uno de los aspectos más flexibles de los conjuntos difusos. Por ejemplo, se puede convenir que el grado de pertenencia de una temperatura de "45°C" al conjunto A es 1, el de "25°C" es 0.4, el de "6°C" es 0, etc.: cuanto mayor es el valor de una temperatura, mayor es su grado de pertenencia al conjunto A .

Tómese ahora el Universo de discurso de la edad. El conjunto difuso "Joven" representa el grado de pertenencia respecto al parámetro juventud que tendrían los individuos de cada edad. Es decir, el conjunto expresa la posibilidad de que un individuo sea considerado joven. Un conjunto difuso podría ser considerado como una distribución de posibilidad, que es diferente a una distribución de probabilidad.

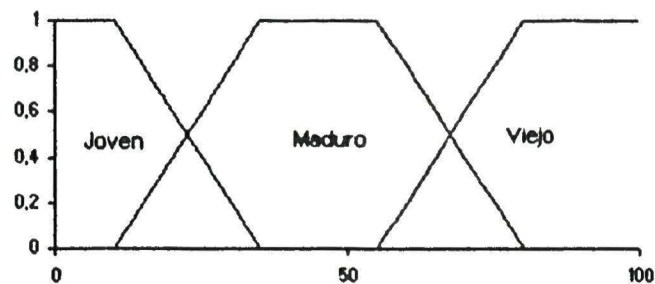


Figura A.2 Ejemplo de Conjuntos Difusos en el universo de la edad.

Se puede observar que los conjuntos difusos de la figura A.2 se superponen, por lo que un individuo x_1 podría tener distintos grados de pertenencia en dos conjuntos al mismo

tiempo: "Joven" y "Maduro". Esto indica que posee cualidades asociadas con ambos conjuntos. El grado de pertenencia de x en A , como ya se ha señalado anteriormente, se representa por $\mu_A(x)$.

Tómese un individuo x cuya edad sea de 30 años. Como se puede observar en la figura, pertenece al conjunto difuso "Joven" y al conjunto difuso "Maduro". Se puede observar que posee un grado de pertenencia $\mu_A(x)$ de 0.6 para el conjunto difuso "Joven" y un grado de 0.4 para el conjunto difuso "Maduro"; también posee un grado de 0 para "Viejo". De este ejemplo se puede deducir que un elemento puede pertenecer a varios conjuntos difusos a la vez con distinto o igual grado. Así, nuestro individuo x tiene un grado de pertenencia mayor al conjunto "Joven" que al conjunto "Maduro" ($0.6 > 0.4$), pero no se puede decir, tratándose de conjuntos difusos, que x es joven o que x es maduro de manera rotunda.

Operaciones con conjuntos difusos

A los conjuntos borrosos se le pueden aplicar determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto difuso se obtiene otro conjunto difuso; de la misma manera al combinar dos o más conjuntos mediante alguna operación, se obtendrá otro conjunto difuso. Las operaciones básicas entre conjuntos difusos son las siguientes:

- El conjunto complemento de $\bar{A}$ de un conjunto difuso A es aquel cuya función característica viene definida por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{A.2})$$

- La intersección de dos conjuntos difusos A y B es $A \cap B$ en U con función característica:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{A.3})$$

- La unión de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cup B$ en U cuya función de pertenencia es:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{A.4})$$

Estas tres operaciones definidas para conjuntos difusos cumplen, al igual que en la teoría clásica de conjuntos, asociatividad, conmutatividad, distributividad así como las leyes de Morgan.

Las funciones que definen la intersección y la unión de conjuntos difusos, pueden generalizarse, a condición de cumplir ciertas restricciones. Las funciones que cumplen estas condiciones se conocen como Norma Triangular o *T-Norma* y Conorma triangular o *T-Conorma* o también *S-Norma*.

t-normas y s-normas.

t-normas

Una t-norma es una función que se puede definir de muchas formas distintas, y que viene denotada por el operador $t(x, y)$ que opera sobre el conjunto $[0,1] \times [0,1]$ y produce resultados en el conjunto $[0,1]$ ($[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$), con las siguientes propiedades:

Si dos Conjuntos Difusos están definidos sobre el mismo Universo de Discurso U , la intersección entre los dos puede asociarse a un nuevo Conjunto Difuso, cuya función de pertenencia está determinada por la aplicación de una t-norma sobre las funciones de pertenencia individuales de los dos conjuntos:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{A.5})$$

Las t-norma típicamente usada en los FLC⁶ son:

- Producto Lógico (Mínimo):

$$t(x, y) = \min(x, y) \quad (\text{A.6})$$

- Producto Algebraico:

$$t(x, y) = x \cdot y \quad (\text{A.7})$$

t-conormas

Una -conorma es una función que se puede definir de muchas formas distintas, y que viene denotada por el operador $s(x, y)$ que opera sobre el conjunto $[0,1] \times [0,1]$ y produce resultados en el conjunto $[0,1]$ ($[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$), con las siguientes propiedades:

Si dos Conjuntos Difusos están definidos sobre el mismo Universo de Discurso U , la unión entre los dos puede asociarse a un nuevo conjunto difuso cuya función de pertenencia está determinada por la aplicación de una t-conorma sobre las funciones de pertenencia individuales de los dos conjuntos:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{A.8})$$

Las t-conorma típicamente usada en los FLC son:

- Suma Lógica (Máximo):

$$s(x, y) = \max(x, y) \quad (\text{A.9})$$

- Suma Algebraica:

$$s(x, y) = x + y \quad (\text{A.10})$$

FLC: Fuzzy Logic Controller

A.3 Lógica difusa. Variables Lingüísticas, Operadores Lógicos y Procedimientos de inferencia

Variables y valores lingüísticos

Se denomina variable lingüística a aquella variable que puede tomar por valor términos del lenguaje natural, por ejemplo, temperatura, estatura, edad, etc., y se denomina valores o etiquetas lingüísticas a las particiones difusas que podemos generar en la variable lingüística, formando cada valor lingüístico un conjunto difuso. En la figura A.3 se muestra un típico ejemplo donde se puede ver los valores lingüísticos baja, media y alta para la variable lingüística temperatura, que en rigor son tres conjuntos difusos.

