
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DE UN CALENTADOR DE INDUCCIÓN MAGNÉTICO PARA ALUMINIO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

PRESENTA:

ING. JOSÉ SAÚL ORTIZ PACHECO

ASESORES:

Director: DR. RAFAEL ORDOÑEZ FLORES.

Co-Director: DR. ROBERTO MORALES CAPORAL.

Tutor: DR. JOSÉ CRISPÍN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ.

Revisor: DR. EDMUNDO BONILLA HUERTA.

Apizaco, Tlax., 10 de agosto de 2016

No. de Oficio: DEPI/257/16

ASUNTO: Se Autoriza Impresión de Tesis de Grado.

ING. JOSÉ SAÚL ORTIZ PACHECO,
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO
EN SISTEMAS COMPUTACIONALES
No. de Control: **M07370441**
PRESENTE.

Por este medio me permito informar a usted, que por aprobación de la Comisión Revisora asignada para valorar el trabajo, mediante la Opción: **I Tesis de Grado por Proyecto de Investigación**, de la **Maestría en Sistemas Computacionales**, que presenta con el tema: **"PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DE UN CALENTADOR DE INDUCCIÓN MAGNÉTICO PARA ALUMINIO"** y conforme a lo establecido en el Procedimiento para la Obtención del Grado de Maestría en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo le emite la:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar un ejemplar del mismo debidamente encuadernado y seis copias en CD en formato PDF, para presentar su Acto de Recepción Profesional a la brevedad.

Sin otro particular por el momento, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

PENSAR PARA SERVIR, SERVIR PARA TRIUNFAR®


DR. JOSÉ FEDERICO CASCO VÁSQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.



Secretaría de Educación Pública
Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios de Posgrado
e Investigación

C.p.- Expediente.

JFCV/MJSH*mebr

Apizaco, Tlax., 09 de agosto de 2016

ASUNTO: Aprobación del trabajo de Tesis de Maestría.

DR. JOSE FEDERICO CASCO VASQUEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACION,
P R E S E N T E.

Por este medio se le informa a usted, que los integrantes de la **Comisión Revisora** para el trabajo de tesis de maestría que presenta el **ING. JOSÉ SAÚL ORTIZ PACHECO**, con número de control **M07370441**, candidato al grado de **Maestro en Sistemas Computacionales** y egresado del **Instituto Tecnológico de Apizaco**, cuyo tema es **"PROGRAMACION DEL CONTROL DE UN CALENTADOR DE INDUCCION MAGNETICO PARA ALUMINIO"**, fue:

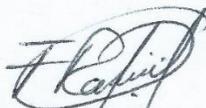
A P R O B A D O

Lo anterior, al valorar el trabajo profesional presentado por el candidato y constatar que las observaciones que con anterioridad se le marcaron así como correcciones sugeridas para su mejora ya han sido realizadas.

Por lo que se avala se continúe con los trámites pertinentes para su titulación.

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo.

LA COMISION REVISORA



DR. RAFAEL ORDOÑEZ FLORES



DR. ROBERTO MORALES CAPORAL



DR. JOSE CRISPIN HERNANDEZ HERNANDEZ



DR. EDMUNDO BONILLA HUERTA

C. p.- Interesado.

Agradecimientos.

Le agradezco a Dios y a la vida por bendecirme y guiarme a lo largo de mi carrera, por fortalecerme en los momentos de debilidad, por llenarme de salud, aprendizajes, experiencia y por llenar mi existir de felicidad.

Expreso mi más sincero agradecimiento al comité revisor de esta tesis, al Dr. Roberto Morales Caporal, Dr. José Crispín Hernández Hernández, al Dr. Edmundo Bonilla Huerta por la orientación, el seguimiento y supervisión que me brindaron durante el desarrollo de esta investigación y en especial al Dr. Rafael Ordoñez Flores director de este trabajo, por haberme guiado durante la realización de este trabajo, por su tiempo, conocimiento y experiencias que dedico para el logro de mis objetivos y metas.

A la M.C. José Luis Hernández Corona, jefe del laboratorio predictivo de la UTT, por brindarme sus conocimientos y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y ánimo recibidos de mi familia y amigos, quienes me brindaron su apoyo incondicional.

A todos ellos, muchas gracias...

Dedicatoria.

A mis padres y hermanos

A mi padre Nicanor Jorge Ortiz Islas y a mi madre Gloria Pacheco Viguera por ser en todo momento mi apoyo y motivación para seguir adelante, por ser un gran ejemplo a seguir, por su esfuerzo y consejos a lo largo de mi vida.

A mis hermanos, Beatriz, Ángela y Joel, por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar, por el apoyo incondicional que me han brindado, por creer en mí y llenar mi vida de alegrías.

A toda mi familia en general fuente de apoyo constante e incondicional que creyó y me apoyo en todo momento.

En memoria de mi abuela Esperanza Islas Nava y mi abuelo Juan Ortiz Ortiz los recordaré siempre.

Con cariño les dedico esta tesis.

CONTENIDO

<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	<i>vii</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	<i>x</i>
<i>RESÚMEN</i>	<i>xi</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xi</i>
<i>Capítulo 1</i>	<i>1</i>
Introducción	1
1.1. Nombre del proyecto	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Preguntas de investigación	3
1.5. Estado del arte	3
1.5.1. Ejemplos de sistemas de control.....	5
1.5.2. Control en lazo cerrado en comparación con control en lazo abierto.....	8
1.4.3. Ventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto.....	9
1.4.4. Desventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto.....	9
1.4.5. PID.....	10
<i>Capítulo 2</i>	<i>16</i>
<i>Marco Teórico</i>	<i>16</i>
2.1. Inducción electromagnética	16
2.1.1. LEY DE FARADAY.....	19
2.1.2. Ley de Ampere.....	24

2.1.3. Efecto Joule.	26
2.1.4. Efecto piel.	27
2.1.5. Permeabilidad magnética.	29
2.1.6. Componentes básicos del horno de inducción.	32
2.1.7. Aplicaciones del calentamiento por inducción.	35
2.1.8. Ventajas y desventajas del calentamiento por inducción.	35
2.2. Diseño de un LCL-Resonante inversor basado en IGBT.	36
2.2.1. Topologías de convertidores.	37
2.2.2. Comparación de topologías.	38
2.2.3. Impedancia Características.	41
Capítulo 3.	43
<i>Lógica difusa y Visión por computadora.</i>	43
3.1. Lógica difusa.	43
3.1.1. Conjuntos difusos y funciones de membresía.	43
3.1.3. Término lingüístico.	44
3.1.4. Variables Lingüísticas.	45
3.1.5. Funciones de pertenencia.	46
3.1.6. Inferencia difusa.	47
3.1.7. Sistemas de inferencia difusa tipo Mamdani.	48
3.2 Sistemas de inferencia difusa de intervalo tipo 2.	51
3.2.1 Sistema de inferencia difusa Mamdani de intervalo tipo-2.	51
3.3. Visión por computadora.	60
3.3.1. Representación de una imagen digital.	61
3.3.2. El color.	62
3.3.3. Tratamiento de imágenes.	66
3.3.4. Detección de bordes.	83
Capítulo 4.	97

Metodología	97
4.1. Termografía	97
4.2. Cámara termográfica e imágenes térmicas	100
4.3. Cálculo de emisividad	106
4.4. Lógica difusa en el sistema	113
4.5. Lógica difusa tipo 2 en el sistema	126
4.6. Diseño del PWM	131
4.6.1. Desplazamiento de fase.....	131
4.5.2. Simulación del PWM en desplazamiento de fase.	133
Capítulo 5	140
Resultados	140
5.1 Simulación	140
Conclusión	149
Bibliografía	151
Anexos	153
Constancia de satisfacción	153
Constancia de liberación de estancias	154
Artículos	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Sistema de control de velocidad.	6
Figura 1-2. Control PID de una planta	11
Figura 1-3. Respuesta de escalón unitario de una planta.....	12
Figura 1-4. Curva de respuesta en forma de S.....	12
Figura 1-5. Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.....	14
Figura 1-6. Oscilación con periodo P_{cr} (P_{cr} se mide en seg.).....	14
Figura 2-1. Bobina y campo magnético generado al circular corriente.....	16
Figura 2-2. Efecto Joule.....	17
Figura 2-3. Ciclo de histéresis	18
Figura 2-4. Corrientes de Foucault.	18
Figura 2-5. Campo eléctrico inducido por un campo magnético variable.....	21
Figura 2-6. Signo de la f.e.m. inducida a partir de la ley de Faraday.....	22
Figura 2-7. Pulso de inducción cuando un imán lo atraviesa.	23
Figura 2-8. Demostración de la Ley de Ampere.	25
Figura 2-9. Representación de la ley de Biot-Avart.	26
Figura 2-10. Relación de la distribución de corriente y la profundidad de penetración.....	28
Figura 2-11. Representación de una bobina de calentamiento por inducción.	33
Figura 2-12. Modelo de circuito eléctrico equivalente de una bobina de calentamiento por inducción.	34
Figura 2-13. Diagrama del sistema de refrigeración.	34
Figura 2-14. VSI con acoplamiento inductivo (topología A) y CSI con acoplamiento capacitivo (topología B) de la carga.	37
Figura 2-15. Voltaje y corriente del IGBT durante la desconexión	40
Figura 2-16. Esquema de control.....	41
Figura 3-1. Nivel de frío.....	44
Figura 3-2. Variables lingüísticas	45
Figura 3-3. Función de pertenencia triangular.	46
Figura 3-4. Función de pertenencia trapezoidal	47
Figura 3-5. Estructura de una regla difusa.....	48
Figura 3-6. Sistema de inferencia difusa tipo Mamdani.....	49
Figura 3-7. Esquema de un sistema de inferencia difusa topo 2.	52
Figura 3-8. Conjunto difuso de intervalo t-2 de la variable lingüística x.....	52
Figura 3-9. Conjuntos difusos de intervalo tipo 2 de la variable lingüística y.....	53
Figura 3-10. Conjuntos difusos de intervalo tipo 2 de la variable lingüística z.	54
Figura 3-11. Difusificación de la entrada del sistema $x= 0.36$	55
Figura 3-12. Difusificación de la entrada del sistema $y= 0.45$	55
Figura 3-13. Cálculo del intervalo de disparo de la regla 1.....	56
Figura 3-14. Calculo del intervalo de disparo de la regla 2.....	57
Figura 3-15. Centroide de los CDIT2 de la parte consecuente.....	59
Figura 3-16. RGB de una imagen.....	63
Figura 3-17. Modelo HLS.	64

Figura 3-18. Modelo CYMK.....	64
Figura 3-19. Ejemplo de matriz de convolución.	67
Figura 3-20. Imagen original.....	68
Figura 3-21. Imagen binarizada.....	68
Figura 3-22. Imagen en negativo de la figura 3.12.....	69
Figura 3-23. Mascara filtro pasa bajas.....	70
Figura 3-24. Imagen resultante de la figura 3.20 con un filtro pasa bajas.....	71
Figura 3-25. Mascara filtro pasa altas.	71
Figura 3-26. Imagen resultante de la figura 3.12 con un filtro pasa altas.	72
Figura 3-27. Imagen resultante de la figura 3.12 a escala de grises.....	73
Figura 3-28. Imagen resultante de la figura 3.18 con el filtro moda.....	75
Figura 3-29. Imagen resultante de la figura 3-18 con el filtro mediana.....	77
Figura 3-30. Imagen resultante de la figura 3-18 con el filtro mínimo.....	78
Figura 3-31. Imagen resultante del filtro máximo.....	79
Figura 3-32. Imagen resultante de la figura 3-27 con contraste a pedazos.....	80
Figura 3-33. Imagen a escala de grises A), imagen ecualizada B) y sus respectivos diagramas de frecuencia.....	81
Figura 3-34. Representación del modelo de transición de un nivel de gris a otro.....	83
Figura 3-35. Algunas mascaras Laplacianas.....	87
Figura 3-36. Imagen con filtro Prewitt.....	92
Figura 3-37. Imagen con filtro Sobel.....	94
Figura 3-38. Imagen con filtro Robert.....	96
Figura 4-1. Espectro electromagnético.....	100
Figura 4-2. Sensor óptico.....	101
Figura 4-3. Cámara térmica Fril.....	101
Figura 4-4. Distintos tipos de imágenes tomadas con la cámara térmica.....	103
Figura 4-5. Parte de la imagen térmica a analizar.....	104
Figura 4-6. Matriz de los números 1, 2, 3, 4.....	104
Figura 4-7. Matriz de los números 5, 6, 7, 8.....	104
Figura 4-8. Matriz de los números 9 y 0 y del punto decimal.....	104
Figura 4-9. Reacomodo de las matrices.....	105
Figura 4-10. Pieza de trabajo.....	106
Figura 4-11. Pieza de trabajo (emisividad de 0.05).....	107
Figura 4-12. Graficas de temperaturas medidas de la tabla 4.3.....	110
Figura 4-13. Grafica de las temperaturas medidas.....	112
Figura 4-14. Imagen térmica tomada de forma frontal.....	112
Figura 4-15. Imagen térmica tomada de forma lateral.....	113
Figura 4-16. Subconjuntos difusos de temperatura.....	114
Figura 4-17. Capas en las que se detectar la temperatura.....	115
Figura 4-18. Universo de discurso capa exterior.....	116
Figura 4-19. Universo de discurso capa media.....	116
Figura 4-20. Universo de discurso capa interior.....	116
Figura 4-21. Universo de discurso salida.....	118

Figura 4-22. Métodos de desfusificación para sistemas difusos tipo Mamdani.....	124
Figura 4-23. Visualización de las reglas difusa.....	125
Figura 4-24. Conjunto difuso de intervalo t-2 de la Temperatura Exterior.....	126
Figura 4-25. Conjunto difuso de intervalo t-2 de la Temperatura Media.....	127
Figura 4-26. Conjunto difuso de intervalo t-2 de la Temperatura Externa.....	127
Figura 4-27. Conjuntos difusos de intervalo tipo 2 de la variable salida.	128
Figura 4-28. Inversor monofásico puente completo.....	131
Figura 4-29. Inversor monofásico de medio puente.....	132
Figura 4-30. Control por desplazamiento de fase.....	132
Figura 4-31. Señal triangular de referencia.	134
Figura 4-32. Comparación de la señal triangular (arriba) y pulsos de salida (abajo).....	134
Figura 4-33. Señal diente de sierra.	135
Figura 4-34. Desfase 25%.	135
Figura 4-35. Desfase al 50%.....	136
Figura 4-36. Desfase al 100%.....	136
Figura 4-37. Desfase 50% señal diente de cierra.....	136
Figura 4-38. Desfase del 50% a medio ciclo.	137
Figura 4-39. Unión de las figura 4.33 y 4.27b.....	137
Figura 4-40. Negación del desfase.	138
Figura 4-41. Intersección de la fig.4.35 y la fig. 4.36 para hacer el desfase resultante.	138
Figura 4-42. Señal sin desfase (arriba), desfase (en medio) y señal desfasada.	139
Figura 5-1. Entorno Matlab.	141
Figura 5-2. Simulación del sistema.	141
Figura 5-3. Inversor.	142
Figura 5-4. Salida de voltaje y corriente para el caso 1 (fuzzy 1).	143
Figura 5-5. Salida de voltaje y corriente para el caso 1 (fuzzy 2).....	144
Figura 5-6. Voltaje y corriente a un 60% del ciclo de trabajo (fuzzy 1).	145
Figura 5-7. Voltaje y corriente a un 60% del ciclo de trabajo (fuzzy 2).	145
Figura 5-8. Mínimo ciclo de trabajo (fuzzy 1).	146
Figura 5-9. Mínimo ciclo de trabajo (fuzzy 2).....	146
Figura 5-10. Aumento de potencia respecto al caso anterior (fuzzy 1).....	147
Figura 5-11. Potencia queda igual referente al caso anterior (fuzzy 2).....	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.	13
Tabla 1 -2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr}	14
Tabla 2-1. Frecuencias en distintos tipos de piezas.....	29
Tabla 2-2 Permeabilidad relativa en materiales diamagnéticos.	31
Tabla 2-3. Permeabilidad relativa en materiales Paramagnéticos.	31
Tabla 2-4.Permeabilidad relativa en materiales Ferromagnéticos.....	31
Tabla 2-5. DUALIDAD TOPOLOGÍAS AYB.	38
Tabla 2-6. Comparación de topologías de convertidores factibles.....	39
Tabla 3-1. CDIT2 de X.....	53
Tabla 3-2. CDIT2 de Y.....	53
Tabla 3-3. CDIT2 de Z.....	54
Tabla 4-1. Emisividad de algunos materiales.	99
Tabla 4-2. Medición de la pieza de trabajo en temperatura ambiente con diferentes emisividades.	108
Tabla 4-3. Pruebas con emisividad de 0.84.	109
Tabla 4-4. Segunda prueba con emisividad de 0.84.	111
Tabla 4-5. Conjuntos difusos de Temperatura Exterior.	126
Tabla 4-6. CDIT2 de Temperatura Media.	127
Tabla 4-7. CDIT2 de Temperatura Interior	127
Tabla 4-8. CDIT2 de Temperatura Media.	128
Tabla 4 -9. Reglas difusas.	129
Tabla 5-1. Simulación temperatura ambiente.....	143
Tabla 5-2. Temperatura aumentando en el centro.	144
Tabla 5-3. Máxima temperatura alcanzada (Tem. exterior).	146
Tabla 5-4. Temperatura requerida alcanzada (Tem. exterior).	147

RESÚMEN

Con este proyecto se plantea mejorar un producto, que consiste en sustituir el horno convencional a gas por el horno de inducción electromagnético a electricidad; al mismo tiempo, se mejora en el proceso de producción de perfiles de aluminio al reducir tiempos de calentamiento y costos de combustible.

En este trabajo se presenta la simulación de un control difuso, así como su programación, que lleva a cabo un seguimiento de temperatura en un horno de inducción implementado con un inversor de transistores. Se determina la emisividad de la barra de trabajo. Se realiza un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani para asegurar un calentamiento homogéneo en la barra de aluminio localizada en el interior de la bobina de inducción para llegar a una temperatura media de 450 °C. Este método de calentamiento se utilizará en el proceso de extrusión de aluminio.

ABSTRACT

This project proposes to improve a product, which is to replace the conventional oven gas by electromagnetic induction furnace electricity; while is improved in the production process of aluminum to reduce heating times and fuel costs.

In this study the simulation of a fuzzy control and its programming, which conducts tracking temperature in an induction furnace implemented with a transistor inverter is presented. The emissivity of the taskbar is determined. Fuzzy inference system Mamdani type is performed to ensure homogeneous heating aluminum bar located inside the induction coil to reach an average temperature of 450 ° C. This heating method is used in the aluminum extrusion process.

Capítulo 1.

Introducción.

La electricidad y el magnetismo están estrechamente relacionados, pues la corriente eléctrica manifiesta un efecto magnético.

La mayor parte de las relaciones fundamentales de la electricidad y el magnetismo se presentan en forma general. Las relaciones se denominan en general en el sentido de que son completa y correcta para su uso con cualquier sistema de unidades coherente no racionalizado. Las relaciones se presentan en una secuencia lógica y rigurosa, es decir, la base de cada relación se encuentra en las relaciones anteriores [1].

Es común escuchar de una gran contaminación en nuestro medio ambiente, para remediar este mal, una de las posibles soluciones es emplear tecnologías que no produzcan gases de efecto invernadero, trabajando a partir de la energía eléctrica se puede evitar producir contaminantes. La energía eléctrica tiene un gran campo de aplicación, puede ser empleada prácticamente en cualquier campo.

El calentamiento por inducción magnética es un proceso mediante el cual se consigue el calentamiento de objetos metálicos. Este calentamiento se produce mediante variaciones en la orientación magnética molecular por magnetismo inducido y por corrientes eléctricas alternas de alta frecuencia.