Formalmente una variable lingüística se define como un conjunto de 5 elementos: (N, U, T(N), G, M), donde:

- N es el nombre de la variable y U dominio subyacente o universo de discurso
- T(N) es el conjunto de términos o etiquetas que puede tomar N
- G es una gramática para generar las etiquetas de T(N): “muy alta”, “no muy bajo”, “extremadamente normal”, etc.
- M es una regla semántica que asocia cada elemento de T(N) con un conjunto difuso en U de entre todos los posibles: $M: T(N) \rightarrow F(U)$

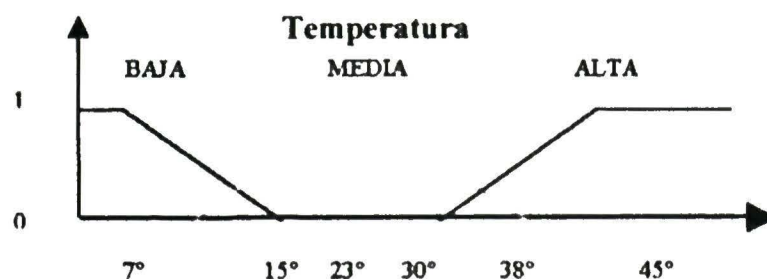


Figura A.3 Variables y valores lingüísticos.

Relaciones Difusas: Operadores Lógicos (AND, OR)

Las operaciones vistas anteriormente de unión, intersección y complemento se aplican dentro de un mismo Universo de discurso. Ahora bien, el producto cartesiano permite realizar productos de elementos que se encuentren en Universos de discurso diferentes.

Para definir el producto cartesiano tómense dos Universo de discurso: X e Y . Se define una relación difusa R entre X e Y como un conjunto difuso cuyo Universo de discurso es el producto cartesiano $X \times Y$.

Si $A_1 \subset X$ y $A_2 \subset Y$, y se define el producto cartesiano de A_1 y A_2 como:

$$\mu_{A_1 \times A_2}(x, y) = \min\{\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(y)\} \quad (\text{A.11})$$

La función se representa de la relación difusa puede representarse de acuerdo a la figura A.3.

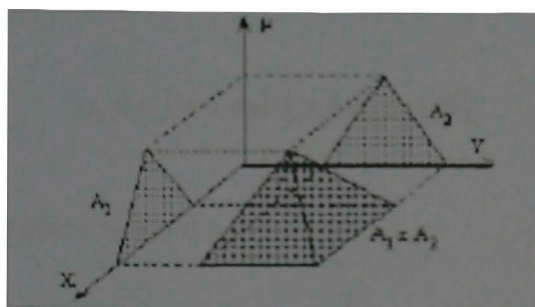


Figura A.4 Producto cartesiano de dos universos de discurso X e Y .

La utilidad más destacada de las relaciones difusas es poder actuar como operadores conectivos.

A.4 Teoría de Controladores basados en Lógica difusa

En la actualidad, una de las áreas de aplicación más importantes de la *Teoría de Conjuntos Difusos* y de la *Lógica Difusa*, la componen los sistemas basados en reglas difusas. Este tipo de sistemas constituyen una extensión de los sistemas basados en reglas que hacen uso de la lógica clásica puesto que emplean reglas de tipo “*Si-entonces*” en las que los antecedentes y consecuentes están compuestos por proposiciones difusas en lugar de proposiciones de la lógica clásica.

Es común el nombre de *Controladores Difusos* para nombrar estos sistemas tanto para modelado como para control. A lo largo de este trabajo se utilizará esa denominación.

A.3.1 Tipos de Controladores Difusos

En la literatura especializada, se suele distinguir entre dos tipos de controladores difusos para modelado y control difuso, según la forma que presentan las reglas difusas que emplean. En las subsecciones siguientes se describen ambos tipos.

Controladores Difusos Tipo Mamdani

El primer tipo de controlador difuso que trabajó con entradas y salidas reales fue propuesto por Mamdani, este tipo de sistemas difusos, uno de los más utilizados, se conocen también por el nombre de controladores difusos con fuzzificador y defuzzificador.

Las reglas son del tipo “*Si - entonces*” y en el caso en que el controlador tipo Mamdani tenga múltiples entradas y una única salida, presentan la siguiente estructura:

$$\text{IF } X_1 \text{ is } A_1 \text{ and } X_2 \text{ is } A_2 \text{ and } \dots X_n \text{ is } A_n \text{ THEN } Y \text{ is } B, \quad (\text{A.14})$$

donde X , e Y son variables lingüísticas de entrada y salida respectivamente, y los A , y B son valores o etiquetas lingüísticas asociadas a dichas variables.

Los controladores difusos emplean un sistema de Inferencia que efectúa el razonamiento difuso teniendo en cuenta la información contenida en una base de conocimiento. Los componentes que dotan al sistema de la capacidad de manejar entradas y salidas reales son los interfaces de *Fuzzificación* y *Defusificación*. El primero establece una aplicación entre puntos precisos en el dominio U de las entradas del sistema y conjuntos difusos definidos sobre el mismo universo de discurso, mientras que el segundo realiza la operación inversa estableciendo una aplicación entre conjuntos difusos definidos en el dominio V de las salidas y puntos precisos definidos en el mismo universo. La figura A.5 muestra la estructura general de los controladores de tipo Mamdani.

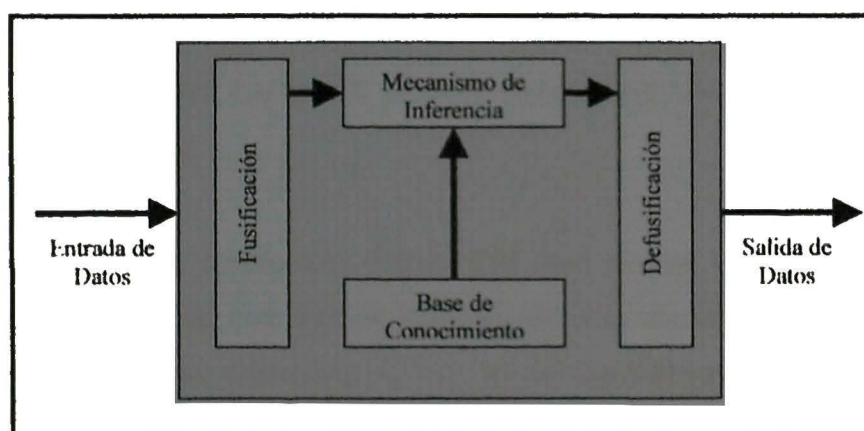


Figura A.5 Esquema básica de un controlador difuso tipo Mamdani.

Estos controladores tipo Mamdani presentan una serie de características muy interesantes. Por un lado, proporcionan un marco natural para incluir conocimiento experto en forma de reglas lingüísticas permitiendo combinar éste con reglas obtenidas a partir de ejemplos del comportamiento del sistema de un modo muy sencillo. Por otro, presentan una

gran libertad a la hora de elegir los mecanismos de fuzzificación y defusificación, así como el sistema de inferencia.

Controladores Difusos Tipo Takagi-Sugeno

Los controladores tipo Takagi-Sugeno proponen un modelo que emplea reglas en las que el antecedente está constituido por variables lingüísticas o difusas y el consecuente representa una función de las variables de entrada. La forma más general de este tipo de reglas es la siguiente, en la que el consecuente constituye una combinación lineal de las variables contenidas en el antecedente de la regla:

$$\text{IF } X_1 \text{ is } A_1 \text{ and } X_2 \text{ is } A_2 \text{ and } \dots X_n \text{ is } A_n \text{ THEN } Y = p_1 \cdot X_1 + \dots + p_n \cdot X_n + p_0 \quad (\text{A.15})$$

donde X_i son las variables de entrada del sistema, Y es la variable de salida y los p_i son parámetros reales. Este tipo de reglas suelen denominarse *reglas difusas de tipo TSK* aludiendo a sus creadores. La letra K procede de un tercer autor, Kang, que desarrolló el modelo con los primeros.

La salida de un controlador difuso TSK que emplea una base de conocimiento formada por m reglas de este tipo se obtiene como la media ponderada de las salidas individuales aportadas por cada regla, Y_i , $i=1\dots m$, del siguiente modo:

$$\frac{\sum_{i=1}^m h_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^m h_i Y_i}, \quad (\text{A.16})$$

donde $h_i = T(A_1(x_1), \dots, A_n(x_n))$ es llamado o conocido como *grado de emparejamiento* entre la parte antecedente de la regla i y las entradas actuales al sistema, $x = (x_1, \dots, x_n)$, donde T es un operador de conjunción que se modela mediante una t-norma.

En la figura A.6 se muestra una representación gráfica de este segundo tipo de controlador. Los controladores difusos TSK han sido aplicados con éxito a una gran cantidad de problemas prácticos. Su ventaja principal es que presentan una ecuación compacta del sistema gracias a lo cual es posible estimar los parámetros p_i empleando métodos clásicos, lo que facilita su diseño. Sin embargo, su mayor inconveniente está también relacionado con la forma de los consecuentes de las reglas, que no son conjuntos difusos, con lo que no constituyen un marco de trabajo natural para representar el conocimiento experto. Es posible integrar conocimiento experto en este tipo de controladores efectuando una pequeña modificación sobre el consecuente de la regla: cuando un experto aporta una regla lingüística del tipo de las introducidas en la sección anterior con consecuente *Y es B*, se sustituye dicho consecuente por $Y = p_0$, donde p_0 toma como valor el punto modal del conjunto difuso asociado a la etiqueta *B*. Este tipo de reglas se suelen denominar reglas TSK simplificadas.

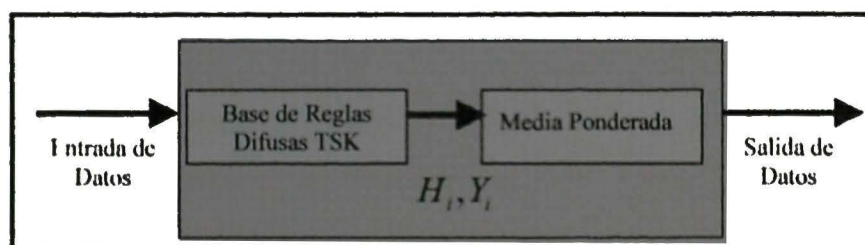


Figura A.6 Esquema básica de un controlador difuso tipo Takagi-Sugeno.

A.3.2 Funcionamiento y componentes de los Controladores Difusos Tipo Mandani

Tal como se expuso en la sección anterior, un controlador difuso tipo Mandani está conformado por lo siguientes componentes:

- *Base de Conocimiento:* Contiene las reglas lingüísticas que guían el comportamiento del mismo.

- *Fuzzificación*: Se encarga de transformar los datos precisos de entrada en valores manejables en el proceso de razonamiento difuso, es decir, en algún tipo de conjunto difuso,
- *Sistema de Inferencia*: Emplea estos valores y la información contenida en la base de conocimiento para llevar a cabo dicho proceso, y
- *Defusificación*: Transforma la acción difusa resultante del proceso de inferencia en una acción precisa que constituye la salida global del controlador

Se expone detenidamente cada uno de estos componentes en cada una de las secciones siguientes.

La Base de Conocimiento

La base de conocimiento es una de las partes esenciales del controlador desde el punto de vista de que los tres componentes restantes del sistema se emplean para interpretar las reglas contenidas en ella y hacerlas manejables en problemas concretos.

La base de conocimiento está formada a su vez por dos componentes distintos: la Base de Datos y la Base de Reglas:

- La *Base de Reglas* está formada por un conjunto de reglas lingüísticas de tipo "Si - entonces" que, en el caso de controladores con múltiples entradas y una única salida, presentan la estructura de la ecuación (2.19).
- La *Base de Datos* contiene la definición de los conjuntos difusos asociados a los términos lingüísticos empleados en las reglas de la base de reglas, así como los valores de los factores de escala que transforman el universo de discurso en que están definidas las variables de entrada y salida del sistema.