En la inducción electromagnética una corriente eléctrica circula por un conductor generando un campo magnético en sus alrededores. La mayor intensidad del campo se da en el núcleo, este depende de la fuerza de la corriente y el número de espiras de la bobina.

Se inducen corrientes eléctricas, denominadas corrientes parasitas. Estas corrientes se neutralizan dentro del material, generación de calor por el efecto Joule (la energía cinética de los electrones se transforma en calor).

El campo magnético alterno también produce magnetizaciones y desmagnetizaciones en el material sometido al campo lo cual produce pérdidas de energía electromagnéticas que generan calor.

1.1. Nombre del proyecto.

PROGRAMACIÓN DEL CONTROL DE UN CALENTADOR DE INDUCCIÓN MAGNETICE PARA ALUMINIO.

1.2. Justificación.

El calentamiento por inducción para metales es de suma importancia industrialmente y ecológicamente.

Actualmente, en el proceso de extrusión, del calentamiento del aluminio se lleva a cabo mediante quemadores a gas, el tiempo de calentamiento es de varias horas, lo que genera gastos fuertes del combustible, por otro lado, la combustión provoca grandes cantidades de gases los cuales contaminan el medio ambiente y dañan nuestra salud. Por lo cual se busca nuevas técnicas que permitan calentar el aluminio y disminuir el costo del calentamiento de este mismo; la técnica de calentamiento de metales por inducción ofrece un calentamiento muy rápido de la pieza y un consumo de electricidad moderado que se espera reduzca el costo del energético.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

- Programar el control de temperatura de un calentador por inducción magnética.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Controlar la temperatura de calentamiento deseado en la pieza.
- Especificar la tarjeta y el tipo de lenguaje que se utilizará en la programación.
- Especificar el tipo de cámara termográfica que se utilizará
- Evaluar el tipo de control inteligente a implementar.

1.4. Preguntas de investigación.

¿Es posible optimizar el proceso de calentamiento del aluminio en el horno de inducción mediante la programación de un control inteligente?

¿Es viable controlar la temperatura en el aluminio mediante una imagen termográfica en lugar de un sensor infrarrojo?

1.5. Estado del arte.

Normalmente el control de temperatura se realiza en lazo abierto, solo mediante la exposición del material al campo magnético por un tiempo determinado. Cuando se ha llegado a retroalimentar la temperatura para su control, se han utilizado estrategias de control clásicas como el PID [2].

El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robóticos y similares; el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, de temperatura, humedad, viscosidad y flujo en la industria de proceso.

Los avances en la teoría y la práctica del control automático aportan los medios para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad, aligerar la carga de muchas operaciones manuales repetitivas.

Panorama histórico. El primer trabajo significativo en control automático fue el regulador de velocidad centrífugo de James Watt para el control de la velocidad de una máquina de vapor, en el siglo XVIII. Minorsky, Hazen y Nyquist, aportaron trabajos importantes en las etapas iniciales del desarrollo de la teoría de control. En 1922, Minorsky trabajó en los controladores automáticos para dirigir embarcaciones, y mostró que la estabilidad puede determinarse a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. En 1932, Nyquist diseñó un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de sistemas en lazo cerrado, con base en la respuesta en lazo abierto en estado estable cuando

la entrada aplicada es una senoidal. En 1934, Hazen, quien introdujo el término servomecanismos para los sistemas de control de posición, analizó el diseño de los servomecanismos con relevadores, capaces de seguir con precisión una entrada cambiante. En los 40's los métodos de la respuesta en frecuencia hicieron posible que los 'ingenieros diseñaran sistemas de control lineales en lazo cerrado. A finales de los 40's y principios de los 50's se desarrolló por completo el método del lugar geométrico de las raíces propuesto por Evans. Los métodos de respuesta en frecuencia y del lugar geométrico de las raíces, que forman el núcleo de la teoría de control clásica, conducen a sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario de requerimientos de desempeño, estos sistemas son aceptables pero no óptimos.

Las plantas modernas con muchas entradas y salidas se vuelven más y más complejas, la descripción de un sistema de control moderno requiere de una gran cantidad de ecuaciones. La teoría del control clásica pierde su solidez ante sistemas con entradas y salidas múltiples. En los 60's debido a que la disponibilidad de las computadoras digitales hizo posible el análisis en el dominio del tiempo de sistemas complejos, la teoría de control moderna, basada en el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estados, se ha desarrollado para enfrentar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requerimientos limitativos respecto de la precisión.

Entre los 60 y los 80's se investigaron a fondo el control óptimo tanto de sistemas determinísticos como estocásticos, y el control adaptable, mediante el aprendizaje de sistemas complejos. De 1980 a la fecha, los descubrimientos en la teoría de control moderna se centraron en el control robusto, el control de H_∞ .

Ahora que las computadoras digitales se han vuelto más baratas y más compactas, se usan como parte integral de los sistemas de control. Las aplicaciones recientes de la teoría de control moderna incluyen sistemas ajenos a la ingeniería.

Variable controlada y variable manipulada. La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La, variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. La variable controlada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del

sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado.

Plantas. Una planta puede ser una parte de un equipo, un conjunto de las partes de una máquina que funcionan juntas, el propósito de la cual es ejecutar una operación particular. “cualquier objeto físico que se va a controlar”.

Procesos. El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados.” cualquier operación que se va a controlar”.

Sistemas. Combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. No necesariamente es físico. El concepto de sistema se aplica a fenómenos abstractos y dinámicos, tales como la economía.

Perturbaciones. Es una señal que tiende a afectar el valor de la salida de un sistema. Si se genera dentro del sistema se denomina interna, una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada.

Control realimentado. Se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.

1.5.1. Ejemplos de sistemas de control.

Sistema de control de velocidad. El principio básico del regulador de velocidad de Watt para una máquina se ilustra en el diagrama.

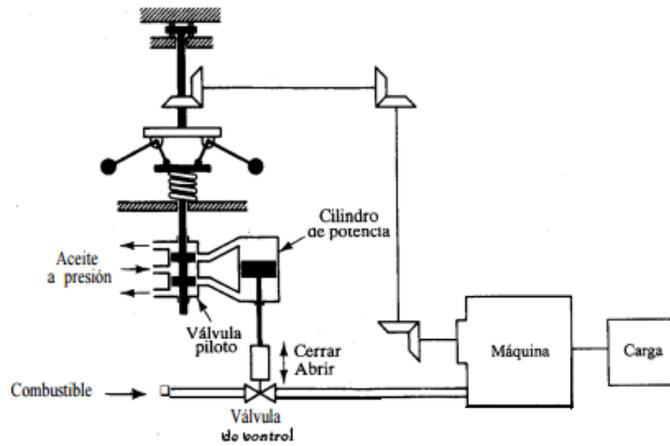


Figura 1-1. Sistema de control de velocidad.

La cantidad de combustible que se admite para la máquina se ajusta de acuerdo con la diferencia entre la velocidad de la máquina que se pretende y la velocidad real.

La secuencia de acciones puede describirse del modo siguiente: el regulador de velocidad se ajusta de modo que, a la velocidad deseada, no fluya aceite a presión en ningún lado del cilindro de potencia. Si la velocidad real cae abajo del valor deseado, la disminución de la fuerza centrífuga del regulador de velocidad provoca que la válvula de control se mueva hacia abajo, aportando más combustible y la velocidad del motor aumenta hasta alcanzar el valor deseado. Si la velocidad del motor aumenta sobre el valor deseado, el incremento en la fuerza centrífuga del controlador provoca que la válvula de control se mueva hacia arriba. Esto disminuye la provisión de combustible y la velocidad del motor se reduce hasta alcanzar el valor deseado.

Sistema de control robusto. El primer paso para el diseño de un sistema de control es la obtención del modelo matemático de la planta u objeto de control. La planta real difiere del modelo que se va a utilizar en el diseño del sistema de control. Una aproximación razonable funcionará cuando se utilice con la planta real, consiste en asumir que existe una incertidumbre o error entre en el proceso de diseño del sistema. El sistema de control diseñado basado en esta aproximación se denomina sistema de control robusto.

La planta real que se desea controlar es $\tilde{G}(s)$ y que el modelo matemático de la planta real es $G(s)$.

$\tilde{G}(s)$ = modelo de la planta real que tiene una incertidumbre $\Delta(s)$.

$G(s)$ = modelo de la planta nominal que se va a utilizar en el diseño del sistema de control.

$\tilde{G}(s)$ y $G(s)$ pueden estar relacionados por un factor multiplicativo del tipo en la ecuación 1.1 se observa esta relación.

$$\tilde{G}(s) = G(s)[1 + \Delta(s)] \quad 1.1$$

O por un factor aditivo, (ecuación 1.2)

$$\tilde{G}(s) = G(s) + \Delta(s) \quad 1.2$$

O de otras formas.

Puesto que no se conoce la descripción exacta de la incertidumbre o error $\Delta(s)$, se utiliza una estimación de $\Delta(s)$ y en el diseño del controlador se emplea esta estimación, $W(s)$. $W(s)$ es una función de transferencia escalar del tipo (ver ecuación 1.3).

$$\|\Delta(s)\|_{\infty} < \|W(s)\|_{\infty} = \max_{0 \leq W \leq \infty} |W(jw)| \quad 1.3$$

Donde $\|W(s)\|_{\infty}$ es el máximo valor de $W(jw)$ para $0 \leq W \leq \infty$ y se denomina norma H infinito de $W(s)$.

Si se utiliza el teorema de la pequeña ganancia, el proceso de diseño conlleva la determinación del controlador $K(s)$ que satisfaga la desigualdad (ecuación 1.4).

$$\left\| \frac{W(s)}{1 + k(s)G(s)} \right\|_{\infty} < 1 \quad 1.4$$

Donde:

- $G(s)$ es la función de transferencia del modelo, utilizada en el proceso de diseño.
- $k(s)$ es la función de transferencia del controlador
- $W(s)$ se escoge como una función de transferencia que aproxima $\Delta(s)$. En la mayoría de los casos prácticos, se debe satisfacer más de una desigualdad dependientes de $G(s)$, $k(s)$ y $W(s)$.

Estabilidad robusta significa que el controlador $k(s)$ garantiza la estabilidad interna de todos los sistemas que pertenecen a un grupo de sistemas que representan el sistema de la planta real. Comportamiento robusto significa que el comportamiento especificado se satisface para todos los sistemas que pertenecen a este grupo.

1.5.2. Control en lazo cerrado en comparación con control en lazo abierto.

Sistemas de control realimentados. Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control.

Ejemplo: sistema de control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia, el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se mantenga.

Sistemas de control en lazo cerrado. Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado.

Sistemas de control en lazo abierto. La salida no tiene efecto sobre la acción de control. Es un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. A cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas.

Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con sistemas en lazo abierto. En el lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del

sistema. Es así posible usar componentes relativamente poco precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, mientras que hacer eso es imposible en el caso de un sistema en lazo abierto. El sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, porque la estabilidad del sistema no es un problema importante. La estabilidad es un gran problema en el sistema de control en lazo cerrado, que puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante. Los sistemas de control en lazo cerrado sólo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema. El número de componentes usados en un sistema de control en lazo cerrado es mayor que el que se emplea para un sistema en lazo abierto. El sistema de control en lazo cerrado suele tener costes y potencias más grandes. Una combinación adecuada de controles en lazo abierto y en lazo cerrado es menos costosa y ofrecerá un comportamiento satisfactorio del sistema global.

1.4.3. Ventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto.

Las ventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto son las siguientes:

- Construcción simple y facilidad de mantenimiento.
- Menos costosos que el correspondiente sistema en lazo cerrado.
- No hay problemas de estabilidad.
- Convenientes cuando la salida es difícil de medir o cuando medir la salida de manera precisa no es económicamente viable.

1.4.4. Desventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto

Las desventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto son las siguientes:

- Las perturbaciones y los cambios en la calibración originan errores, y la salida puede ser diferente de lo que se desea.
- Para mantener la calidad requerida en la salida, es necesaria la recalibración de vez en cuando.

1.4.5. PID.

La mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado.

Como casi todos los controladores PID se ajustan en el sitio, en la literatura se han propuesto muchos tipos diferentes de reglas de sintonización, que permiten llevar a cabo una sintonización delicada y fina de los controladores PID en el sitio. Asimismo, se han desarrollado métodos automáticos de sintonización y algunos de los controladores PID poseen capacidad de sintonización automática en línea. Actualmente se usan en la industria formas modificadas del control PID, tales como el control I-PD y el control PID con dos grados de libertad. Es posible obtener muchos métodos prácticos para una conmutación sin choque (desde la operación manual hasta la operación automática) y una programación del aumento.

La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles. En el campo de los sistemas para control de procesos, es un hecho bien conocido que los esquemas de control PID básicos y modificados han demostrado su utilidad para aportar un control satisfactorio, aunque tal vez en muchas situaciones específicas no aporten un control óptimo.

1.4.5.1. Reglas de Ziegler-Nichols para la sintonía de controladores PID.

Control PID de plantas. Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID (esto significa dar valores a K_p , T_i y T_d) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler-Nichols, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas (figura 1.2). Tales reglas sugieren un conjunto de valores de K_p , T_i y T_d que darán una operación estable del sistema [3]. No obstante, el sistema resultante puede presentar una gran sobre elongación en su respuesta escalón de forma que resulte no aceptable. En tales casos se necesitará una serie de ajustes finos hasta que se obtenga el resultado deseado. De hecho, las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols dan una estimación razonable de los parámetros del controlador y proporcionan un punto de partida para una sintonía fina, en lugar de dar los parámetros K_p , T_i y T_d en un único intento.

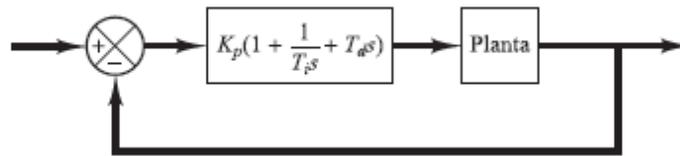


Figura 1-2. Control PID de una planta

Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID. Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o sintonía de controladores

PID la pueden realizar los ingenieros mediante experimentos sobre la planta. (Después de la propuesta inicial de Ziegler-Nichols han aparecido numerosas reglas de sintonía de controladores PID. Estas reglas están disponibles tanto en publicaciones técnicas como de los fabricantes de estos controladores.)

Hay dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols: el primero y el segundo método. A continuación se hace una breve presentación de estos dos métodos.

Primer método. En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, tal como se muestra en la Figura 3. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la Figura 4. Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

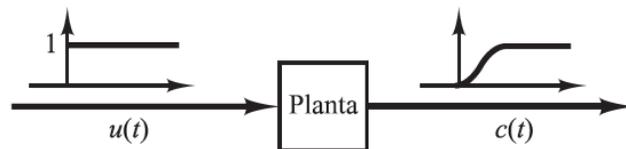


Figura 1-3. Respuesta de escalón unitario de una planta

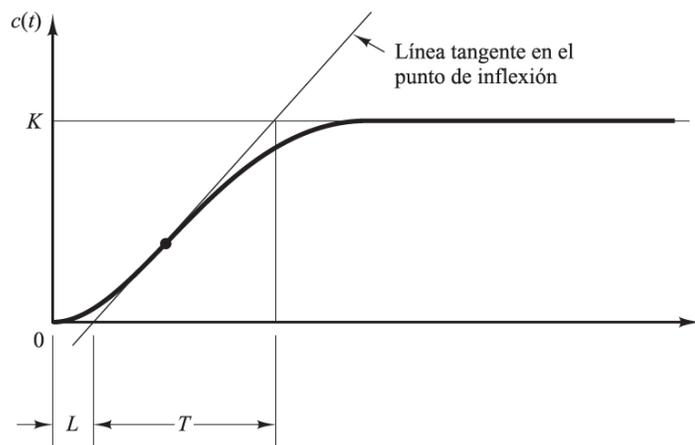


Figura 1-4. Curva de respuesta en forma de S.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t)=K$, tal como se muestra

en la Figura 1.3. En este caso, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden en la ecuación 1.5.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad 1.5$$

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 1.1

Tabla 1-1. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9 T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

El controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce las ecuaciones 1.6a, 1.6b y 1.6c

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad 1.6a$$

$$= 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \quad 1.6b$$

$$= 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad 1.6c$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s=-1/L$.

Segundo método. En el segundo método, primero se fija $T_i=\infty$ y $T_d=0$. Usando sólo la acción de control proporcional (Figura 1.5), se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones

sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces este método no se puede aplicar.) Así, la ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente (Figura 1.6). Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 1.2.

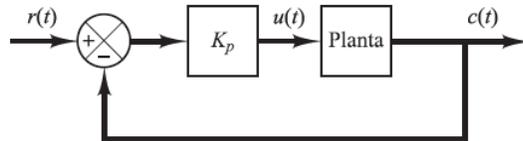


Figura 1-5. Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.

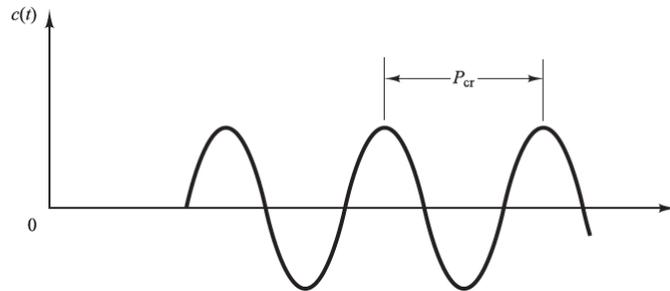


Figura 1-6. Oscilación con periodo P_{cr} (P_{cr} se mide en seg.)

Tabla 1 -2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} .

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$1/1.2 P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

El controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce las ecuaciones 1.7a, 1.7b y 1.7c

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad 1.7a$$

$$= 0.6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right) \quad 1.7b$$

$$= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \quad 1.7c$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = -4/P_{cr}$.

Conviene darse cuenta de que, si el sistema tiene un modelo matemático conocido (como la función de transferencia), entonces se puede emplear el método del lugar de las raíces para encontrar la ganancia crítica K_{cr} y las frecuencias de las oscilaciones.

Es altamente imposible describir el curso cambiante con un modelo matemático en general. Basándose en la tecnología tradicional de la regulación PID es difícil controlar un sistema [4].

Capítulo 2.

Marco Teórico.

2.1. Inducción electromagnética.

El calentamiento por inducción electromagnética es un método para suministrar calor en forma rápida, consistente, limpia, confortable y eficiente para distintas aplicaciones de manufactura, sobre piezas o partes metálicas o de otros materiales conductores de la electricidad [5].

Los principios básicos de la inducción electromagnética son bien conocidos. Una corriente eléctrica que circula por un conductor genera un campo magnético en sus alrededores (figura 2.1). La mayor intensidad del campo se da en el núcleo, depende de la fuerza de la corriente y el número de espiras de la bobina.

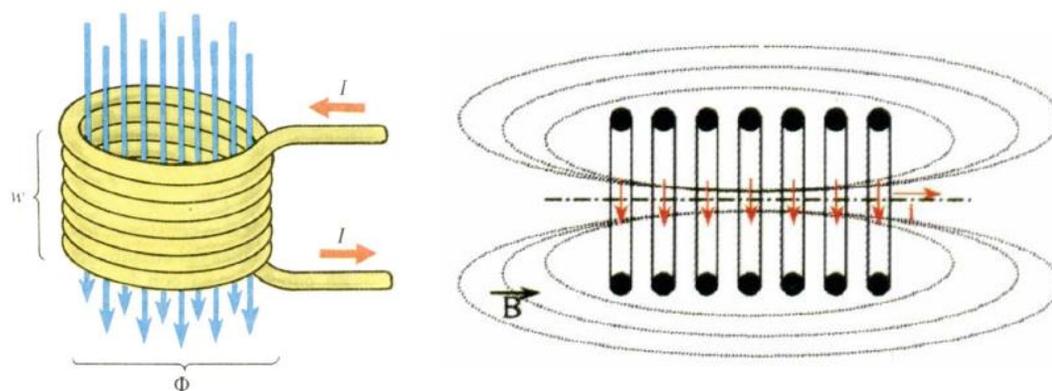


Figura 2-1. Bobina y campo magnético generado al circular corriente.