Fuzzificación

Este componente es uno de los que permite al controlador de tipo Mamdani manejar entradas y salidas reales. Su tarea es la de establecer una aplicación que haga corresponder un conjunto difuso, definido en el universo de discurso de la entrada en cuestión, a cada valor preciso del espacio de entrada. Así, la fuzzificación trabaja del siguiente modo:

$$A' = F(x_0). \quad (\text{A.17})$$

donde x_0 es un valor preciso de entrada al controlador definido en el universo de discurso U , A' es un conjunto difuso definido sobre el mismo dominio U y F es un operador de fuzzificación o función de pertenencia o de membresía, también conocidas como membership.

La definición de la función característica utilizada, depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y variará de acuerdo al diseñador. La única condición que debe cumplir una función característica es que tome valores entre 0 y 1, de manera continua. Las membership más comúnmente utilizadas por su simplicidad matemática y su manejabilidad son: triangular, trapezoidal, gaussiana, campana, etc. que son mostradas en la figura A.7 y son descritas a continuación:

- Funciones triangulares, con parámetros $\{a,b,c\}$, donde

$$\text{triang}_{a,b,c}(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right] \quad (\text{A.18})$$

- Funciones trapezoidales, con parámetros $\{a,b,c,d\}$, donde

$$\text{trap}_{a,b,c,d}(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right] \quad (\text{A.19})$$

- Funciones gaussianas, con parámetros $\{\sigma, c\}$, donde

$$gauss_{\sigma, c}(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}} \quad (A.20)$$

- Funciones campana, con parámetros $\{a, b, c\}$, donde

$$bell_{a, b, c}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (A.21)$$

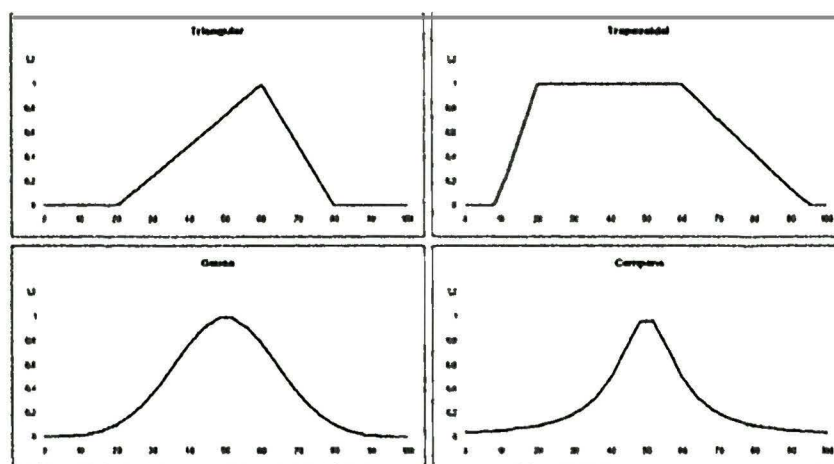


Figura A.7 Membership más habituales: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana y (d) campana.

Conceptualmente existen dos aproximaciones para determinar la función característica asociada a un conjunto: la primera aproximación está basada en el conocimiento humano de los expertos, y la segunda aproximación es utilizar una colección de datos para diseñar la función.

El Sistema de Inferencia

El Sistema de Inferencia es el componente encargado de llevar a cabo el proceso de inferencia difusa. Para ello, hace uso de principios de la lógica difusa para establecer una aplicación entre conjuntos difusos definidos en $U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ y conjuntos difusos definidos en V , donde $U_1, \dots, U_n$ y V son los dominios en los que están definidas las variables de entrada $X_1, \dots, X_n$ y la de salida Y , respectivamente.

En la teoría clásica proposicional existen dos importantes reglas de inferencia, el *Modus Ponens* y el *Modus Tollens*:

- El Modus Ponens o razonamiento directo puede resumirse de la siguiente forma:

Premisa : “ x es A ”
 Regla : “SI x es A , ENTONCES y es B ”
 Consecuencia : “ y es B ”

- El Modus Tollens o razonamiento inverso puede resumirse de la siguiente forma:

Premisa : “ y no es B ”
 Regla : “SI x es A , ENTONCES y es B ”
 Consecuencia : “ x no es A ”

El Modus Ponens es el utilizado en las aplicaciones de lógica a la ingeniería ya que conserva la relación causa efecto o sentido físico, mientras que Modus Tollens apenas se utiliza.

En la lógica difusa el Modus Ponens se extiende a lo que se llama Modus Ponens Generalizado (MPG) y que puede resumirse de la siguiente forma:

- Modus Ponens Generalizado (MPG)

Premisa : “ x es A^* ”
 Regla : “SI x es A , ENTONCES y es B ”
 Consecuencia : “ y es B^* ”

En donde el conjunto difuso A^* no tiene por qué ser necesariamente el mismo que el conjunto difuso A del antecedente de la regla y el conjunto difuso B^* tampoco tiene por qué ser necesariamente el mismo que el conjunto difuso B que aparece en el consecuente de la regla.

Para llevar a la práctica el MPG es necesario en primer lugar interpretar el tipo de regla que emplea el controlador. Una regla con la forma "Si X es A entonces Y es B " representa una relación difusa entre A y B definida en $U \times V$. Dicha relación difusa se expresa mediante un conjunto difuso R cuya función de pertenencia $\mu_R(x, y)$ presenta la forma:

$$\forall x \in U, y \in V : \mu_R(x, y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y)), \quad (\text{A.22})$$

donde $\mu_A(x)$ y $\mu_B(y)$ son las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos A y B , respectivamente, e I es un operador de implicación difuso que modela la relación difusa existente.