Si se coloca un material ferromagnético dentro de un campo alterno, se inducen corrientes eléctricas mayormente concentradas hacia la superficie, denominadas corrientes parásitas o de Foucault. Estas corrientes se neutralizan dentro del material, generación de calor por el efecto Joule, figura 2.2, (la energía cinética de los electrones se transforma en calor). El campo magnético alterno también produce magnetizaciones y desmagnetizaciones en el

material sometido al campo, que se traduce en sucesivos ciclos de histéresis, lo cual produce pérdidas de energía electromagnéticas que generan calor.

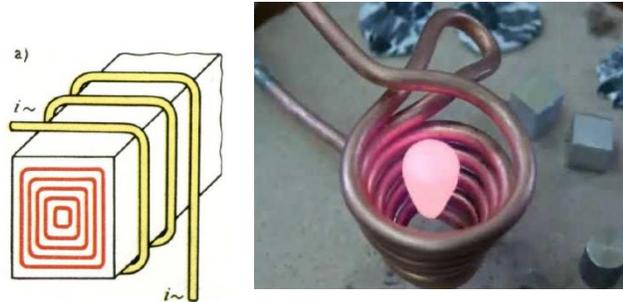


Figura 2-2. Efecto Joule.

La histéresis magnética se presenta cuando un material ferromagnético, sobre el cual ha estado actuando un campo magnético, cesa la aplicación de este; el material no anula completamente su magnetismo, sino que permanece un cierto magnetismo residual. Para desimantarlo será precisa la aplicación de un campo contrario al inicial. Los materiales tienen una cierta inercia a cambiar su campo magnético [6]. Una bobina crea sobre el material magnético una intensidad de campo H , el cual induce en ese material una inducción de valor B . B_r , es la inducción magnética remanente, es decir, es el magnetismo que permanece en el material cuando desaparece H . H_c es la intensidad magnética coercitiva, es el campo que debe aplicarse para anular B_r . WH , representa el área del ciclo de histéresis (figura 2.3). La energía disipada en el ciclo de histéresis, WH , es el producto del área del ciclo de histéresis y el volumen de la muestra de hierro, V_{FE} [7]. Ecuación 2.1.

$$WH = WH * V_{FE} \quad 2.1$$

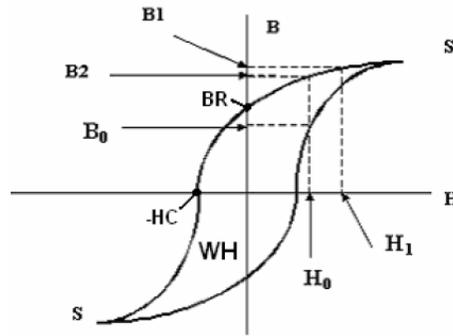


Figura 2-3. Ciclo de histéresis

Finalmente el calor se difunde al seno del elemento por conducción.

Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o mayor la conductividad del material, o mayor la velocidad relativa de movimiento entre el campo y el material, mayores serán las corrientes de Foucault y los campos opositores generados. En la figura 2.4 se muestra como a medida que la placa de metal se mueve a una velocidad V dentro del campo magnético B se inducen corrientes de Foucault. Con una fuerza que ejerce el campo magnético sobre las corrientes inducidas denominadas f_m .

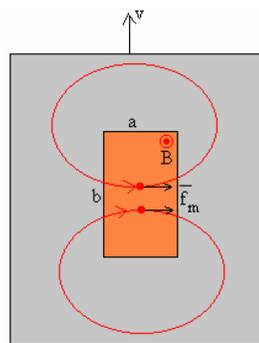


Figura 2-4. Corrientes de Foucault.

El calentamiento por inducción constituye un fenómeno indeseable en los circuitos eléctricos, en transformadores y motores, por sus pérdidas provocadas por inducción electromagnética. El calentamiento por inducción se ha convertido en una herramienta de aplicación muy difundida partir de los desarrollos en la tecnología de estado sólido. El uso de transistores ha permitido alcanzar oscilaciones o frecuencias del campo magnético tan

amplias desde 60 Hz hasta 60MHz, por ende se pueden lograr temperaturas de miles de grados, con distinta profundidad de alcance sobre el cuerpo a calentar, en tiempos mínimos con gran precisión y consistencia.

La inducción electromagnética está basada principalmente en 4 fenómenos físicos:

- Ley de inducción de Faraday.
- Ley de Ampere.
- Efecto piel
- Efecto Joule

2.1.1. LEY DE FARADAY.

Michael Faraday estudio fenómenos relacionados con campos eléctricos y magnéticos dependientes del tiempo. Observó la aparición de corrientes transitorias en circuitos en las tres situaciones siguientes:

1. Cuando se establecía o se suspendía una corriente estacionaria en otro circuito próximo.
2. Si un circuito cercano por el que circulaba una corriente estacionaria se movía respecto del primero.
3. Si se introducía o retiraba del circuito un imán permanente.

Faraday tuvo el mérito de comprender las características comunes de estos tres experimentos y atribuyó el origen de las corrientes transitorias a las variaciones del flujo magnético que atravesaba el circuito. El cambio común en los tres experimentos citados es la variación del número de líneas de campo magnético que atraviesa el circuito donde se producen las corrientes transitorias. En la interpretación de Faraday, la variación del flujo magnético a través del circuito origina una fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida responsable de la aparición de la corriente transitoria (desde ahora, corriente inducida). Recordemos que la definición de flujo magnético a través de una superficie se representa con la ecuación 2.2:

$$\phi_B = \int_S B ds \quad 2.2$$

Cuantitativamente la f.e.m. inducida depende del ritmo de cambio del flujo: no importa el número concreto de líneas de campo atravesando el circuito, sino su variación por unidad de tiempo. La relación entre f.e.m. inducida y variación de flujo constituye la Ley de Faraday (ecuación 2.3)

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad 2.3$$

donde ϕ_B es el flujo magnético que atraviesa el área delimitada por el circuito.

La característica esencial de la variación de flujo magnético a través de cualquier superficie es que induce un campo eléctrico no electrostático en el contorno que delimita esta área. Las líneas de campo son cerradas y el campo eléctrico inducido es un campo no conservativo; la f.e.m. inducida está definida como la circulación de este campo a lo largo del contorno (ecuación 2.4)

$$\varepsilon = \oint_c E dl \quad (2.4)$$

El subíndice C en la integral indica que el producto escalar del integrando se realiza en los puntos pertenecientes al contorno, y el círculo que rodea la integral simboliza que ésta se calcula sobre el contorno completo. En la figura 2.5 se esquematiza la situación para un circuito formado por una única espira situada dentro de un campo magnético variable.

Cuando tratamos con el flujo magnético consideramos superficies no cerradas y por eso no puede hablarse sin ambigüedad de sentido entrante o saliente. Para determinar el sentido positivo en un área elemental empleamos la regla de la mano derecha, curvando los dedos alrededor del contorno de la misma en sentido antihorario: decimos entonces que el pulgar apunta en sentido positivo. Pero esto depende de la perspectiva con que observemos el área

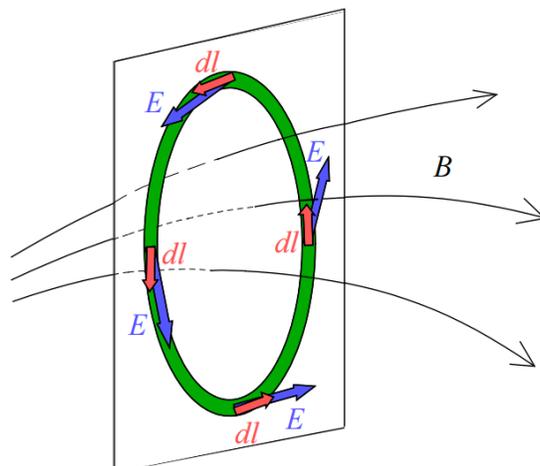


Figura 2-5. Campo eléctrico inducido por un campo magnético variable.

Si consideramos una carga arbitraria que se mueve en un circuito conductor por la acción del campo inducido: la integral del segundo miembro de la ecuación representa el trabajo por unidad de carga a lo largo del circuito completo, porque se está integrando la componente tangencial de la fuerza por unidad de carga. El movimiento de cargas debido al campo inducido en los circuitos conductores origina las corrientes transitorias que observó Faraday. Debe observarse que la f.e.m. inducida está distribuida a través del circuito, a diferencia de las fuentes de f.e.m. de los circuitos eléctricos, que están situadas en lugares específicos de los mismos.

La ley de Faraday puede escribirse como una relación integral entre los campos eléctrico y magnético a partir de las definiciones de flujo y f.e.m. La superficie S a través de la que calculamos el flujo es una superficie delimitada por el contorno C donde se calcula la f.e.m. (ecuación 2.5)

$$\oint_C E dl = - \frac{d}{dt} \int_S B ds \quad 2.5$$

Cuando tratamos con el flujo magnético consideramos superficies no cerradas y por eso no puede hablarse sin ambigüedad de sentido entrante o saliente. Para determinar el sentido positivo en un área elemental empleamos la regla de la mano derecha, curvando los dedos alrededor del contorno de la misma en sentido antihorario: decimos entonces que el pulgar apunta en sentido positivo. Pero esto depende de la perspectiva con que observemos el área.

Por ejemplo, en la superficie plana de la figura 12(a) el sentido positivo es el señalado por el vector S si se mira desde la parte superior, pero es el contrario si se mira desde abajo. Por tanto, en todos los razonamientos que siguen debemos tener en cuenta que los signos del flujo dependen del sentido que arbitrariamente hayamos tomado como positivo para el vector superficie.

Para deducir el sentido de la f.e.m. inducida en un ejemplo sencillo nos remitimos a la figura 2.6. Supongamos que hemos escogido como sentido positivo para el vector superficie el de la figura 2.6a. Esto significa que para nosotros un giro antihorario es positivo. Sea la dirección del campo magnético la que aparece en la figura 2.6b, formando un ángulo menor que 90° con S . El flujo magnético es entonces positivo, pues el producto escalar $B \cdot S$ es positivo. Supongamos ahora que el campo B aumenta su módulo con el tiempo sin variar su dirección (figura 2.6c). Tal aumento implica que la derivada del flujo respecto al tiempo es positiva. Y de acuerdo con la ley de Faraday, esto produce una f.e.m. negativa. ¿Qué significa f.e.m. negativa? Puesto que adoptamos al principio el giro antihorario como sentido positivo, la f.e.m. negativa está asociada con un giro horario. Es decir, el campo eléctrico inducido en este caso particular está dirigido en sentido horario a lo largo del contorno de la figura 2.6c. En ella se ha representado la f.e.m. mediante una flecha en sentido horario para ilustrar el razonamiento cualitativo, pero no ha de olvidarse que la f.e.m. es una magnitud escalar: siempre que se hace referencia a su signo mediante una flecha en uno de los dos sentidos estamos en realidad dibujando el sentido del vector campo eléctrico inducido (esto es análogo a la esquematización habitual en circuitos eléctricos, donde se representa la intensidad –escalar– junto a una flecha que en realidad indica el sentido del vector densidad de corriente).

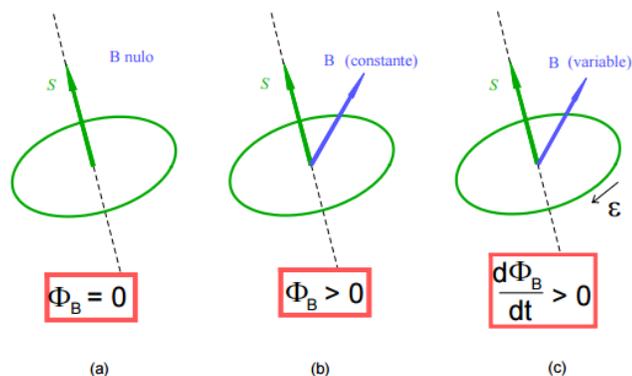


Figura 2-6. Signo de la f.e.m. inducida a partir de la ley de Faraday.

El sentido positivo del vector superficie se escoge arbitrariamente. La realidad física de la situación no cambia al invertir esta elección, de modo que si el campo magnético no modifica su orientación ni su ritmo de variación, la f.e.m. inducida no debe modificarse. Es decir, aunque invierta el sentido de S en la figura 12(c), la f.e.m. inducida no debe variar. Puede verse que así ocurre efectivamente: la diferencia con la situación descrita en el párrafo anterior es que ahora el sentido de referencia positivo es el horario, y el ángulo formado por ambos vectores es mayor de 90° . En consecuencia el flujo es negativo. Si el campo magnético crece, la derivada del flujo es también negativa. Al aplicar la ley de Faraday, la f.e.m. resulta entonces positiva. Pero ahora el sentido positivo es el dirigido hacia abajo, de modo que la f.e.m. sigue asociada al sentido horario.

Es necesario introducir un amplificador para obtener valores típicos de algunos centenares de mV. El pulso de inducción que obtenemos tiene el perfil indicado cualitativamente en la figura 2.7, y a partir de él pueden discutirse los casos correspondientes a las distintas orientaciones relativas del imán y la bobina. Cuando acercamos el imán a la bobina, la f.e.m. crece en valor absoluto hasta el momento en que el extremo del polo delantero del imán corta el plano de la bobina, pues la variación de flujo magnético es positiva y cada vez mayor (el número de líneas de campo que pasa a través de la superficie es creciente). Durante el paso del imán se produce una caída rápida de la f.e.m. inducida (zona (a) en la figura 2.7), porque la variación de flujo disminuye primero a medida que el polo delantero atraviesa el plano de la espira, y luego cambia de signo cuando es el polo trasero el que está pasando (zona (b) en la figura 2.7). El perfil presentado en la figura 2.7 se invierte, obteniéndose su simétrico respecto del eje de tiempos si se invierte la orientación del imán, o si se intercambian las conexiones de la bobina.

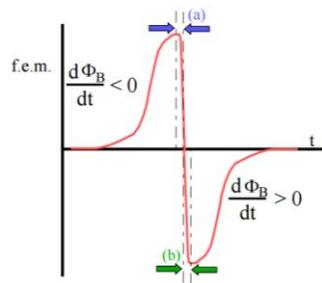


Figura 2-7. Pulso de inducción cuando un imán lo atraviesa.

2.1.2. Ley de Ampere.

La ley de Biot (1774-1882) y Savart (1791-1841) expresa la relación existente entre la intensidad, I , de una corriente eléctrica rectilínea y estacionaria (de valor constante) y el campo magnético, B , que dicha corriente crea a una cierta distancia, r , de la misma (ecuación 2.6)

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad 2.6$$

Ampere (1775-1836), inspirándose en esta expresión, estableció en 1826 una relación general entre estas dos magnitudes, sea cual sea la forma del conductor por el que circula la corriente de intensidad constante, I .

$$\oint B d\vec{l} = \mu_0 I \quad 2.7$$

Indica que la circulación del vector campo magnético, B , a lo largo de una línea cerrada, el segundo término I se refiere a la intensidad que atraviesa dicho camino cerrado (ecuación 2.7). El término μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío y es igual a $4\pi \times 10^{-7} [NA^{-2}]$.

Para determinar el campo magnético, aplicando la ley de Ampere, se toma un camino cerrado (figura 2.8) que sea atravesado por corrientes. La circulación es la suma de cuatro contribuciones, una por cada lado la ecuación 2.8.

$$\oint B d\vec{l} = \int_A^B \vec{B} d\vec{l} + \int_B^C \vec{B} d\vec{l} + \int_C^D \vec{B} d\vec{l} + \int_D^A \vec{B} d\vec{l} \quad 2.8$$

Examinando, cada una de las contribuciones a la circulación:

1. Como se observa en la figura 2.8 la contribución a la circulación del segmento AB es cero ya que bien \vec{B} y $d\vec{l}$ son perpendiculares, o bien \vec{B} es nulo en el exterior del solenoide.
2. Lo mismo ocurre en el segmento CD.
3. En el segmento DA la contribución es cero, ya que el campo en el exterior al solenoide es cero.

4. En la sección BC, el campo es constante y paralelo a dicha sección, la contribución a la circulación es Bx , siendo x la longitud del segmento.

La corriente que atraviesa el camino cerrado ABCD se puede calcular fácilmente:

Si hay N espiras de longitud L del selenoide en la longitud x , habrá Nx/L espiras por las que circula una intensidad I .

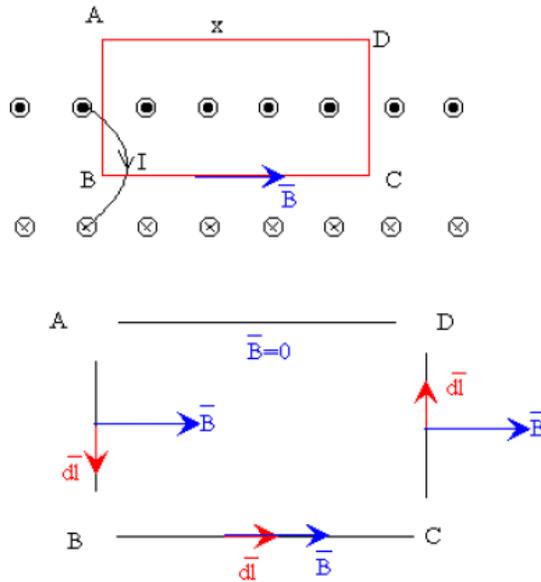


Figura 2-8. Demostración de la Ley de Ampere.

Por lo tanto, la ley de Ampere se escribe para el selenoide con la ecuación 2.9

$$Bx = \frac{\mu_0 N_x}{L} I \quad 2.9$$

El campo producido por el elemento tiene la dirección perpendicular al plano determinado por los vectores unitarios μ_t y μ_r , y el sentido que resulta de la aplicación de la regla del sacacorchos, la cual permite determinar una dirección del espacio con relación a otras dos; o una dirección de giro con una del espacio. El vector unitario μ_t señala la dirección de la corriente, mientras que μ_r señala la posición del punto P desde el elemento de corriente dI .

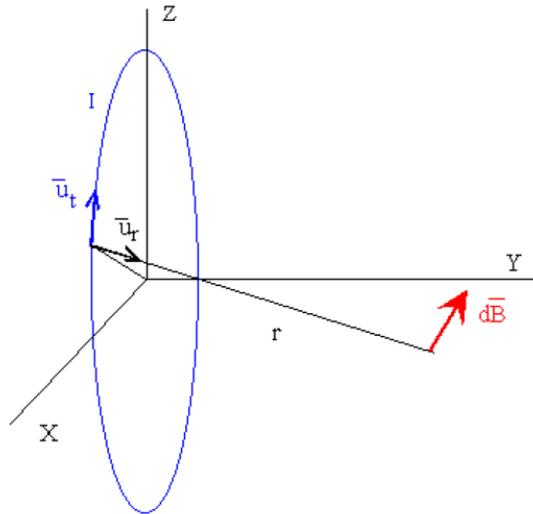


Figura 2-9. Representación de la ley de Biot-Avart.

Salvo en el caso de una espora circular o de una corriente rectilínea, la aplicación de la ley de Biot-Savart (figura 2.9) es muy complicada.

2.1.3. Efecto Joule.

Al trabajo o energía eléctrica (Julios), que se transformará en calor, en un conductor de resistencia (R) cuando es recorrido por una intensidad de corriente (I) durante un determinado tiempo viene dado por la ecuación 2.10

$$E = Vit = RIIt = RI^2t \quad 2.10$$

A este efecto de desprendimiento de energía calorífica por el paso de una corriente eléctrica se le conoce por Ley (o Efecto) Joule y que lo enunció como: La cantidad de calor producida en un conductor en un tiempo (t), por el que circula una corriente eléctrica constante, es proporcional al cuadrado de la intensidad (I) por el valor de la resistencia (R) de dicho conductor.