La función de pertenencia del conjunto difuso B' , resultante de la aplicación del Modus Ponens Generalizado, se obtiene a partir de la *Regla Composicional de Inferencia*, introducida por Zade del siguiente modo: "Si R es una relación difusa definida de U a V y A' es un conjunto difuso definido en U , entonces el conjunto difuso B' , inducido por A' , viene dado por la composición de R y A' ", es decir:

$$B' = A' \circ R \quad (\text{A.23})$$

De este modo, cuando la regla composicional de inferencia se aplica sobre reglas cuyo antecedente está formado por n variables de entrada y cuyo consecuente presenta una única variable de salida toma la siguiente expresión:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in U} \{T(\mu_A(x), I(\mu_A(x), \mu_B(y)))\}, \quad (\text{A.24})$$

donde $\mu_i(x) = T(\mu_{i_1}(x), \dots, \mu_{i_k}(x))$, $\mu_i(x) = I(\mu_{i_1}(x), \dots, \mu_{i_k}(x))$, T y I son operadores de conjunción difusos e I es un operador de implicación.

Como en la mayoría de los casos la fuzzificación transforma la entrada $x_0 = (x_1, \dots, x_n)$ que recibe el sistema en una serie de conjuntos difusos puntuales $A'_1, \dots, A'_n$, la expresión de la regla composicional de inferencia queda finalmente reducida a la forma:

$$\mu_n(y) = I(\mu_i(x), \mu_n(y)). \quad (\text{A.25})$$

Por tanto, desde un punto de vista operativo, un dispositivo de inferencia difusa de un controlador deberá realizar las siguientes tareas sobre cada regla individual de la base de conocimiento:

- Determinar $\mu_i(x_0)$, mediante el *Operador de Conjunción*.
- Aplicar del *Operador de Implicación*, A .

Operador de conjunción

El cálculo de $\mu_A(x_0)$ consiste en la aplicación de un *operador de conjunción* sobre los $\mu_{i_1}(x)$

$$\mu_A(x_0) = T(\mu_{i_1}(x), \dots, \mu_{i_k}(x)) \quad (\text{A.26})$$

El valor que resulta de la agregación de las entradas mediante el operador de conjunción recibe el nombre de *grado de emparejamiento* de dichas entradas con la regla. El grado de emparejamiento representa, en definitiva, una medida de "coincidencia" de los valores que toman las variables de entrada con los valores lingüísticos que describen el antecedente de esa regla. El operador de conjunción T se modela habitualmente con una *t-norma*.

Operadores de Implicación

El operador de implicación es definido en la lógica clásica de acuerdo a la tabla A.2.

Tabal A.2 Tabla de verdad del conector lógico implicación

A	B	$A \rightarrow B$
1	1	1
1	0	0
0	1	1
0	0	1

En la literatura existe una gran variedad de definición de operadores de implicación, en la tabla A.3 se muestran alguno de ellos.

Tabla A.3 Definiciones del Operador Implicación.

Nombre	Definición del Operador de Implicación
Early Zadeh	$I_z(x, y) = \max(1 - x, \min(x, y))$
Lukasiewiicz	$I_L(x, y) = \min(1, 1 - x + y)$
Minimum (Mandani)	$I_c(x, y) = \min(x, y)$
Standard Star (Gödel)	$I_g(x, y) = \begin{cases} 1 & x \leq y \\ y & \text{otro} \end{cases}$
Kleene-Dienes	$I_b(x, y) = \max(1 - x, y)$
Gaines	$I_v(x, y) = \begin{cases} 1 & x \leq y \\ y/z & \text{otro} \end{cases}$
Yager	$I_f(x, y) = y^x$

Defusificación

El modo de trabajo del sistema de inferencia de un controlador de tipo Mamdani se aplica al nivel de regla individual. Una vez aplicada la regla composicional de inferencia

sobre las m reglas que componen la base de reglas, se obtienen m conjuntos difusos B_i' que representan las acciones difusas que ha deducido el controlador a partir de las entradas que recibió.

Para realizar el proceso de defusificación se emplean parámetros asociados al conjunto difuso inferido. Estos son los *Valores Característicos*, los cuales se describen a continuación.

Los grados de Importancia de una regla R_i de la base de conocimiento son los siguientes:

- El Área de un conjunto difuso B' viene definida por la expresión:

$$Area = \int \mu_{B'}(u) du \quad (A.27)$$

- La altura de un conjunto difuso B' se define como:

$$I = \sup_{x \in X} \mu_{B'}(x) \quad (A.28)$$

En la definición de la mayoría de los métodos de defusificación se suelen emplear los citados *Valores Característicos* que a continuación se describen:

- Punto de Máximo Valor (PMV) de un conjunto difuso B' :

$$G = x \in X / \mu_{B'}(x) = I \quad (A.29)$$

- Centro de Gravedad (COG) de un conjunto difuso B' :

$$C(X_i) = \frac{\int V \cdot \mu_{\pi_i}(y) dy}{\int \mu_{\pi_i}(y) dy} \quad (\text{A.30})$$

Puesto que el sistema debe devolver una salida precisa, el sistema de defusificación asume la tarea de combinar o agregar la información aportada por los conjuntos difusos individuales y transformarla en un valor preciso. Existen dos formas de trabajo distintas para ello que se describen a continuación.

Modo A: Agregar primero y defuzzificar después.

Conocido también como FATI (First Aggregate Then Infer), ésta estrategia funciona de acuerdo a las siguientes etapas:

1.- Agregar los conjuntos difusos individuales inferidos, B_i' , para obtener un conjunto difuso final B' , empleando para ello un operador de agregación difuso, G , que modela el operador *también* que relaciona las reglas de la base de conocimiento:

$$\mu_{B'}(y) = G\{\mu_{B_1'}(y), \mu_{B_2'}(y), \dots, \mu_{B_n'}(y)\} \quad (\text{A.31})$$

2.- Transformar el conjunto difuso B' obtenido de la agregación en un valor preciso, y_0 , que será proporcionado como la salida global y final del sistema mediante un método de defuzificación D .

$$y_0 = D(\mu_{B'}(y)) \quad (\text{A.32})$$

Operadores de agregación

Como se ha indicado, esta agregación es un proceso encaminado a combinar la información procedente de los conjuntos difusos que provienen de la inferencia de cada

regla. El problema que se plantea es pues la definición de ese operador de agregación que obtenga un conjunto difuso B' partiendo de los conjuntos difusos individuales B' . Los operadores de agregación más comúnmente utilizados son las funciones t-conormas.

Entonces, para realizar la anteriormente citada defusificación del conjunto difuso resultante de la agregación B' , las posibilidades más comunes son las dos siguientes:

- La Media de los Máximos (MOM) del conjunto difuso B' .

$$\begin{aligned} y_1 &= \text{Inf}\{z / \mu_{B'}(z) = \text{Inf}\mu_{B'}(y)\} \\ y_2 &= \text{Sup}\{z / \mu_{B'}(z) = \text{Sup}\mu_{B'}(y)\} \\ y_0 &= \frac{y_1 + y_2}{2} \end{aligned} \quad (\text{A.33})$$

- El Centro de gravedad del conjunto difuso B' :

$$y_0 = \frac{\int y \cdot \mu_{B'}(y) dy}{\int \mu_{B'}(y) dy} \quad (\text{A.34})$$

Modo B: Defuzzificar primero y agregar después.

Conocido también como FITA (First Infer Then Agrégate), ésta estrategia considera individualmente la contribución de cada conjunto difuso inferido y la acción precisa final se obtiene mediante algún tipo de operación (bien una media, una suma ponderada o la selección de uno de ellos, entre otros) efectuada sobre un valor preciso característico obtenido a partir de cada conjunto difuso individual. De este modo, se evita el cálculo del conjunto difuso final B' , lo que ahorra una gran cantidad de tiempo de cálculo.

La variedad de métodos de defusificación que emplean el modo FIA es amplia y pueden clasificarse en familias según como estén formados. A continuación se presenta un conjunto representativo de las familias citadas:

- Sumas ponderadas por grado de importancia

Centro de gravedad ponderado por el área s_i :

$$y_0 = \frac{\sum s_i \cdot W}{\sum s_i} \quad (\text{A.35})$$

- a) Centro de gravedad ponderado por la altura

$$y_0 = \frac{\sum l_i \cdot W}{\sum l_i} \quad (\text{A.36})$$

- b) Punto de Máximo Valor ponderado por el área

$$y_0 = \frac{\sum s_i \cdot G}{\sum s_i} \quad (\text{A.37})$$

Punto de Máximo Valor ponderado por la altura

$$y_0 = \frac{\sum l_i \cdot G}{\sum l_i} \quad (\text{A.38})$$

- Basados en el conjunto difuso de mayor grado de importancia

Centro de gravedad del conjunto difuso con mayor área

$$B_k' = \{B_i' / s_i = \max(s_i), \forall i \in \{1, \dots, m\}\}, \quad (A.39)$$

$$y_0 = W_k$$

o Centro de gravedad del conjunto difuso con mayor altura

$$B_k' = \{B_i' / l_i = \max(l_i), \forall i \in \{1, \dots, m\}\}, \quad (A.40)$$

$$y_0 = W_k$$

o Punto de Máximo Valor del conjunto con mayor área

$$B_k' = \{B_i' / s_i = \max(s_i), \forall i \in \{1, \dots, m\}\}, \quad (A.41)$$

$$y_0 = G_k$$

o Punto de Máximo Valor del conjunto con mayor altura

$$B_k' = \{B_i' / y_i = \max(y_i), \forall i \in \{1, \dots, m\}\}, \quad (A.42)$$

$$y_0 = G_k$$

Aunque históricamente el primero de los dos métodos de trabajo propuestos fue el FATI, en los últimos años el modo FITA está siendo muy utilizado, ya que se evita el cálculo de un conjunto de salida difuso por agregación y por otra parte, considera el solapamiento de los conjuntos borrosos de salida.