En julios (ecuación 2.11).

$$Q = RI^2t \quad 2.11$$

En calorías (ecuación 2.12)

$$Q = (0.24)RI^2t \quad (2.12)$$

Donde:

- Q= Energía calorífica producida por la corriente.
- I= Intensidad de la corriente que circula [Amperes].
- R= Resistencia eléctrica del conductor [Ohms].
- T= Tiempo de circulación de la corriente [Segundos].

La potencia disipada por el efecto Joule será

$$P = RI^2 = \frac{V^2}{R} \quad 2.13$$

Donde

- V es la diferencia de potencial entre los extremos del conductor.

2.1.4. Efecto piel.

En un conductor, la circulación de una corriente se distribuye en la superficie de su sección de acuerdo a la frecuencia. En corriente continua o alterna de muy baja frecuencia, toda la sección conduce. A medida que la frecuencia aumenta, la circulación sólo se produce por las zonas exteriores del conductor. A frecuencias muy altas, sólo conduce la superficie exterior. Esto se conoce como “efecto Skin” (efecto Piel)

Este fenómeno hace que la resistencia efectiva o de corriente alterna sea mayor que la resistencia óhmica o de corriente continua. Este efecto es el causante de la variación de la resistencia eléctrica, en corriente alterna, de un conductor debido a la variación de la frecuencia de la corriente eléctrica que circula por éste

La profundidad de penetración, es la profundidad de la superficie, en la que la densidad de corriente es aproximadamente 1/3 de su valor en la superficie. Esta profundidad disminuye cuando aumenta la frecuencia y está dada por la ecuación 2.14 [8]:

$$d_0 = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad 2.14$$

Donde:

- $\rho =$ Resistividad [Ωm]
- $\mu =$ Permeabilidad magnetica del material.
- $\omega =$ Frecuencia de la corriente que fluye por el material. [Hez].
- $d_0 =$ Profundidad de penetracion o grosor de piel.

La densidad de corriente a una profundidad está dada por la ecuación 2.15.

$$i_x = I_0 e^{-x/d_0} \quad 2.15$$

Donde:

- $i_x =$ Densidad de corriente a una distancia x de la superficie. [A/m^2].
- $I_0 =$ Densidad de corriente en la superficie, $X=0$. [A/m^2].

En la figura 2.10 se muestra gráficamente la distribución de corriente en relación a la profundidad x de la superficie.

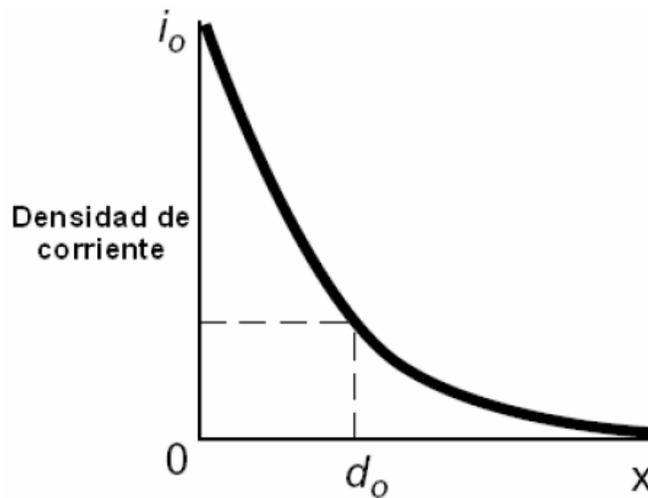


Figura 2-10. Relación de la distribución de corriente y la profundidad de penetración.

En función del tipo de pieza la frecuencia del campo aplicado a la frecuencia varia, como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2-1. Frecuencias en distintos tipos de piezas.

Frecuencia [kHz]	Tipo de pieza
5-30.	Material grueso.
100-400.	Piezas pequeñas o penetración superficial.
480 hacia arriba.	Piezas microscópicas.

La corriente inducida que fluye en la pieza es más intensa en la superficie. Mayor frecuencia de operación menor es la profundidad de penetración. Mayor es la frecuencia, más rápido se genera calor.

La elección de frecuencia se basa en que el material, sus propiedades magnéticas, su conductividad. La profundidad de la piel se expresa con la ecuación 2.16.

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{\sigma \omega_0 \mu_r}} \quad 2.16$$

- σ = La conductividad del material.
- ω_0 = Frecuencia de funcionamiento.
- μ_r = Permeabilidad magnética relativa de material.

2.1.5. Permeabilidad magnética.

La permeabilidad magnética es la capacidad que posee un medio para atraer y hacer pasar a su través un campo magnético. Es una medida que nos proporciona su capacidad de almacenar energía magnética y únicamente los medios de composición ferromagnética (que pueden ser atraídos por un imán) tienen esta capacidad. Es la medida que representa la resistencia de los materiales a seguir la alternancia de un campo magnético que lo excita.

Materiales.

Los materiales se pueden clasificar en 3 tipos Magnéticos (ferromagnéticos), No-magnéticos (diamagnéticos) y Paramagnéticos. Algunos de sus características son las siguientes:

Magnéticos ferromagnéticos.

- Se calientan fácilmente.
- Ante la presencia de un campo magnético exterior generan su propio campo magnético que refuerza al exterior (imantación).
- Al variar el campo magnético exterior la imantación remanente produce histéresis (resistencia natural de los materiales al cambio rápido en el sentido del flujo magnético).
-

No-magnéticos diamagnéticos

- Se calientan menos fácil.
- Generan en sí mismo un campo magnético opuesto, que debilita el campo magnético exterior.
-

Paramagnéticos

- Tienen un comportamiento magnético muy débil.
- Permeabilidad relativa es ligeramente mayor que la unidad

En las siguientes tablas 2.2, 2.3 y 2.4 se observan algunos materiales y sus distintas permeabilidades magnéticas relativas.

Tabla 2-2. Permeabilidad relativa en materiales diamagnéticos.

Diamagnéticos	Permeabilidad relativa “μ_r”
Bismuto	0.99983
Plata	0.99998
Plomo	0.999983
Cobre	0.999991
Agua	0.999991

Tabla 2-3. Permeabilidad relativa en materiales Paramagnéticos.

Paramagnéticos	Permeabilidad relativa “μ_r”
Aire - Aluminio	1.0000004
Plata	1.00002

Tabla 2-4. Permeabilidad relativa en materiales Ferromagnéticos.

Ferromagnéticos	Permeabilidad relativa “μ_r”
Polvo de Permalloy (2-18), 2 Mol-8I Ni de composición porcentual y el resto Fe e impurezas	130
Cobalto	250
Níquel	600
Acero dulce (0.2 C)	2 000
Hierro con Impurezas (0.2 C)	5 000
Hierro silicio utilizado en transformadores (4 Si)	7 000 o menor
Permalloy 78(78.5 Ni)	100 000
Hierro Purificado	200 000
Superpermalloy (5 Mo-79 Ni)	1 000 000

La permeabilidad está dada por la ecuación 2.17

$$\mu = \frac{B}{H} \quad 2.17$$

Donde

- B es la inducción magnética.
- H es intensidad de campo magnético.
- La *permeabilidad magnética absoluta* (μ) es el producto entre la *permeabilidad magnética relativa* (μ_r) y la *permeabilidad magnética de vacío* (μ_0):

La relación entre la potencia disipada en la pieza de trabajo y el consumo total de energía está dada por la ecuación 2.18

$$\eta = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_w \mu_w}}} \quad 2.18$$

Donde

- ρ_c es la resistividad del material conductor de la bobina.
- ρ_w es la resistividad de la pieza de trabajo.
- μ_w es la permeabilidad magnética relativa de la pieza de trabajo.

Con alta resistividad y permeabilidad, la eficiencia se aproxima al 100%. El calentamiento de una pieza de trabajo no magnético con una resistividad como la del cobre la eficacia es más o menos 50%.

En calentadores de inducción se tienen potencias nominales de hasta 1,000 kW con eficiencia de 55-60%. Para aumentar la eficiencia de este proceso es necesario reducir la relación de ρ_c / ρ_w . El parámetro ρ_w se determina por las propiedades de la pieza de trabajo. Se puede reducir la ρ_c mediante la sustitución de las bobinas.

2.1.6. Componentes básicos del horno de inducción.

Los componentes principales de un horno de inducción generalmente son los siguientes:

- Bobina de inductor.
- Sistema de refrigeración.

La bobina de inducción.

Es una bobina tubular de cobre, una corriente alterna (AC) pasa a través, el flujo magnético generado induce corrientes. Su tamaño y su forma dependen de la configuración de la pieza. Pueden ser de lazo simple o múltiple, de perfil helicoidal, redondo o rectangular, internos o externos, con una variedad infinita.

La bobina de calentamiento se modela como un transformador con una sola vuelta del devanado secundario, el modelo equivalente se representa por una inductancia equivalente y una resistencia, el circuito también puede caracterizarse por un parámetro a dimensional llamado el factor de calidad 'Q' [9] , se muestra en la ecuación 2.19.

$$Q = \frac{\omega_r L_{eq}}{R_{eq}} \quad 2.19$$

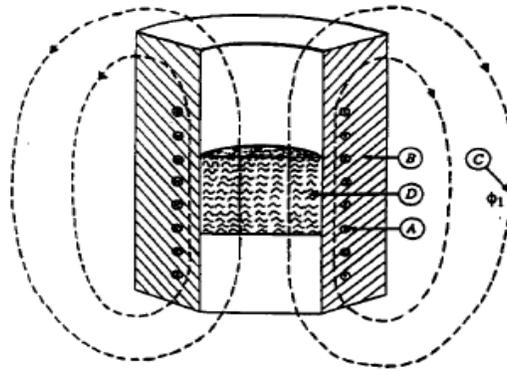


Figura 2-11. Representación de una bobina de calentamiento por inducción.

En la figura 2.11 se observa lo siguiente, A) bobina de calentamiento por inducción, B) El material refractario (no conductor), C) Líneas de flujo, D) material calentado.

En la figura 2.12 se observa el circuito eléctrico equivalente de una bobina de calentamiento por inducción.

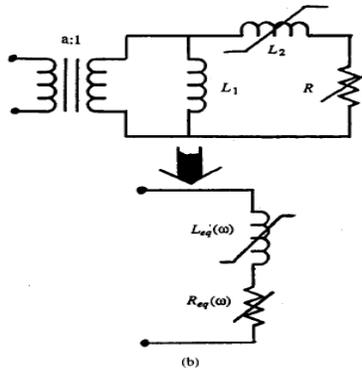


Figura 2-12. Modelo de circuito eléctrico equivalente de una bobina de calentamiento por inducción.

El propósito del transformador es para que coincida lo más estrechamente posible el voltaje de la bobina a la tensión de fuente de alimentación.

El sistema de refrigeración.

Ahorro de energía estrategias se han convertido en una prioridad en el campo del control del sistema de refrigeración [10]. Es un sistema de flujo a través de las bobinas de cobre. El proceso de calentamiento por inducción consume en el material cargado y también en la resistencia de la bobina, por lo cual se debe de refrigerar el sistema (figura 2.13) y así evitar, que se consuma la bobina.

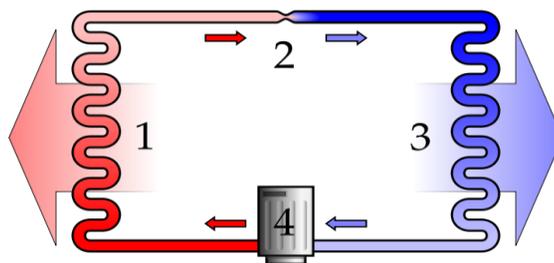


Figura 2-13. Diagrama del sistema de refrigeración.

2.1.7. Aplicaciones del calentamiento por inducción.

El calentamiento por inducción ha sido ampliamente aplicado en los procesos industriales y de electrodomésticos, mostrando propiedades prácticas de alta eficiencia, la seguridad y el control de potencia de salida exacta [11]

Las aplicaciones más difundidas del calentamiento por inducción son las siguientes:

- Tratamientos térmicos: recocido, templado, endurecido superficial.
- Fusión (Forjado en caliente)
- Soldadura de: bronce, termoplásticos.
- Expansión para embutido (alivio de tensiones)
- Aplicaciones de revestimientos (Curado o secado)

Las aplicaciones industriales más importantes del calentamiento por inducción, que requiere alta potencia y alta frecuencia, como la soldadura de tubos y enfriamiento rápido, emplean calentamiento por inducción. La profundidad climatizada es controlada por la frecuencia de salida del sistema; frecuencias más bajas son adecuados para el calentamiento más profundo mientras se calienta la superficie necesita altas frecuencias [12]

2.1.8. Ventajas y desventajas del calentamiento por inducción.

Las ventajas principales del calentamiento por inducción se resumen en:

- Ausencia de contacto físico
- Generación de calentamiento en el lugar requerido. Con la inducción existe la posibilidad de concentrar el calor de un modo selectivo, con base a la frecuencia y potencia correcta para procesos y el desarrollo de una bobina, es posible aislar o marcar zonas específicas de calentamiento, reduciendo los posibles cambios físicos y químicos de zonas circunvecinas, lo que le da al proceso una alta calidad.
- Ausencia de pérdidas por transferencia de calor. Las corrientes de Foucault en muchos dispositivos que trabajan con campos electromagnéticos resultan dañinos ya que transforman energía cinética en calor no deseado, que puede

llegar a ser perjudicial en transformadores y motores eléctricos en el caso del calentamiento por inducción estas corrientes generadas resultan lo contrario ya que gracias a ellas se genera el efecto Joule, es decir el calor generado se aprovecha al máximo.

- Rapidez y precisión. Como el calor se produce directamente sobre la pieza, la velocidad de calentamiento que hay en el proceso es mayor que la de los métodos tradicionales.
- Limpieza y seguridad. Ofrece un proceso muy limpio pues no produce emisiones contaminantes o dañinas, no calienta el medio ambiente o el área fuera de la bobina de calentamiento reduciendo así los riesgos de trabajo.
- Fácil automatización y control de ciclo de trabajo.

El calentamiento por inducción nos ofrece notables ventajas sobre los demás métodos de calentamiento a nivel industrial, pero también cuenta con algunas desventajas, que pueden resultar en riesgos para los operadores de estas tecnologías, no representa un gran riesgo si se tienen las medidas indicadas de seguridad industrial.

Estas desventajas se enlistan a continuación:

- Descargas eléctricas, el tocar partes con carga eléctrica viva puede causar un toque fatal.
- Se puede desprender humo y gases peligrosos en los procesos.
- Peligro de incendio o explosión.
- Puede causar quemaduras.
- Los campos magnéticos pueden afectar aparatos.
- Pueden causar interferencia.
- El sobre uso puede causar sobrecalentamiento del equipo.

2.2. Diseño de un LCL-Resonante inversor basado en IGBT.

El sistema consta de una bobina y una resistencia conectada en serie. El factor de potencia del sistema varía entre 0.03 y 0.08. La potencia reactiva requerida es extremadamente alto: entre 2MVA y 5MVA de 160 kW de potencia activa. Requisitos de seguridad restringen la

tensión inductor a un límite superior de 3 kV, y por lo tanto la corriente nominal del inductor está por encima 1kA

Es necesario disponer de compensación de potencia reactiva con una batería de condensadores conectados en paralelo a la bobina

2.2.1. Topologías de convertidores.

IGBT's fueron escogidos para la aplicación 100kHz pueden operar a una tensión de circuito intermedio de 800V un impulso de voltaje es necesario para obtener la tensión requerida de 3kV máxima en el inductor. El voltaje y la corriente en el circuito resonante varían con diferentes cargas

Para evitar un transformador, estas demandas dan como resultado el diseño de un circuito resonante de tercer orden con los dispositivos conmutables pasivos. La Figura 2.14 muestra las dos soluciones viables para el inversor y el circuito resonante: un inversor de fuente de corriente con acoplamiento capacitivo y un inversor de fuente de tensión con acoplamiento inductivo de la carga [13].

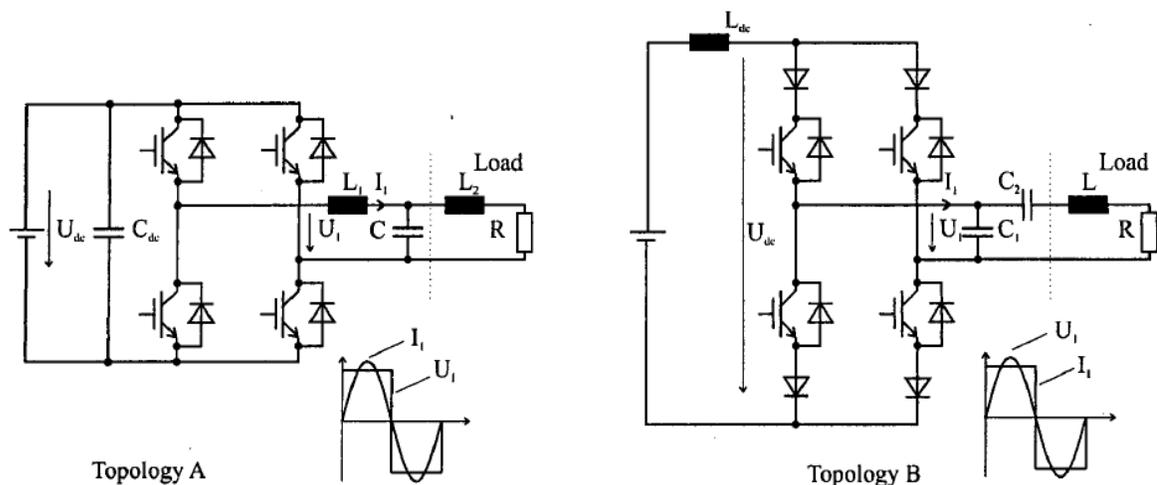


Figura 2-14. VSI con acoplamiento inductivo (topología A) y CSI con acoplamiento capacitivo (topología B) de la carga.

Estas topologías incluyen las características deseadas de los dispositivos de conmutación del circuito intermedio necesario. El control de conmutación y también el comportamiento de los circuitos en caso de un fallo.

La impedancia Z es el valor del complejo de impedancia de entrada del tanque resonante define por las dos frecuencias angulares ω_{01} y ω_{02} (ecuaciones 2.20).

	Topología A (LCL)	Topología B (CCL)	
$Z \rightarrow 0$	$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{C \cdot L_1 L_2 / (L_1 + L_2)}}$	$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_2}}$	
$Z \rightarrow \infty$	$\omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{C \cdot L_2}}$	$\omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_1 C_2 / (C_1 + C_2)}}$	2.20

2.2.2. Comparación de topologías.

Diferentes aspectos tienen que ser considerados:

- El modo de conmutación suave y las pérdidas en los dispositivos activos.
- El efecto de la inductancia parásita, la capacitancia en el diseño de circuito de control y en la tensión de los dispositivos.
- El diseño de dispositivos resonantes pasivos.
- El manejo de errores.
- La flexibilidad de la solución.

La conmutación suave de los IGBT's fácilmente se puede lograr con la ayuda de la carga resonante. Sin embargo, las pérdidas de conmutación son todavía dominante en 100 kHz frecuencia de conmutación y limitan el rendimiento global del sistema. El primer objetivo es encontrar la solución con las pérdidas de conmutación más bajas. La capacidad de salida de los IGBT's influye en el instante de conmutación, conmutación por debajo de la frecuencia de resonancia. En la tabla 2.5 y 2.6 se muestran la dualidad entre las dos topologías.

Tabla 2-5. DUALIDAD TOPOLOGÍAS AYB.