Anexo B Superficies de salida simulados con FIS de Matlab

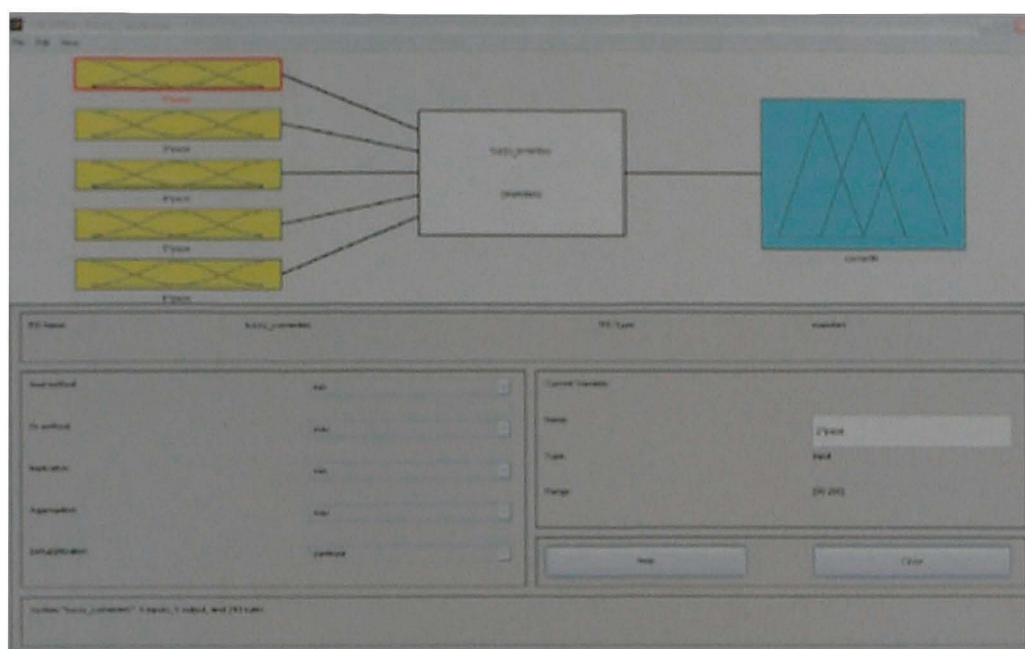


Figura B.1 FIS módulo fuzzy corrientes

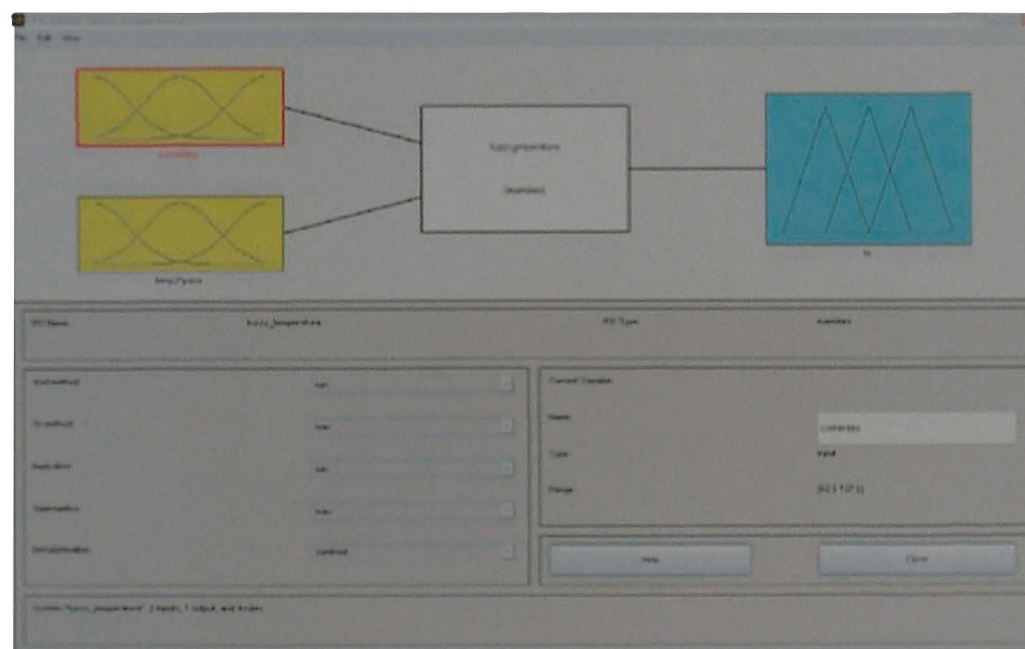


Figura B.2 FIS módulo fuzzy temperatura

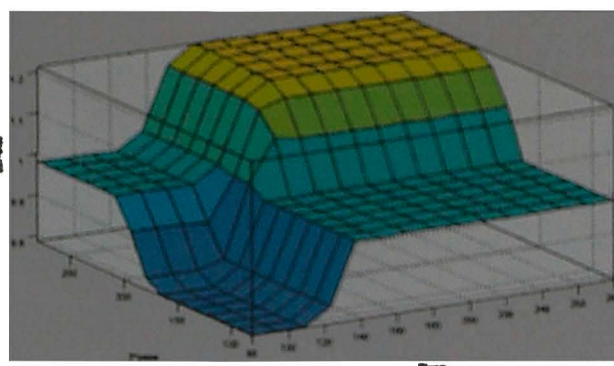


Figura B.3 Superficie de salida en función de variables 2º y 3º pase.

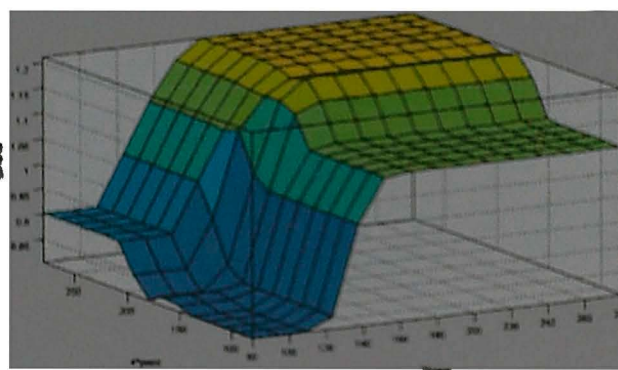


Figura B.4 Superficie de salida en función de variables 2º y 4º pase.

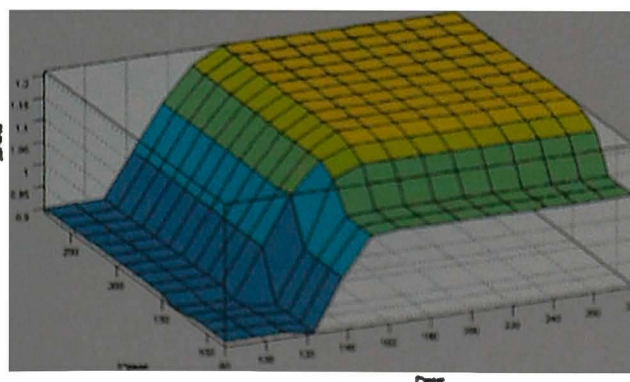


Figura B.5 Superficie de salida en función de variables 2º y 5º pase.

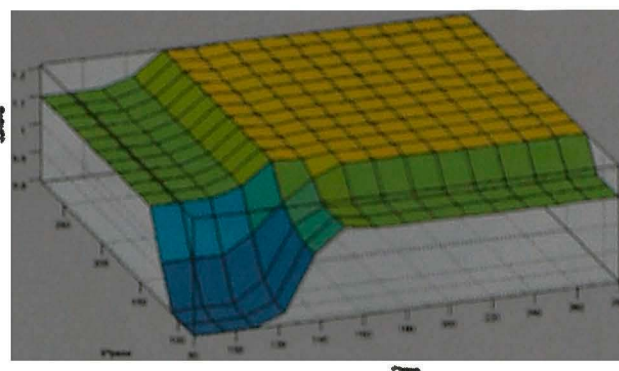


Figura B.6 Superficie de salida en función de variables 2º y 6º pase.