Topología A (LCL tanque resonante)	Topología B (CCL tanque resonante)
Inversor de fuente de tensión.	Inversor de fuente de corriente.
Flujo de corriente bidireccional a través de los semiconductores.	Bloqueo de tensión bidireccional.
Tensión de salida rectangular, corriente de salida sinusoidal.	Corriente de salida rectangular, tensión de salida sinusoidal.
El tiempo muerto es requerido para el proceso de conmutación.	Tiempo de solape requerido para el proceso de conmutación.
Conmutación instantánea ligeramente antes del cruce por cero de la corriente de carga.	Conmutación instantánea ligeramente antes del cruce por cero de la tensión de carga.
El inversor tiene que ser apagado en caso de un cortocircuito.	Todos los semiconductores deben llevar a cabo en caso de un coto circuito, se requiere una recuperación palanca o energía
Frecuencia de trabajo aproximadamente.	Frecuencia de trabajo aproximadamente.
$\omega = \frac{1}{\sqrt{C \cdot L_1 \cdot L_2 / L_1 + L_2}}$	$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_1 \cdot C_2 / C_1 + C_2}}$

Tabla 2-6. Comparación de topologías de convertidores factibles.

VSI con acoplamiento de la carga (LCL tanque resonante)	CSI con acoplamiento de la carga (CCL tanque resonante)
+Zero-suave corriente de conmutación a la frecuencia de resonancia.	+Zero-tensión suave de conmutación a la frecuencia de resonancia.
+Zero-tensión suave de conmutación por encima de la frecuencia de resonancia.	+Zero-suave corriente de conmutación por encima de la frecuencia de resonancia.
+Buen uso de la capacidad del voltaje-bloqueo de los IGBT's resultando en bajas pérdidas en conducción.	-Debido a la tensión sinusoidal la forma de onda de la capacidad de bloqueo de los IGBT.s es poco utilizado resulta en corrientes más altas y por lo tanto conduce mayores pérdidas.
+IGBT's están estandarizados para el uso en convertidores de fuente de tensión.	-Adicionales necesarios como dispositivos simétricos de alta velocidad.
+No hay diodos en serie adicionales necesarios.	+La inductancia parasita en el conductor de alimentación del inversor a la carga es crítico (sobretensiones a través de los IGBT's pérdidas de conmutación más altas); compensación es imposible (con limitaciones) por una estrategia de conmutación optimizado, similar a la conmutación natural en puente de tiristores.
+El condensador resonante puede ser colocado cerca del inductor reduciendo así las pérdidas, se reducen al mínimo la longitud de la alta tensión, y conexión de alta corriente.	-Para minimizar la inductancia parasita en el cable entre el convertidor y la carga, la batería de condensadores se dividen con el condensador paralelo cerca del inversor. Esto conduce a grandes pérdidas y las caídas de tensión a través de la conexión.
-El diseño de la bobina resonante de salida es difícil, el cuidado de los campos y las pérdidas por fuga.	+Diseño del circuito intermedio no es crítico.
-CD diseño enlace debe ser de muy baja inductancia.	+Mejor corto circuito y la capacidad de manejo debido a la relación de limitación de corriente CD sin carga

La inductancia parásita de salida es el parámetro crítico en el inversor fuente de corriente. Es especialmente importante cuando se requiere una alta flexibilidad del sistema del convertidor. La figura 2.15 muestra la medición de voltaje y corriente del IGBT durante la desconexión.

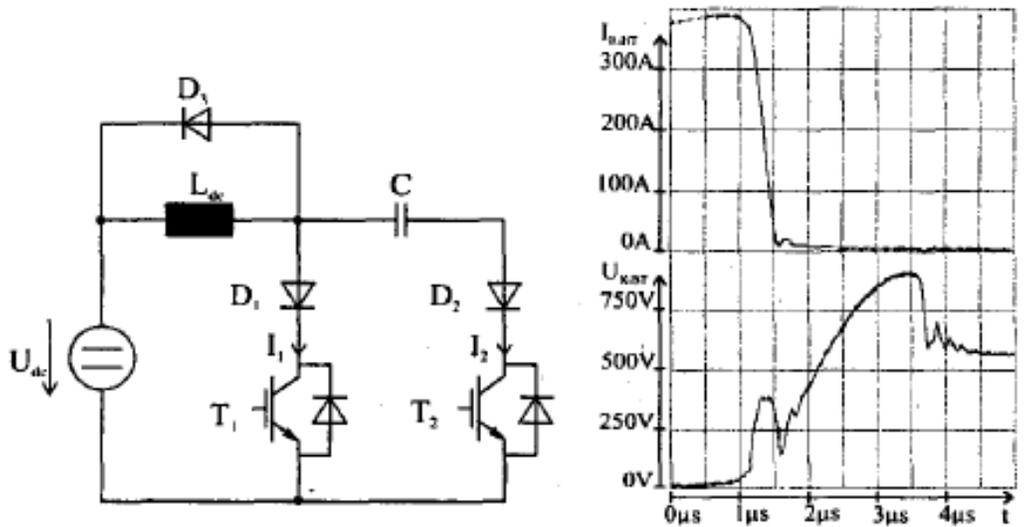


Figura 2-15. Voltaje y corriente del IGBT durante la desconexión

La imagen muestra claramente el problema de las pérdidas de conmutación debido a la inductancia parásita en el inversor fuente de corriente. El óptimo ángulo de conmutación depende de la inductancia parásita L_{stray} , la corriente I_1 del inversor, la tensión U_1 del inversor y la frecuencia angular ω (ecuación 2.21)

$$\cos \beta = \frac{2 \cdot L_{stray} \cdot I_1 \cdot \omega}{U_1} \quad 2.21$$

Este tipo de control tiene dos desventajas:

- Primero, que varía con la carga, la configuración de circuito y la frecuencia y por lo tanto es difícil de ajustar exactamente a los instantes de conmutación deseada.
- En segundo lugar, cuanto mayor sea el ángulo de superposición de la conmutación $\Phi = 180^\circ - \beta$, mayor será la kVA-nominales del convertidor para alcanzar el poder real constante en la carga, lo que conduce a pérdidas de semiconductores más altas.

Este esquema de control (figura 2.16) sólo tiene sentido para configuraciones inductivas parasitarias bajas.

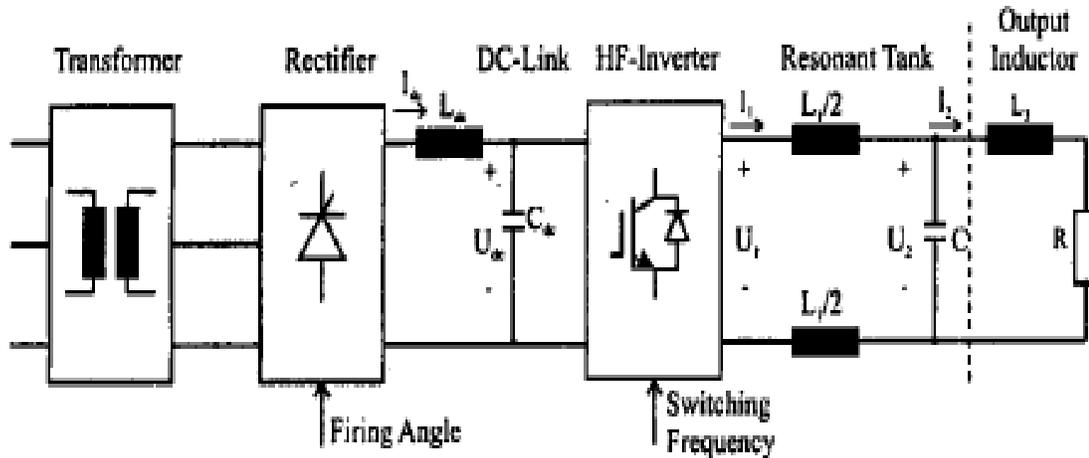


Figura 2-16. Esquema de control.

En el lado de entrada, la alta frecuencia IGBT inversor está conectado a un rectificador de tiristores a través de un enlace de voltaje. El inversor suministra una LCLR carga resonante con un circuito LC acoplar el inductor de salida para el inversor.

Circuito LC tiene dos propósitos:

1. Proporciona la corriente reactiva consumida por el inductor de salida.
2. Proporciona un importante impulso de voltaje a través del inductor L_1 .

2.2.3. Impedancia Características.

El propósito del inductor L_1 es transformar la baja impedancia del inductor a un valor más adecuado mientras se trabaja cerca de la frecuencia de resonancia fijado por L_1 , L_2 y C . La impedancia compleja se compone de la parte real (ecuación 2.22).

$$R_{eq} = \frac{R}{(1 - \omega^2 L_2 C)^2 + (\omega RC)^2} \quad 2.22$$

y del componente imaginario (ecuación 2.23)

$$X_{eq} = \omega L_1 + \frac{\omega L_2 - \omega^3 L_2^2 C - \omega R^2 C}{(1 - \omega^2 L_2 C)^2 + (\omega RC)^2} \quad 2.23$$

Los IGBT's se conmutan cerca del cruce por cero de la corriente de carga, el análisis se puede simplificar. Los componentes fundamentales de la tensión de salida del inversor y la corriente están aproximadamente en fase. Por lo tanto es equivalente a cero (ecuacion 2.24).

$$X_{eq} \approx 0 \quad 2.24$$

El inversor está diseñado para suministrar la potencia real requerida (ecuación 2.25).

$$P_{Load} = P_{Inverter} = \frac{\tilde{U}_1^2}{R_{eq}} \quad 2.25$$

La relación de transformación entre los valores absolutos del inversor I_1 de corriente y el inductor I_2 de corriente se establece simplemente por la relación de la resistencia de entrada tanque resonante equivalente y resistencia de carga se representa con la ecuación 2.26.

$$\frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{R_{eq}}{R}} \quad 2.26$$

Un tanque resonante con un alto factor de calidad Q, a la aproximación (ecuación 2.27)

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{L_1}{L_2} \quad 2.27$$

El diseño básico del convertidor es hecho por la potencia nominal y una carga dada. El sistema debe ser capaz de controlar la potencia de carga. Debe hacer frente a las variaciones de carga que pueden ocurrir durante el inicio y cuando diversos aceros se calientan dentro del mismo inductor. La variación de la frecuencia no es factible una solución de control. La potencia de salida tiene que ser controlado por el rectificador de ajuste de la tensión del enlace de CC. Variación de la carga durante el arranque se expresa por el cambio en la resistencia equivalente R_{eq} que, con base en (ecuación 2.26) y (ecuación 2.27), es de aproximadamente la ecuación 2.28.

$$R_{eq} \cong R \cdot \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 \quad 2.28$$

La resistencia equivalente de la carga de frío es menor que el valor nominal.

Capítulo 3.

Lógica difusa y Visión por computadora.

3.1. Lógica difusa.

Desde la introducción de los conjuntos difusos por Lofti A. Zadeh en 1965, los sistemas difusos han demostrado tener una alta capacidad para resolver los problemas complejos de toma de decisiones que implica el manejo de información imprecisa, incierta o ambigua [16].

A lo largo de la línea de tiempo de los sistemas difusos se han propuesto diferentes modelos de inferencia destacando entre ellos los desarrollados por Mamdani, Sugeno, Tsukamoto, entre otros.

Los sistemas difusos han sido utilizados como una estructura de representación y procesamiento de conocimiento impreciso o incierto basada en los conceptos de conjuntos difusos, reglas lingüísticas de la forma Si <antecedente> Entonces <consecuente> donde en la parte del antecedente encontramos uno o más predicados lingüísticos y en la parte que corresponde al consecuente encontramos un predicado lingüístico (Mamdani) o un polinomio (Sugeno), así también en estos sistemas se incorpora un sistema de razonamiento difuso (Sistema de razonamiento aproximado) basado en lógica difusa, con lo cual tales sistemas han logrado exitosas aplicaciones en un amplia variedad de campos tales como medicina, robótica, control autónomo, bases de datos, minería de datos, entre otros.

Teniendo en cuenta las características del sistema de control de la producción industrial con múltiples parámetros, no lineales, de retardo de tiempo largo [17] se recomienda emplear sistemas difusos.

3.1.1. Conjuntos difusos y funciones de membresía.

Teniendo un posible rango de valores el cual se llamará U , por ejemplo $U = R^n$, donde R^n es un espacio de n dimensiones, a U se le denomina universo de discurso. En U se tendrá un conjunto difuso de valores llamado F el cual es caracterizado por una función de

pertenencia μ_f tal que $\mu_f: U \rightarrow [0,1]$, donde $\mu_f(u)$ representa el grado de pertenencia de un u que pertenece a U en el conjunto difuso.

Asumiendo que X es un conjunto, un conjunto difuso A en X es asociado con una función característica: $\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1]$.

La función característica es típicamente denominada función de pertenencia.

Si X es una colección de objetos en el cual $x \in X$, un set difuso es un mapa $\mu_F(x): X \rightarrow [0, \alpha]$, en el cual a cada valor x la función $\mu_F(x)$ le asigna un numero entre los valores 0 a α . • El set difuso es el set de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

El valor asignado por $\mu_F(x)$ corresponde al grado en el cual el valor x tiene el atributo F . Visto de otra manera la función $\mu_F(x)$ nos indica cual es el grado de pertenencia de x al atributo F . La función $\mu_F(x)$ se llama la función de pertenencia del atributo F . La función tiene que ver con un grado de ambigüedad sobre la característica de la variable que se está midiendo pero no es una probabilidad.

Ej: $\mu_F(x)$ corresponde al nivel de frío medido en la variable x (figura 3.1).

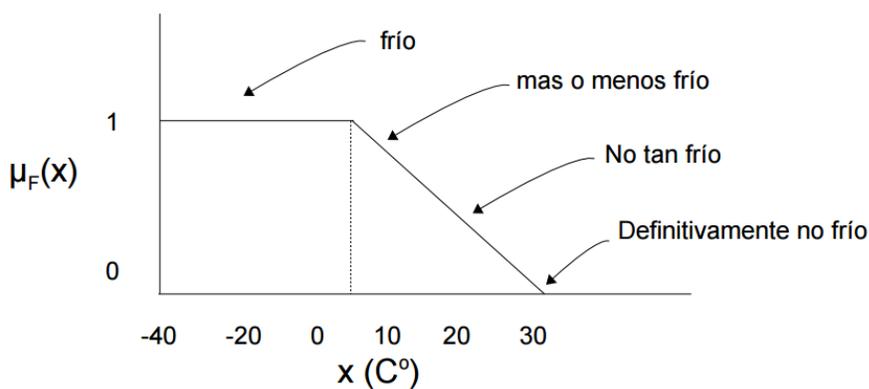


Figura 3-1. Nivel de frío.

3.1.3. Término lingüístico.

Es una palabra que en el dominio de un determinado lenguaje de uso humano es empleado para hacer referencia a un conjunto difuso implícitamente definido sobre un determinado universo de discurso.

3.1.4. Variables Lingüísticas.

Es una variable cuyos términos se representan mediante términos lingüísticos. El significado de estos términos lingüísticos se determina mediante conjuntos difusos. Proporcionan una transición gradual de estados. Tienen capacidad para expresar y trabajar con observaciones y medidas de incertidumbre. Una variable lingüística se caracteriza por (ecuación 3.1):

$$(v, T, X, g, m) \quad (3.1)$$

Donde:

- v : es el nombre de la variable.
- T : es el conjunto de término lingüístico de v .
- X : es el universo de discurso de la variable v .
- g : es una regla sintáctica para generar términos lingüísticos.
- m : es una regla semántica que se asigna a cada término lingüístico t su significado $m(t)$, que es un conjunto difuso.

Se usan variables lingüísticas (figura 3.2) para analizar y modelar unos sistemas:

Ejemplo: Supongamos que $X = \text{“edad”}$, se pueden definir set difusos: “joven”, “adulto”, “anciano”

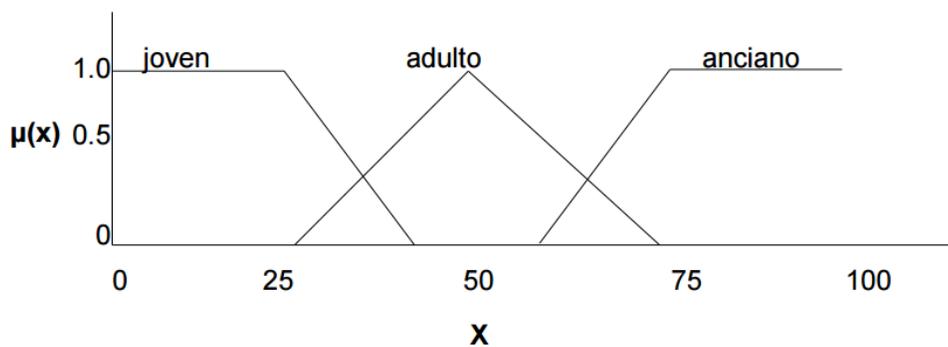


Figura 3-2. Variables lingüísticas

3.1.5. Funciones de pertenencia.

Son fórmulas matemáticas que permiten caracterizar conjuntos difusos así como su forma geométrica mediante la determinación del grado de pertenencia en el intervalo [0, 1] de cada uno de los elementos comprendidos en tales conjuntos. En la tabla 1 se describen algunas de las funciones de pertenencia.

Existen varias funciones de pertenencia que se pueden emplear en lógica difusa, en este documento solo presentaremos las 2 más comunes.

Función de pertenencia triangular:

La función triangular (figura 3.3) donde a, b y c son parámetros que dan forma a la función, y donde x es una variable perteneciente al universo de discurso X (ecuación 3.2).

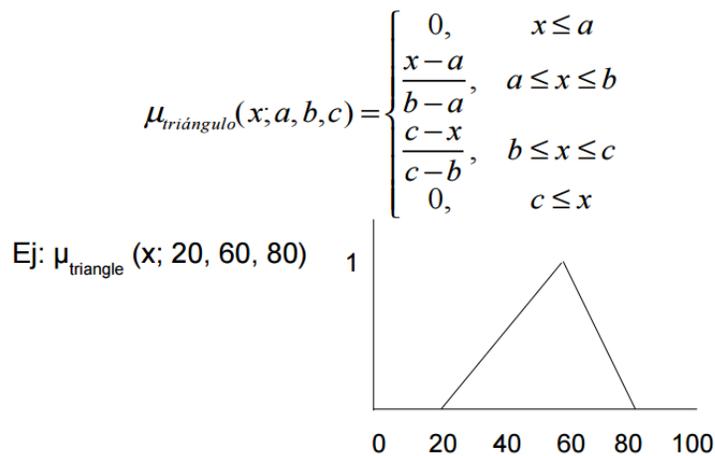


Figura 3-3. Función de pertenencia triangular.

$$\text{Triangular}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad 3.2$$

Función de pertenencia trapezoidal:

La función de pertenencia trapezoidal (Figura 3.4), a, b, c y d son los parámetros que dan forma a esta función y donde x es una variable al universo de discurso X (ecuación 3.3) [18].

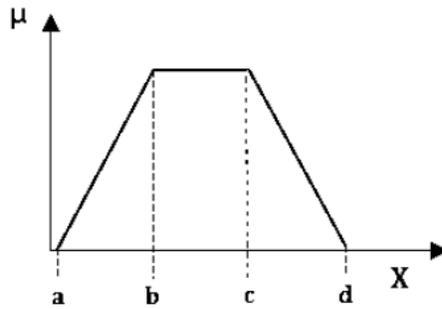


Figura 3-4. Función de pertenencia trapezoidal

$$\text{Trapezoidal}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad 3.3$$

3.1.6. Inferencia difusa.

Puede definirse como el proceso de obtener un valor de salida para un valor de entrada empleando la teoría de conjuntos difusos. La inferencia de tipo Mamdani es posiblemente el método más ampliamente utilizado, propuesto por Ebrahim Mamdani en 1975 [19]. El proceso se realiza en cuatro pasos:

Difusificador: la entrada de un sistema de lógica difusa tipo Mamdani normalmente es un valor numérico proveniente, por ejemplo de un sensor; para que este valor pueda ser procesado por el sistema difuso se hace necesario convertirlo a un “lenguaje” que el mecanismo de inferencia pueda procesar. Esta la función del difusificador, que toma los valores numéricos provenientes del exterior y los convierte en valores “difusos” que pueden ser procesados por el mecanismo de inferencia. Estos valores difusos son los niveles de pertenencia de los valores de entrada a los diferentes conjuntos difusos en los cuales se ha dividido el universo de discurso de las diferentes variables de entrada al sistema.

Evaluación de las reglas: teniendo los diferentes niveles de pertenencia arrojados por el difusificador, los mismos deben ser procesados para generar una salida difusa. La tarea del sistema de inferencia es tomar los niveles de pertenencia y apoyado en la base de reglas generar la salida del sistema difuso.

Agregación de las salidas de las reglas: La base de reglas es la manera que tiene el sistema difuso de guardar el conocimiento lingüístico que le permite resolver el problema para el cual ha sido diseñado. Estas reglas son del tipo IF-THEN.

Una regla de la base de reglas o base de conocimiento tiene dos partes, el antecedente y el consecuente (figura 3.5).

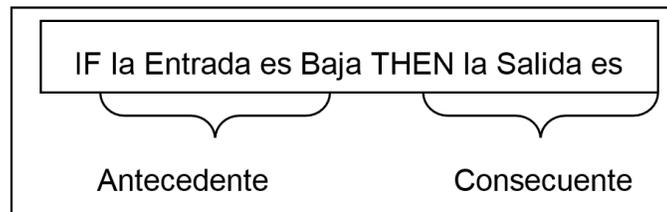


Figura 3-5. Estructura de una regla difusa.

En un sistema difuso tipo Mamdani tanto el antecedente como el consecuente de las reglas están dados por expresiones lingüísticas.

Desdifusificador: la salida que genera el mecanismo de inferencia es una salida difusa, lo cual significa que no puede ser interpretada por un elemento externo (por ejemplo un controlador) que solo manipule información numérica. Para lograr que la salida del sistema difuso pueda ser interpretada por elementos que solo procesen información numérica, se debe convertir la salida difusa del mecanismo de inferencia: este proceso lo realiza el desdifusificador.

3.1.7. Sistemas de inferencia difusa tipo Mamdani.

El método Mamdani (figura 3.6) se desarrolló inicialmente por Mamdani y Assilan como un sistema de control para un motor de vapor utilizando una combinación de reglas lingüísticas obtenidas de operadores expertos en el área.

El método Mamdani es comúnmente utilizado de la forma min.-máx., es decir, la composición de las reglas de inferencia estarán dadas por el operador de intersección T-norm min y por el operador de unión S-conorm máx y el método de agregación de las salidas es el método máximo.

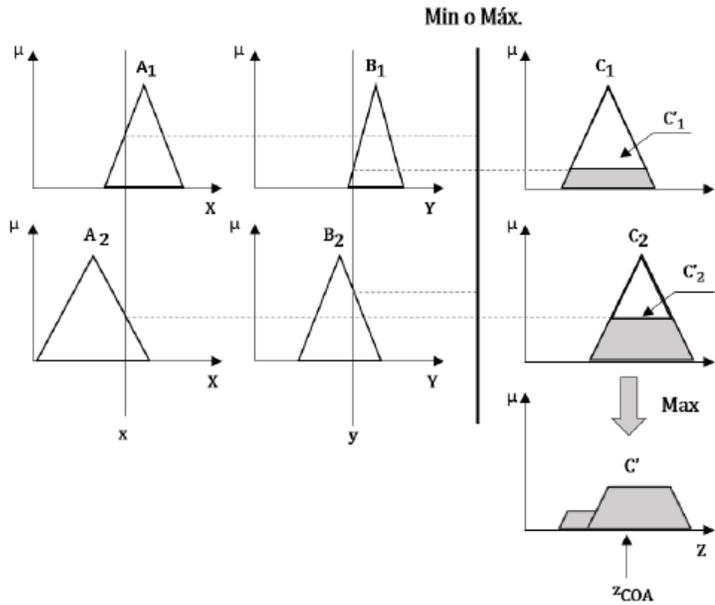


Figura 3-6. Sistema de inferencia difusa tipo Mamdani.

La agregación es el método mediante el cual se van a unir los valores obtenidos en cada una de las reglas de inferencia utilizadas en el sistema, para realizar esto, existen diferentes tipos de agregación como lo son el máximo, el producto y la suma algebraica, entre otros.

Un sistema inferencia difusa, transforma las variables u objetos rígidos en variables difusas por medio de las funciones de pertenencia, por lo tanto, para poder obtener un valor rígido como salida de dicho sistema, es necesario utilizar un desdifusificador. En el método Mamdani, es común encontrarnos como resultado de la agregación, con un área irregular, por lo tanto, para obtener el valor rígido como salida del sistema se utiliza alguno de los siguientes métodos de desdifusificación.

Métodos de desdifusificación para sistemas difusos tipo Mamdani.

El centro de gravedad (ecuación 3.4).

$$Z_{COA} = \frac{\int_Z \mu_{A(z)} z \, dz}{\int_Z \mu_{A(z)} \, dz} \quad 3.4$$

Donde $\mu_{A(z)}$ es el grado de pertenencia de z en A y A es el área resultante de la agregación de las partes consecuentes de las reglas de inferencia del sistema. Al

ser el centro de equilibrio entre la distribución de los valores agregados, es el método más utilizado.

El bisector de área (ecuación 3.5)

$$\int_{\alpha}^{Z_{BOA}} \mu_{A(z)} dz = \int_{Z_{BOA}}^{\beta} \mu_{A(z)} dz \quad 3.5$$

Donde $\alpha = \text{Min}\{z|z \in Z\}$ y $\beta = \text{Max}\{z|z \in Z\}$

El bisector de área es la línea vertical que divide el área final en dos regiones con la misma área.

Media de los máximos (ecuación 3.6).

$$Z_{MOM} = \frac{\int_{Z'} z dz}{\int_{Z'} dz} \quad 3.6$$

Donde $Z' = \{z|\mu_{A(z)} = \mu^*\}$ y μ^* es el grado de pertenencia máximo de z en A .

Menor de los máximos (ecuación 3.7).

$$Z_{SOM} = \text{minimo}\{z|\mu_{A(z)}\} \quad 3.7$$

Donde el menor de los máximos es el valor menor de z con un grado de pertenencia máximo en A.

Mayor de los máximos (ecuación 3.8).

$$Z_{LOM} = \text{maximo}\{z|\mu_A(z)\} \quad 3.8$$

Donde el mayor de los máximos es el valor mayor de z con un grado de pertenencia máximo en A.

3.2 Sistemas de inferencia difusa de intervalo tipo 2

Los sistemas difusos de intervalo tipo 2 son una extensión de los sistemas difusos tipo 1 por lo tanto la lógica básica de los sistemas no cambia. Sin embargo, como mencionan Castillo y Melin en [20], un número de tipo más alto (en este caso tipo 2), únicamente indica un grado de difusidad más alto y debido a dicho grado de difusidad, la naturaleza de las funciones de pertenencia cambia, así como de las operaciones que dependen de las funciones.

A continuación se presentan las extensiones correspondientes a los sistemas difusos tipo Mamdani para manejar conjuntos difusos de intervalo tipo 2.

3.2.1 Sistema de inferencia difusa Mamdani de intervalo tipo-2

El esquema de un sistema difuso de intervalo tipo 2 tipo Mamdani (SDMIT2), tiene una estructura similar a su contra parte de tipo 1, utilizamos un método de desdifusificación para obtener un número rígido como salida del sistema.

En un sistema SDMIT2 el desdifusificador es remplazado por un bloque de procesamiento de salidas, el cual incluye un reductor de tipo y un desdifusificador como se muestra en la figura 3.7.

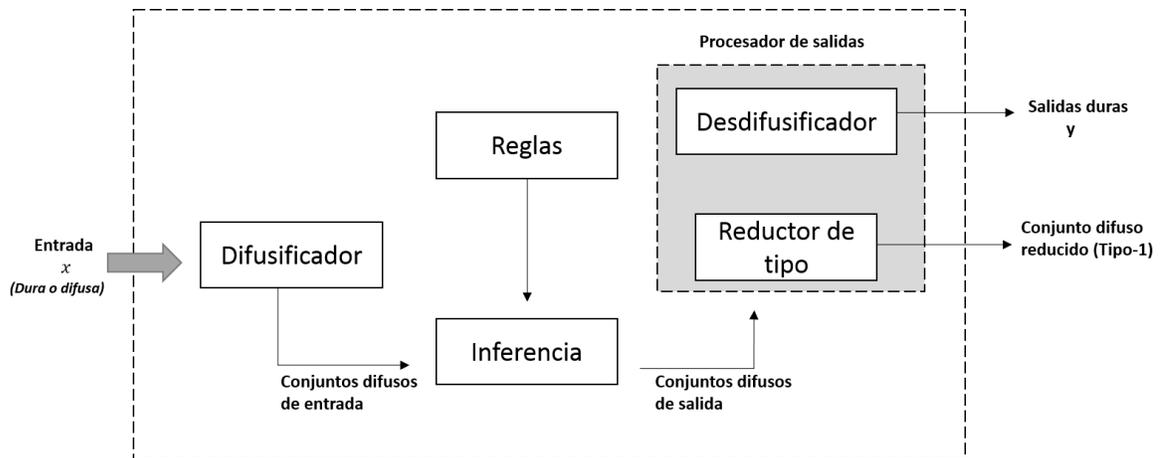


Figura 3-7. Esquema de un sistema de inferencia difusa tipo 2.

A manera de ejemplo, supongamos que tenemos un sistema difuso tipo 2 con 2 variables lingüísticas de entrada: la variable lingüística x donde $x \in X[0,1]$ y la variable lingüística y , donde $y \in Y[0,1]$ y una variable lingüística de salida z , donde $z \in Z[0,1]$.

Para este sistema, la variable lingüística de entrada x , esta definida por los conjuntos difusos tipo-2 \tilde{A}_1 y \tilde{A}_2 como se muestra en la figura 3.8 y cuyos parámetros se describen en la tabla 3.1.

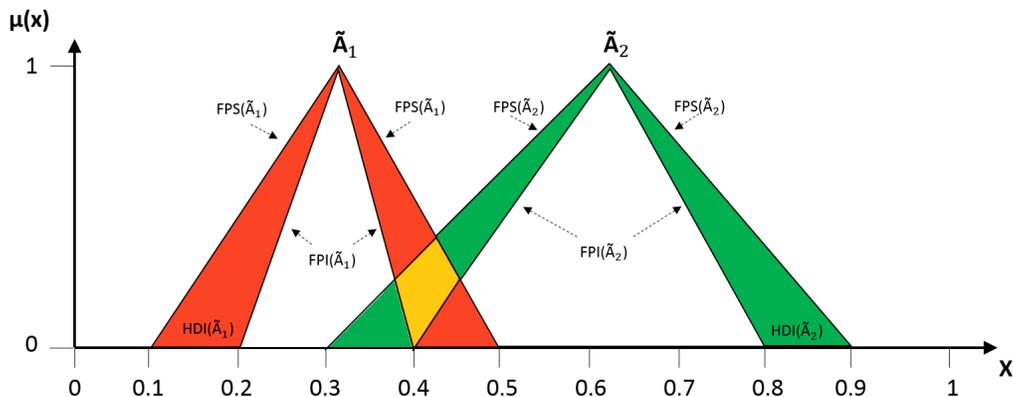


Figura 3-8. Conjunto difuso de intervalo t-2 de la variable lingüística x .

Tabla 3-1. CDIT2 de X.

Variable lingüística X		
CDIT2	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2
FPS	(0.1, 0.3, 0.5)	(0.3, 0.6, 0.9)
FPI	(0.2, 0.3, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.8)

La variable lingüística de entrada y, está definida por los conjuntos difusos tipo-2 \tilde{B}_1 y \tilde{B}_2 como se muestra en la figura 3.9 y cuyos parámetros se describen en la tabla 3.2

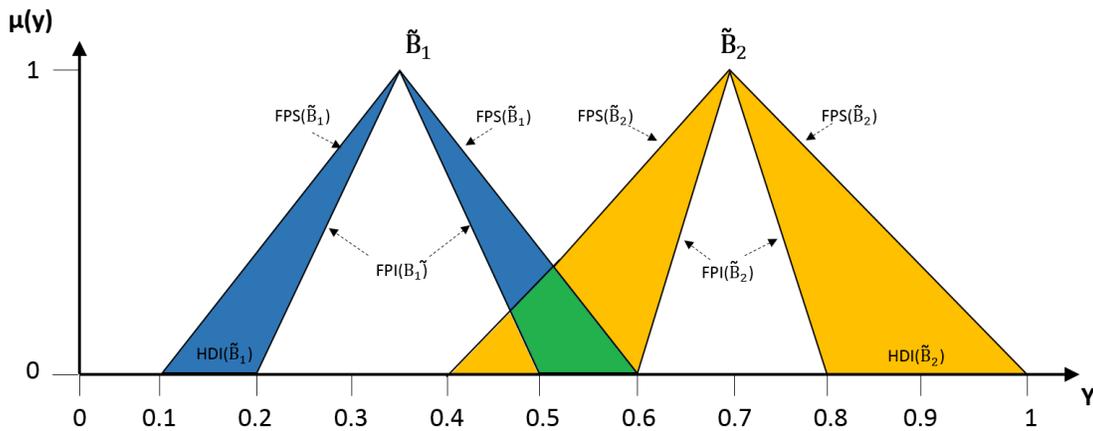


Figura 3-9. Conjuntos difusos de intervalo tipo 2 de la variable lingüística y.

Tabla 3-2. CDIT2 de Y.

Variable lingüística Y		
CDIT2	\tilde{B}_1	\tilde{B}_2
FPS	(0.1, 0.35, 0.6)	(0.4, 0.7, 1)
FPI	(0.2, 0.35, 0.5)	(0.6, 0.7, 0.8)

Finalmente la variable lingüística de salida z, está definida por los conjuntos difusos tipo 2 \tilde{C}_1 y \tilde{C}_2 como se muestra en la figura 3.10 y cuyos parámetros se describen en la tabla 3.3.

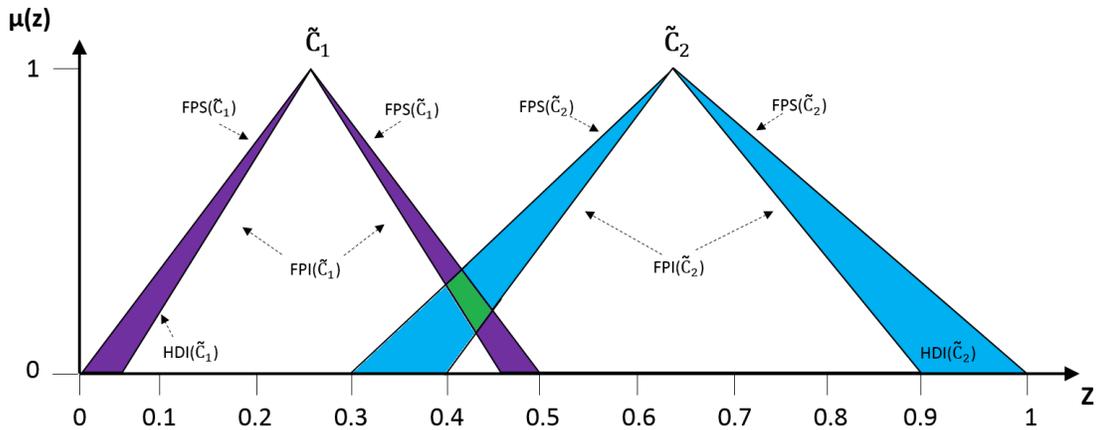


Figura 3-10. Conjuntos difusos de intervalo tipo 2 de la variable lingüística z.

Tabla 3-3. CDIT2 de Z

Variable lingüística Z		
CDIT2	\tilde{C}_1	\tilde{C}_2
FPS	(0.0, 0.25, 0.5)	(0.3, 0.65, 1)
FPI	(0.05, 0.25, 0.45)	(0.4, 0.65, 0.9)

La primera etapa del sistema, la difusificación, es igual a la difusificación del sistema difuso tipo 1, la diferencia es que al utilizar funciones de intervalo tipo 2 obtendremos un intervalo de grado de pertenencia.

El valor de entrada es difusificado tanto en la FPS como en la FPI del conjunto difuso de intervalo tipo 2 correspondiente, obteniendo de esta manera dicho intervalo.

Si tenemos como entrada del sistema $x = 0.36$ y $y = 0.45$ la difusificación estaría dada en las variables lingüísticas X y Y como se muestra en la figura 3.11 y 3.12 donde cada grado de pertenencia μ_{FPS} y μ_{FPI} está dado por una función de pertenencia triangular:

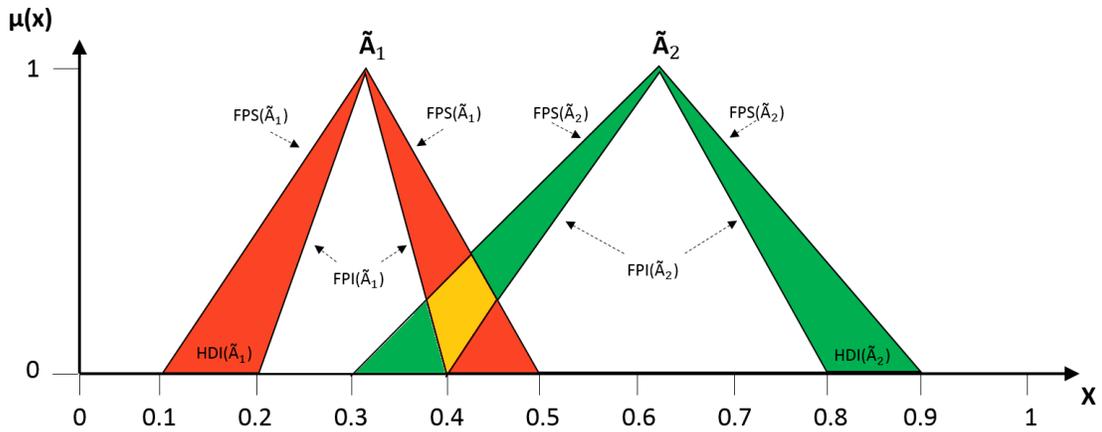


Figura 3-11. Difusificación de la entrada del sistema $x=0.36$.

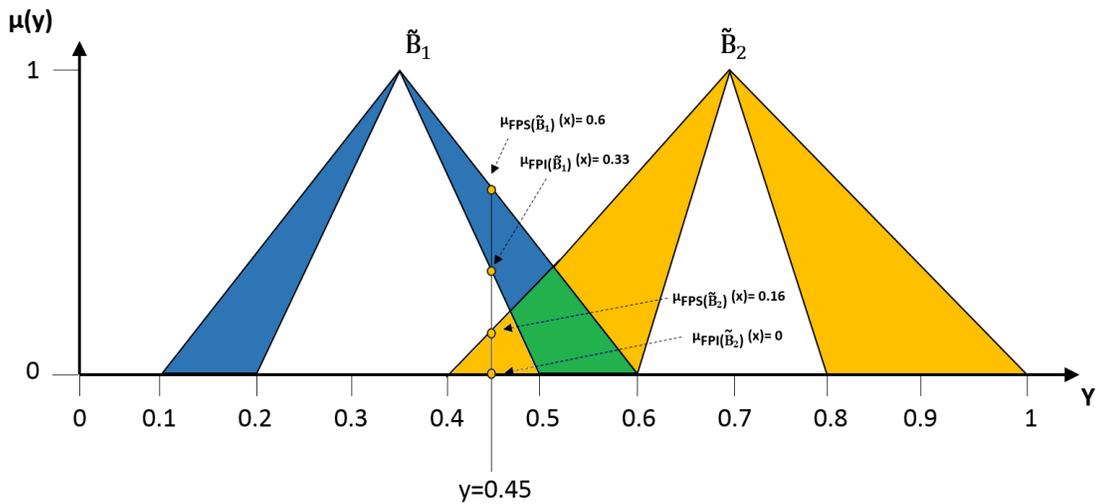


Figura 3-12. Difusificación de la entrada del sistema $y=0.45$.