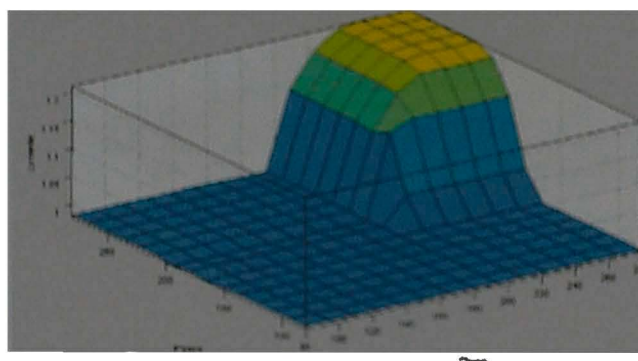


Figura B.7 Superficie de salida en función de variables 3º y 4º pase.

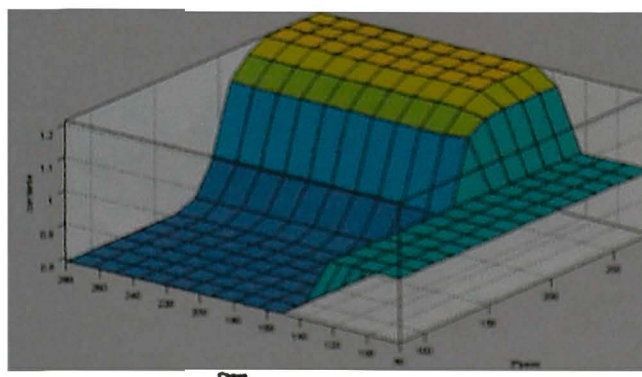


Figura B.8 Superficie de salida en función de variables 3º y 5º pase.

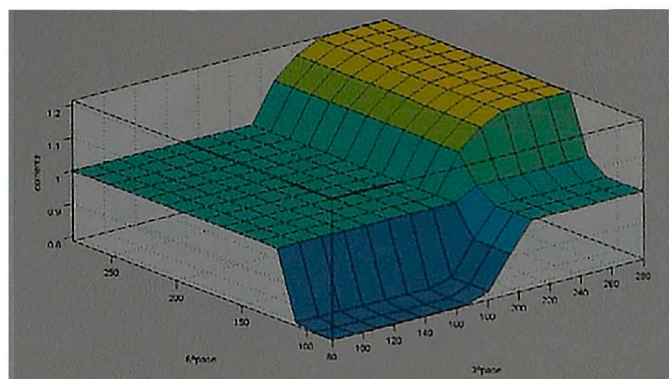


Figura B.9 Superficie de salida en función de variables 3º y 6º pase.

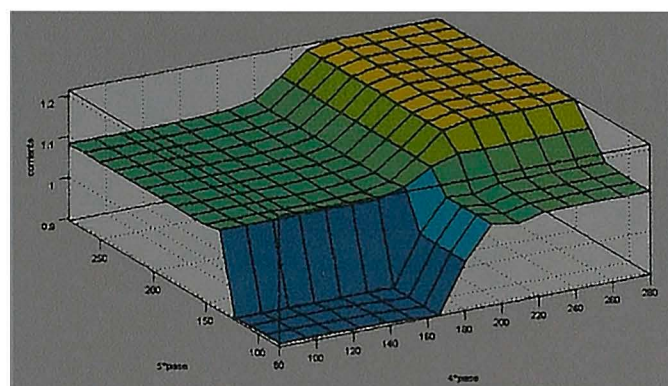


Figura B.10 Superficie de salida en función de variables 4º y 5º pase.

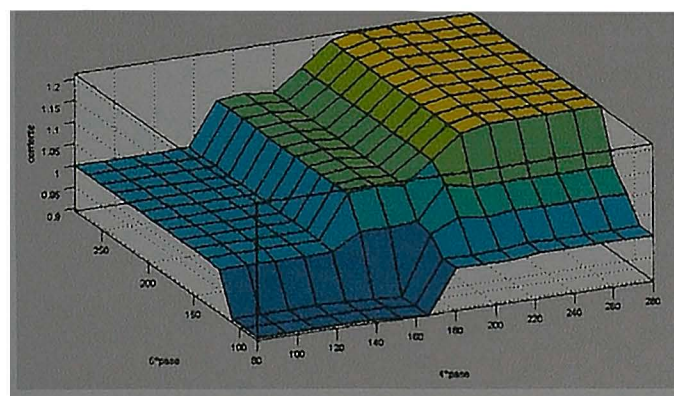


Figura B.11 Superficie de salida en función de variables 4º y 6º pase.

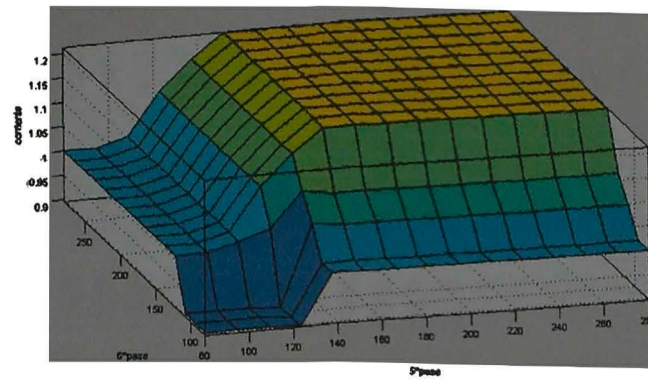


Figura B.12 Superficie de salida en función de variables 5º y 6º pase.

Anexo C Base de Reglas Módulo Fuzzy Corrientes

IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	fuerte	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Pequeña	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	baja

[illegible]

IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	baja
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	flaca	AND	4o pase	incrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	decrementada	AND	5o pase	elevada	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	cero	THEN	corrientes	optima
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	reducida	AND	6o pase	aumentada	THEN	corrientes	alta
IF	2o pase	Grande	AND	3o pase	correcta	AND	4o pase	idónea	AND	5o pase	neutra	AND	6o pase	disminuida	THEN	corrientes	optima

[illegible]

Diseño de un Sistema Supervisor en el Horno de Recalentamiento de Palanquillas durante Maniobra Gruesa