La segunda etapa del sistema es el mecanismo de inferencia, el cual incluye las reglas de inferencia difusa, para este sistema se consideran las siguientes reglas.

- Si x es \tilde{A}_1 y y es \tilde{B}_1 entonces z es \tilde{C}_1
- Si x es \tilde{A}_2 y y es \tilde{B}_2 entonces z es \tilde{C}_2

Un sistema de inferencia difusa tipo 1 tiene como salida un valor rígido, por otra parte un sistema de inferencia difuso tipo 2 tiene como salida un intervalo, también referido como intervalo de incertidumbre (IDI), dicho intervalo permite al sistema mantener la incertidumbre asociada a cada función de pertenencia con respecto a la variable de entrada (ecuación 3.11).

$$IDI(r_i) = [\underline{I}(r_i), \bar{I}(r_i)] \quad (3.11)$$

Donde $IDI(r_i)$ es el intervalo de incertidumbre de la regla i donde $i = 1, 2, 3 \dots N$ y N es el número de reglas del sistema difuso tipo 2, $\underline{I}(r_i)$ es el límite inferior del intervalo, mientras que $\bar{I}(r_i)$ es el límite superior del intervalo.

Como se puede observar en las figuras 3.11 y 3.12, las variables $x = 0.36$ y $y = 0.45$ cumplen con las dos reglas consideradas para este ejemplo.

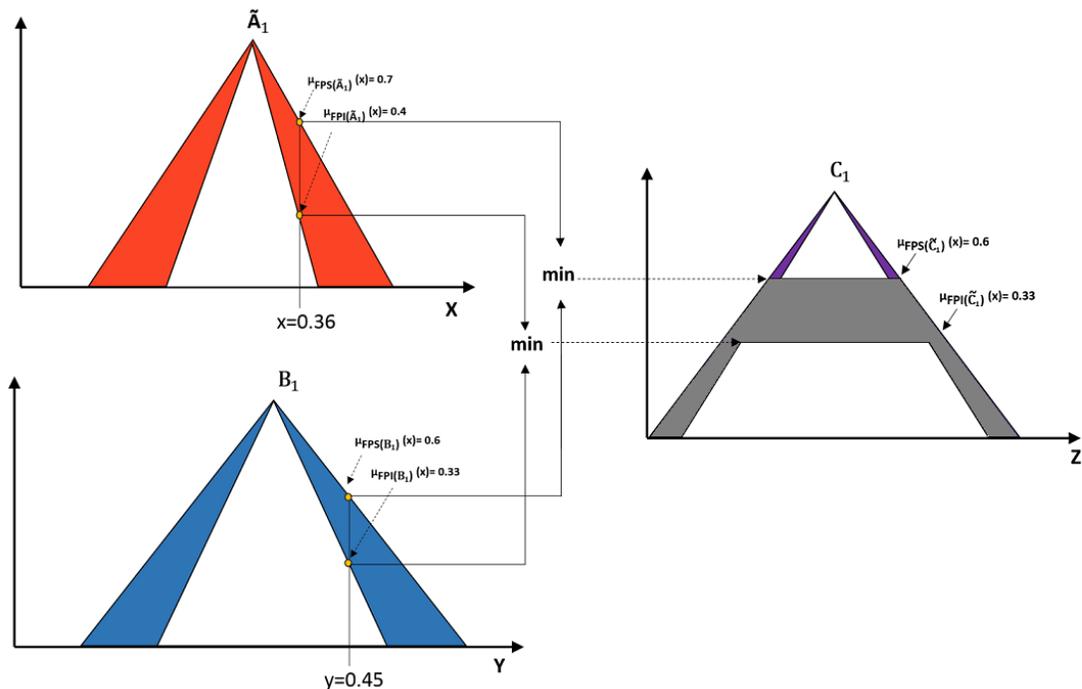


Figura 3-13. Cálculo del intervalo de disparo de la regla 1.

Para calcular el IDI de disparo de cada regla se utilizan los grados de pertenencia obtenidos de cada conjunto de manera similar que en los sistemas difusos tipo 1. La evaluación de las

reglas de inferencia antes mencionadas utilizando el t-norm(min) y el s-conorm(max) se muestra en la Figura 3.13 y 3.14.

De acuerdo con la Figura 3.14 el intervalo de disparo de la regla 1 está dada por: $\mu_{FPS}(\tilde{c}_1) = 0.6$ y $\mu_{FPI}(\tilde{c}_1) = 0.33$ que son los disparos superior e inferior, por lo tanto el intervalo de la regla 1 se define por la ecuación 3.12.

$$IDI(r_i) = [\underline{I}(r_1) = 0.33, \bar{I}(r_1) = 0.6] \quad (3.12)$$

De acuerdo con la figura 3.13 el intervalo de disparo de la regla 2 está dado por: $\mu_{FPS}(\tilde{c}_2) = 0.16$ y $\mu_{FPI}(\tilde{c}_2) = 0$ que son los disparos superior e inferior, por lo tanto el intervalo de la regla 2 se define por la ecuación 3.13:

$$IDI(r_i) = [\underline{I}(r_2) = 0, \bar{I}(2) = 0.16] \quad (3.13)$$

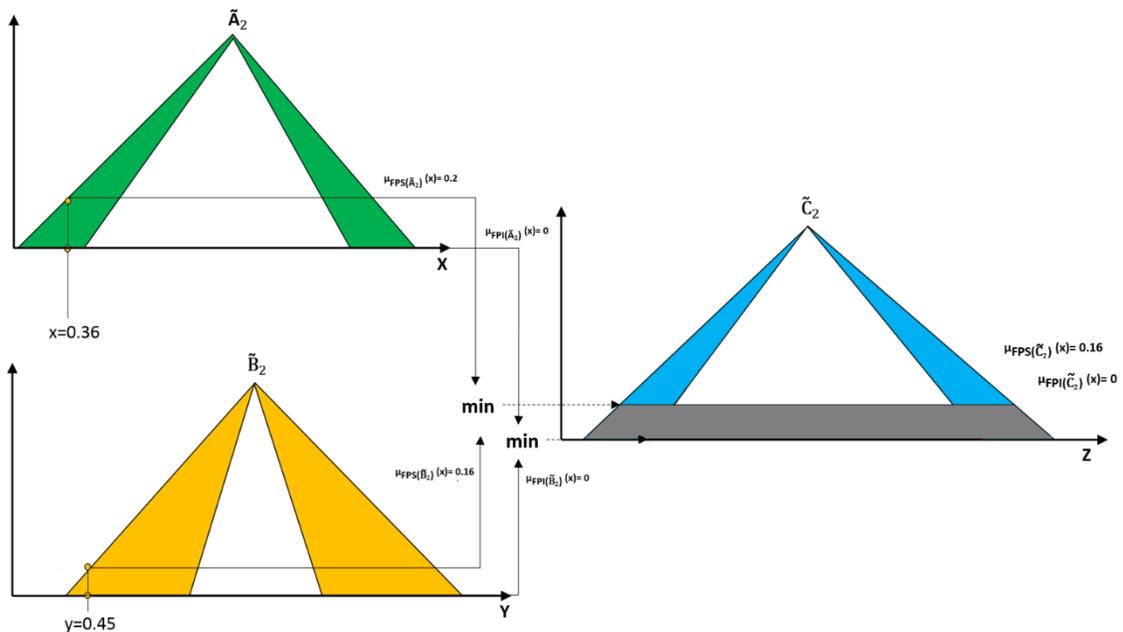


Figura 3-14. Calculo del intervalo de disparo de la regla 2.

Una vez calculados los intervalos de disparo $IDI(R_1)_{i=1}^N$, la siguiente etapa del sistema es el Reductor de tipo, existen diferentes métodos como son: el centroide, el centro de las sumas, el centro de los conjuntos, entre otros.

Para este sistema se considera el centro de los conjuntos. Inicialmente se calcula el centro de los N conjuntos de intervalo tipo 2 de salida, para llevar a cabo el cálculo, es necesario calcular los centroides de todos los conjuntos difusos tipo 1 incrustados en el conjunto difuso tipo 2.

Como mencionan Karnik y Mendel [21], cada uno de los centroides es un número finito, por lo tanto es un conjunto de cálculos que nos lleva a un conjunto de centroides que es conocido como el centro de \tilde{C} , denotado como $C(\tilde{C})$ el cual tiene un valor menor llamado c_l y un valor mayor llamado c_r , de esta manera el calculo del centroide de un conjunto de intervalo tipo 2 se define por la ecuación 3.14:

$$C(\tilde{C}) = [c_l(\tilde{C}), c_r(\tilde{C})] \quad 3.14$$

Donde \tilde{C} es un conjunto de intervalo tipo 2 perteneciente a la parte consecuente de una regla del sistema difuso tipo 2.

Por lo tanto, para calcular $C(\tilde{B})$ solamente es necesario calcular c_l y c_r . No es posible realizar esto de manera aislada, por otra parte el cálculo de c_l y c_r se realiza por medio de dos algoritmos iterativos desarrollados por Karnik y Mendel.

$$c_l = c_l(L) = \frac{\sum_{i=1}^L z_i FPS(\tilde{C}|z_i) + \sum_{i=L+1}^N z_i FPI(\tilde{C}|z_i)}{\sum_{i=1}^L FPS(\tilde{C}|z_i) + \sum_{i=L+1}^N FPI(\tilde{C}|z_i)} \quad (3.15)$$

$$c_r = c_r(R) = \frac{\sum_{i=1}^R z_i FPS(\tilde{C}|z_i) + \sum_{i=R+1}^N z_i FPI(\tilde{C}|z_i)}{\sum_{i=1}^R FPS(\tilde{C}|z_i) + \sum_{i=R+1}^N FPI(\tilde{C}|z_i)} \quad (3.16)$$

En el caso del sistema considerado como ejemplo, los centroides de los dos conjuntos de intervalo tipo 2 de salida estaría dados por $C(\tilde{C}_1) = [c_l(\tilde{C}_1) = 0.239, c_r(\tilde{C}_1) = 0.261]$ y $C(\tilde{C}_2) = [c_l(\tilde{C}_2) = 0.616, c_r(\tilde{C}_2) = 0.684]$, se muestra en la figura 3.15.

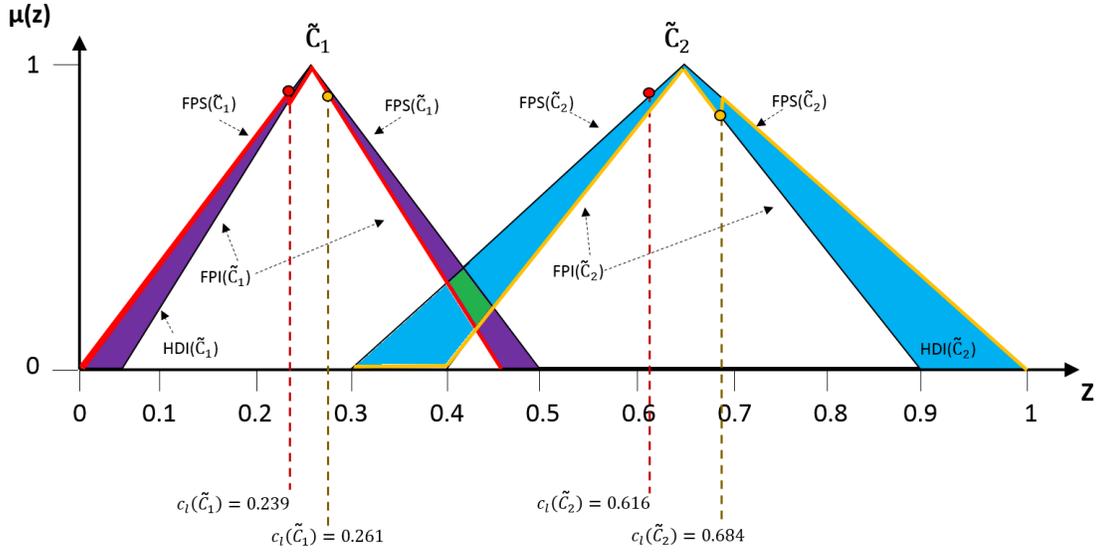


Figura 3-15. Centroide de los CDIT2 de la parte consecuente.

Una vez que hemos calculado los centroides de los conjuntos de la parte consecuente, es posible obtener el centro de los conjuntos de Z , el cual se denomina como $Z_{cos}(x, y) = [z_l(x, y), z_r(x, y)]$ donde:

$$z_l(x, y) = \min_{\forall I^i \in [L^i, \bar{I}^i]} \left[\frac{\sum_{i=1}^N c_l^i I^i}{\sum_{i=1}^N I^i} \right] \quad (3.17)$$

$$z_r(x, y) = \min_{\forall I^i \in [L^i, \bar{I}^i]} \left[\frac{\sum_{i=1}^N c_r^i I^i}{\sum_{i=1}^N I^i} \right] \quad (3.18)$$

Para este sistema la solución utilizando las ecuaciones 3.17 y 3.18 está dada por:

$$z_l(x, y) = \frac{(0.239 * 0.33) + (0.616 * 0)}{0.33 + 0} \quad (3.19)$$

$$z_r(x, y) = \frac{(0.268 * 0.6) + (0.684 * 0.16)}{0.6 + 0.16} \quad (3.20)$$

De esta manera el centroide del conjunto de salida de nuestro sistema utilizando como entradas $x = 0.36$ y $y = 0.45$ quedaría definido como:

$$Z_{cos}(x, y) = [z_l(x, y) = 0.239, z_r(x, y) = 0.355] \quad (3.21)$$

La desfusificación de nuestra salida se define por el promedio de los dos centroides de salida obtenidos, de esta manera la salida final está dada como:

$$z(x, y) = \left[\frac{z_l(x, y) + z_r(x, y)}{2} \right] \quad (3.22)$$

Y así la desdifusificación del sistema estaría dado por:

$$z(x, y) = \left[\frac{0.239 + 0.355}{2} \right] = 0.297 \quad (3.23)$$

3.3. Visión por computadora.

Visión es la ventana al mundo de muchos organismos. Su función principal es reconocer y localizar objetos en el ambiente mediante el procesamiento de las imágenes. La **visión computacional** es el estudio de estos procesos, para entenderlos y construir maquinas con capacidades similares [22].

Existen varias definiciones de visión, entre estas podemos mencionar las siguientes.

- “Visión es saber que hay y donde mediante la vista” (Aristóteles).
- “Visión es recuperar de la información de los sentidos (vista) propiedades validas del mundo exterior” [23].
- “Visión es un proceso que produce a partir de las imágenes del mundo exterior una **descripción** que es útil para el observador y que no tiene información irrelevante”, Marr [24].

Es preciso reconocer que hoy por hoy la visión por computador a veces no es la mejor solución a un problema. Existen muchas ocasiones en las que el problema es tan complejo que la solución humana es lo mejor. Por ejemplo imaginemos una conducción de un vehículo en una carretera con tráfico intenso. Pero a veces, las soluciones humanas tienden a ser inexactas o subjetivas y en ocasiones lentas y presentan una ausencia de rigor así como una pobre percepción (Marshall y Martin 1993, Hamey y col. 1993). No obstante, la solución humana es menos estructurada que la solución artificial y muchos problemas de visión por computador requieren un nivel de inteligencia mucho mayor que el que la máquina pueda

ofrecer. El sistema de visión humana puede describir automáticamente una textura en detalle, un borde, un color, una representación bidimensional de una tridimensional, ya que puede diferenciar entre imágenes de diferentes personas, firmas, colores, etc., puede vigilar ciertas zonas, diagnosticar enfermedades a partir de radiografías, etc. Sin embargo, aunque algunas de estas tareas pueden llevarse a cabo mediante visión artificial, el software o el hardware necesario no consigue los resultados que serían deseables [25].

El procesamiento digital de imágenes aparece tardíamente en la historia de la computación, ya que antes de pensar en ello, había que desarrollar el hardware y los sistemas operativos gráficos que permitieran hacerlo.

El objetivo de la visión computacional es extraer características de una imagen para su descripción e interpretación por la computadora.

En visión se busca obtener descripciones útiles para cada tarea a realizar. La tarea demandará modificar ciertos atributos.

3.3.1. Representación de una imagen digital

Una imagen monocromática o imagen simplemente, se refiere a una función de intensidad de luz bidimensional $f(x,y)$, donde x e y indican las coordenadas espaciales y el valor de f en cualquier punto (x,y) es proporcional a la luminosidad (o nivel de gris) de la imagen en dicho punto. Una imagen digital es una imagen (función) $f(x,y)$ que ha sido discretizada tanto en coordenadas espaciales como en luminosidad. Una imagen digital puede ser considerada como una matriz cuyos índices de renglón y columna identifican un punto (un lugar en el espacio bidimensional) en la imagen y el correspondiente valor de elemento de matriz identifica el nivel de gris en aquel punto. Los elementos de estos arreglos digitales son llamados elementos de imagen o pixels.

En el tratamiento de imágenes se pueden distinguir tres etapas principales:

- Adquisición de la imagen.
- Procesamiento de la imagen.
- Presentación al observador.

La adquisición de la imagen está a cargo de algún transductor o conjunto de transductores que mediante la manipulación de la luz o de alguna otra forma de radiación que es emitida o

reflejada por los cuerpos, se logra formar una representación del objeto dando lugar a la imagen. Ejemplos: el ojo humano sensores de una cámara fotográfica o de vídeo, tomógrafos.

Es importante saber que durante la etapa de adquisición, los transductores agregan ruido a la imagen. Además del ruido, los transductores poseen una resolución limitada, lo cual repercute en la apreciación de dicha imagen. El procesamiento digital de la imagen consiste en eliminar la mayor cantidad de ruido que se le agrega durante la adquisición así como también mejorar las características de dicha imagen como: definición de contornos, color, brillo, etc., valiéndose de procedimientos y herramientas matemáticas. En esta etapa se encuentran también técnicas de codificación para el almacenamiento o bien para la transmisión [26].

La presentación al observador consiste en el método empleado para exponer la imagen la cual puede ser impresa o por medios electrónicos como la televisión, el monitor de una computadora, o algún otro medio. Para la presentación de la imagen se deben considerar ciertos aspectos de percepción humana así como las velocidades de despliegue del dispositivo utilizado.

1.3.2. El color.

Aunque el proceso realizado por el cerebro humano para percibir e interpretar el color es un fenómeno fisiológico-psicológico se entiende completamente, la naturaleza física del color de un ser expresado de manera formal con el apoyo de los resultados experimentales y teóricos.

El contenido de una imagen digital son píxeles o puntos de colores. Para comprender de qué color es, en primer lugar tenemos que pensar acerca de la luz. La luz es un tipo de radiación electromagnética. Otros tipos de radiación electromagnética son AM y radio FM, Wi-Fi, Bluetooth, microondas, infrarrojos y radiografías. Aunque pueda parecer extraño al principio, todos estos son el mismo tipo de cosas; radiación electromagnética. La única diferencia entre ellos es su longitud de onda. Los seres humanos son capaces de ver la radiación electromagnética que tiene una longitud de onda de aproximadamente 400 a 700 nanómetros (nm) como colores. Otros animales son capaces de sentir diferentes partes del espectro

electromagnético y, por tanto, son capaces de ver los diferentes colores que los humanos no pueden ver. Otras longitudes de onda son detectadas por los humanos, pero de diferentes maneras; por ejemplo, la luz infrarroja se detecta en forma de calor [28].

El color es un fenómeno perceptual relacionado con la respuesta humana a diferentes longitudes de onda del espectro visible (400 - 700 nm). Esto se debe a que existen tres tipos de sensores en el ojo que tienen una respuesta relativa diferente de acuerdo a la longitud de onda. Esta combinación de tres señales da la sensación de toda la gama de colores que percibimos.

RGB

Esta representación del color en el formato RGB es por lo general representa gráficamente en un sistema cartesiano análoga a $[x, y, z]$ [29]. un modelo de color aditivo, cuanto más rojo, verde y azul se agregue, más se parecerá el color al blanco (figura 3.16), cuando se mezcla la misma cantidad de rojo, verde y azul, siempre se obtiene un gris neutro, para oscurecer un color, debe quitar la misma cantidad de los tres colores.

El valor de cada "canal" (rojo, verde o azul) puede ir desde 0 (sin color) hasta 255 (color con la máxima saturación).

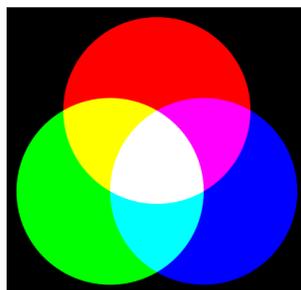


Figura 3-16. RGB de una imagen.

HLS

Muchas personas consideran el modelo de color HLS (figura 3.17) más intuitivo porque define los colores en función del matiz, la claridad (o luminosidad) y la saturación. El modelo de color HSV, fue creado por Alvy Ray Smith (1978) [30].

Para especificar un color, puede seleccionar su matiz en un espectro de arco iris, seleccionar su saturación (la pureza del color) y establecer su luminosidad (de claro a oscuro).

El rojo vivo es un color brillante muy saturado.

Los tonos pastel, como el rosa claro, son menos saturados.

El matiz se especifica en grados (de 0 a 360 grados) y la saturación y la claridad se especifican en porcentajes de 0 hasta 100 por ciento. Todo color HLS con cero saturaciones es un gris neutro.



Figura 3-17. Modelo HLS.

CMYK

Se basa en los tres colores primarios: cian, magenta y amarillo (ver figura 3.18). Éstos se denominan colores sustractivos porque cuanto más color se agrega, más se acerca al negro. Es necesario agregar negro (K) para lograr una gama más completa de colores impresos. Muchas combinaciones distintas de cian, magenta, amarillo y negro pueden definir el mismo color.

La definición de un gris neutro en CMYK puede resultar complicada (por ejemplo, siempre se suele necesitar más cian que los otros colores) y variará en función del dispositivo de salida.



Figura 3-18. Modelo CMYK.

Convertir desde RGB a HLS

Los valores (R, G, B) deben ser expresados como números del 0 al 1. MAX equivale al máximo de los valores (R, G, B) , y MIN equivale al mínimo de esos valores. La fórmula puede ser escrita con las ecuaciones 3.11, 3.12 y 3.13

$$H = \begin{cases} 0, & \text{if } MAX = MIN \\ \left(60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360\right) \bmod 360, & \text{if } MAX = R \\ 60 \times \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120, & \text{if } MAX = G \\ 60 \times \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240, & \text{if } MAX = B \end{cases} \quad 3.11$$

$$L = \frac{1}{2}(MAX + MIN) \quad 3.12$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{if } MAX = MIN \\ \frac{MAX - MIN}{MAX + MIN} = \frac{MAX - MIN}{2L}, & \text{if } L \leq \frac{1}{2} \\ \frac{MAX - MIN}{2 - (MAX + MIN)} = \frac{MAX - MIN}{2 - 2L}, & \text{if } L \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad 3.13$$

Convertir RGB a CMY

En las ecuaciones 3.14, 3.15 y 3.16 se puede observar la relación para convertir el valor RGB a CMY.

$$C = 1 - \left(\frac{R}{255}\right) \quad 3.14$$

$$M = 1 - \left(\frac{G}{255}\right) \quad 3.15$$

$$Y = 1 - \left(\frac{B}{255}\right) \quad 3.16$$

Convertir CMYK a RGB

Los valores R, G, B se dan en el rango de 0...255.

El (R) de color rojo se calcula desde el cian (C) y negro (K) (ecuación 3.17)

$$R = (255)(1 - C)(1 - K) \quad 3.17$$

El color verde (G) se calcula a partir del magenta (M) y negro (K) (ecuación 3.18)

$$G = (255)(1 - M)(1 - K) \quad 3.18$$

El color azul (B) se calcula desde el amarillo (Y) y negro (K) (ecuación 3.19):

$$B = (255)(1 - Y)(1 - k) \quad 3.19$$

3.3.3. Tratamiento de imágenes

Convolución.

Las técnicas o filtros en el dominio espacial operan directamente sobre los píxeles de la imagen. Operan en la vecindad de los píxeles, generalmente mediante una máscara cuadrada o rectangular. Una máscara es una pequeña imagen que consiste de una serie de valores predeterminados para cada posición. Es necesario seleccionar el tamaño de una máscara adecuada que se aplica a la imagen y calcular el valor del elemento central de la máscara como la suma de los productos de entre los valores contenidos en la vecindad de la máscara y los de la imagen original [31].

Es un dominio de matemáticos. La mayoría de los filtros usan una matriz de convolución (figura 3.19). Con el filtro matriz de convolución, si tiene imaginación, puede crear filtros personalizados.

¿Qué es una matriz de convolución? Es posible hacerse una idea sin usar las herramientas matemáticas que solo conocen unos pocos. Convolución es el tratamiento de una matriz por otra que se llama “kernel”.

El filtro matriz de convolución usa una primera matriz que es la imagen que será tratada. La imagen es una colección bidimensional de píxeles en coordenada rectangular. El kernel usado depende del efecto deseado.

GIMP usa matrices 5x5 o 3x3. Se considerarán sólo las matrices 3x3, son las más usadas y son suficiente para los efectos deseados. Si todos los valores del borde de un kernel se seleccionan a cero, el sistema la considerará como una matriz 3x3.

El filtro examina, sucesivamente, cada píxel de la imagen. Para cada uno de ellos, que se llamará “píxel inicial”, se multiplica el valor de este píxel y los valores de los 8 circundantes por el valor correspondiente del kernel. Entonces se añade el resultado, y el píxel inicial se regula en este valor resultante final.

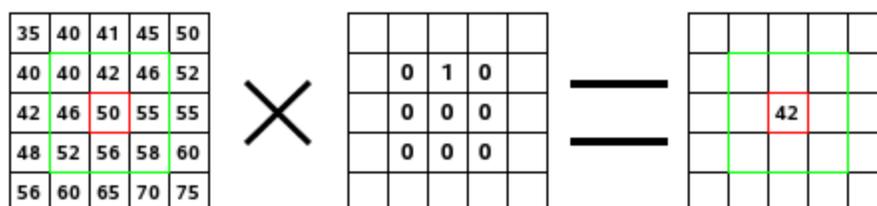


Figura 3-19. Ejemplo de matriz de convolución.

El procesamiento digital de imágenes es el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información.

Binarización.

Una imagen binaria es una imagen digital que tiene únicamente dos valores posibles para cada píxel. Normalmente, los colores utilizados para su representación son negro y blanco, aunque puede usarse cualquier pareja de colores. Uno de los colores se emplea como fondo y el otro para los objetos que aparecen en la imagen.

Para binarizar primero convertir la imagen a escala de grises mediante el promedio de las 3 gamas de colores ecuación 3.20.

$$B = \frac{R + G + B}{3} \quad 3.20$$

Donde

- R= es el valor de rojo en el píxel

- G = es el valor de verde en el pixel
- B = es el valor del azul en el pixel

Se pone un umbral X (ecuación 3.21a y 3.21b) este valor binarizará la imagen a solo 2 colores.

$$\text{if } B \leq X, \quad \text{Nuevo color} = 255 \quad 3.21a$$

$$\text{else,} \quad \text{Nuevo color} = 0 \quad 3.21b$$

En la figura 3.20, se le hace el proceso descrito anteriormente los resultados se observan en la figura 3.21.



Figura 3-20. Imagen original.



Figura 3-21. Imagen binarizada.

La binarización reduce e la información de una imagen digital a dos valores: 0 (negro) y 255(blanco). Al comparar cada pixel de la imagen con un determinado umbral (valor límite que determina si un pixel será de color blanco o negro). Los valores de los pixeles en imagen que sean mayores o iguales que el umbral toman un valor 255 (blanco), el resto de pixeles toman valor 0 (negro).

Negativo

En la edición digital de imágenes se llama inversión de un color a la determinación del color opuesto en ese modelo de color (figura 3.21). Es una operación que afecta a cada pixel, independiente de su vecindad. La imagen inversa puede ser imaginada como "la inversa" o como el "negativo" de una imagen.

En el caso del modelo de color RGB se determina el valor inverso de un color restando del valor máximo el valor del color original.

Para este caso a 255 se le resto el valor de RGB resultante para el pixel (ecuación 3. 22a, 3.22b y 3.22c)

$$\text{Nuevo tono de rojo} = 255 - R \quad 3.22a$$

$$\text{Nuevo tono de verde} = 255 - G \quad 3.22a$$

$$\text{Nuevo tono de azul} = 255 - B \quad 3.22a$$



Figura 3-22. Imagen en negativo de la figura 3.12.

Con este filtro las áreas oscuras se vuelven claras, y las claras, oscuras. Las tonalidades se reemplazan por sus colores complementarios.

Filtro pasa bajas.

El filtro paso bajo “guarda” los componentes de menor frecuencia de una imagen, mientras que los componentes de frecuencia mayor los rechaza.

La frecuencia de corte del filtro está determinada por el tamaño de la máscara del filtro y de los coeficientes. La suma es posteriormente normalizada, así los coeficientes representan un porcentaje de contribución de cada píxel al nuevo píxel.

Mascara utilizada para el paso bajo (figura 3.23).

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Figura 3-23. Mascara filtro pasa bajas.

Para este caso:

1. Se posiciona en el pixel a cambiar
2. Se toma el valor RGB de los pixeles en el vecindario, para este caso calcule la media de las 3 bandas (ecuaciones 3.23a, 3.23b y 3.23c).

$$R_{promedio} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9)}{9} \quad 3.23a$$

$$G_{promedio} = \frac{(G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 + G_7 + G_8 + G_9)}{9} \quad 3.23b$$

$$B_{promedio} = \frac{(B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9)}{9} \quad 3.23c$$

3. Los nuevos valores del pixel calculados se ponen en el pixel central.

*Nótese que la máscara no es usada en los extremos de la imagen por falta de elementos.



Figura 3-24. Imagen resultante de la figura 3.20 con un filtro pasa bajas.

Los filtros pasa bajas reducen el ruido de un imagen, aunque también al momento de tratar la imágenes se llega a notar un tipo de desenfoque de las imágenes, se llega a perder un poco el contorno de la imagen.

Filtro pasa altas

Es un filtro en cuya respuesta en frecuencia se atenúan las componentes de baja frecuencia pero no las de alta frecuencia.

En la figura 3.25 se observa la máscara utilizada para el pasa altas.

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Figura 3-25. Mascara filtro pasa altas.

Al tratar la imagen considere un umbral dentro del cual si el pixel a tratar no tenía una variación muy marcada respecto a sus vecinos dejaba pasar el pixel en tono de gris para que esta información no se viera perdida.

Respeto a la máscara la fórmula utilizada es la ecuación 3.24.

$$P_n = -(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9) + (P_5 \times 8) \quad 3.24$$

La ecuación 3.24 da un peso mayor al pixel 5 el cual es el punto central de máscara, pero puede que los pixeles con el signo negativo lleguen a ser en suma mayor que el punto central o con valores mayores a 255 el cual es el valor mayor que puede tener el pixel, lo cual dará un pixel con un valor fuera del rango, esto debe evitarse para ello se pone una condición en este caso, las ecuaciones 3.25a y 3.25b muestran estas condiciones.

$$\text{if } P_n \geq -12 \ \&\& \ P_n \leq 12 \ || \ P_n \geq 256, \quad \text{Nuevo color} = P_5 \quad 3.25a$$

$$\text{else,} \quad \text{Nuevo color} = P_n \quad 3.25b$$

Donde

- P_1 hasta P_9 son la suma del (R+G+B)/3 de su respectivo pixel en el vecindario o máscara.

El valor de P_5 o P_n se le agrega a R, G y B, de modo que la imagen será en un tono gris resaltando los bordes (figura 3.26).



Figura 3-26. Imagen resultante de la figura 3.12 con un filtro pasa altas.

Este filtro realza los bordes de las imágenes, pero tiene problemas al realizar esto con imágenes las cuales cuentan con demasiado ruido, en ellas detecta este ruido como bordes potenciales de la imagen, por lo cual los llega a realzar y así se pierde o distorsiona mucha de la información de la imagen.

El aumento de bordes es generalmente el primer paso en la detección y clasificación de objetos. Los procesos de aumento de bordes reducen una imagen en los bordes de sus objetos. Los bordes aparecen como líneas brillantes.

Escala de grises.

En computación una escala de grises es una escala empleada en la imagen digital en la que el valor de cada píxel posee un valor equivalente a una graduación de gris. Las imágenes representadas de este tipo están compuestas de sombras de grises,

Para este caso se calculó el gris mediante la ecuación 3.26.

$$G = \frac{R + G + B}{3} \quad 3.26$$

Donde

- R es el valor del rojo en el RGB.
- G es el valor del verde en el RGB.
- B es el valor del azul en el RGB.

Los 3 valores R, G y B serán sustituidos por el valor de G formando un nuevo píxel (figura 3.27).



Figura 3-27. Imagen resultante de la figura 3.12 a escala de grises.

Al ser un promedio de los tres colores de la banda RGB no se pierde información de la imagen ni se genera una mayor calidad de esta misma.

Filtro de Moda.

La moda es el valor que tiene mayor frecuencia absoluta. Se representa por M_o . Se puede hallar la moda para variables cualitativas y cuantitativas.

Ejemplo. Hallar la moda de la distribución:

- 2, 3, 3, 4, 4, 4, 5, 5
- $M_o = 4$

Si en un grupo hay dos o varias puntuaciones con la misma frecuencia y esa frecuencia es la máxima, la distribución es bimodal o multimodal, es decir, tiene varias modas.

- 1, 1, 1, 4, 4, 5, 5, 5, 7, 8, 9, 9, 9
- $M_o = 1, 5, 9$

Cuando todas las puntuaciones de un grupo tienen la misma frecuencia, no hay moda.

- 2, 2, 3, 3, 6, 6, 9, 9

Si dos puntuaciones adyacentes tienen la frecuencia máxima, la moda es el promedio de las dos puntuaciones adyacentes.

- 0, 1, 3, 3, 5, 5, 7, 8
- $M_o = 4$

Se utiliza el pixel que está de moda, es decir el pixel que más se repite en la parte de la imagen donde está ubicada la máscara.

La ecuación 3.27 se puede observar la manera de calcular la moda.

$$M_o = L_i + \frac{f_i - f_{i-1}}{(f_i - f_{i-1}) + (f_i - f_{i+1})} \cdot a_i \quad 3.27$$

Donde

- L_i es el límite inferior de la clase modal.

- f_i es la frecuencia absoluta de la clase modal.
- f_{i-1} es la frecuencia absoluta inmediatamente inferior a la clase modal.
- f_{i+1} es la frecuencia absoluta inmediatamente posterior a la clase modal.
- a_i es la amplitud de la clase.

La figura 3.28 se observa los resultados obtenidos de filtrar la imagen 3.27 con un filtro moda, se utilizan una máscara de convolución de 3x3 para realizar este filtrado.



Figura 3-28. Imagen resultante de la figura 3.18 con el filtro moda.

Mediana

Es un filtro muy interesante, ya que se clasifican los píxel con cierta intensidad para determinar el valor del píxel filtrado. La forma del filtro es la misma que los filtros normales de la convolución.

Los usos de este filtro aparte de eliminar mucho ruido de la imagen también resuelven discontinuidades de una imagen sin destruir la información general.

Los píxeles que no son similares en valor a sus vecinos serán eliminados; la característica de píxeles muy diferentes es una indicación de que la imagen posee ruido.

La mediana es el valor que se encuentra en el centro de una secuencia ordenada de datos. La mediana no se ve afectada por observaciones extremas en un conjunto de datos. Por ello, cuando se presenta alguna información extrema, resulta apropiado utilizar la mediana, y no la media, para describir el conjunto de datos. Su símbolo es M_e

a) Mediana para datos no agrupados.

Se deben ordenar los datos de forma creciente o decreciente. Para muestras con un número par de observaciones, la mediana es el dato que queda en el centro de dicha ordenación y para muestras con número impar de observaciones la mediana es el promedio de los dos datos centrales [31].

Para muestra con número impar de datos se usa la ecuación 3.28.

$$M_e = X_{\frac{n+1}{2}} \quad 3.28$$

Para muestra con número par de datos se usa la ecuación 3.29.

$$M_e = \frac{X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1}}{2} \quad 3.29$$

b) Mediana para datos agrupados se utiliza la ecuación 3.30.

$$M_e = L_i + \left(\frac{\frac{n}{2} - F_{i-1}}{f_i} \right) \cdot a \quad 3.30$$

Donde

- i es el primer intervalo cuya frecuencia acumulada supera a $\frac{n}{2}$
- L_i es el límite real inferior del intervalo de la mediana.
- n es el número de datos.
- F_{i-1} es la frecuencia acumulada anterior al intervalo de la mediana.
- f_i es la frecuencia absoluta del intervalo de la mediana.
- a es la amplitud del intervalo.

La figura 3.29 muestra los resultados obtenidos de pasar un filtro moda a la imagen 3., se utiliza una máscara de convolución de 3x3 para realizar este filtrado.



Figura 3-29. Imagen resultante de la figura 3-18 con el filtro mediana.

El filtro moda elimina los puntos aislados “ruido” pero sin difuminar tanto los bordes y otros detalles abruptos, correspondientes a las altas frecuencias de la imagen.

FILTRO MINIMO

Se ordenan los datos de forma creciente para clasificar los píxeles según su valor. En este filtro se usa el menor valor del píxel como el nuevo valor filtrado, o sea el menor en la máscara de convolución.

Este filtro también puede denominarse filtro de compresión o erosión porque la aplicación sucesiva del mismo causará una disminución en la intensidad de los bordes de los objetos dentro de una imagen, llegando a desgastarse.

Para calcular el mínimo se hizo lo siguiente:

1. Se ordenaron los 9 píxeles de menor a mayor.
2. Se tomó el primer valor como el valor del nuevo píxel.



Figura 3-30. Imagen resultante de la figura 3-18 con el filtro mínimo.

La aplicación sucesiva de este filtro una disminución en la intensidad de los bordes de los objetos (si los bordes son claros) dentro de una imagen, llegando a desgastarse. Si los bordes son negros los ampliara, en la figura 3.30 se observa que la mochila al ser originalmente de un tono negro se resalta por la acción de este filtro.

FILTRO MÁXIMO

Se ordenan los datos de forma creciente o decreciente para clasificar los píxeles según su valor. En este filtro se usa el mayor valor del píxel como el nuevo valor filtrado. Este filtro también se conoce como filtro de descompresión o expansivo, porque la aplicación sucesiva de estos filtros causa un incremento en la intensidad de los bordes dentro de una imagen, llegando a aumentar de tamaño los bordes.

Para calcular el mínimo se hizo lo siguiente:

1. Se ordenaron los 9 píxeles de menor a mayor.
2. Se tomó el último valor como el valor del nuevo píxel.



Figura 3-31. Imagen resultante del filtro máximo.

La aplicación sucesiva de estos filtros causa un incremento en la intensidad de los bordes (si estos son claros) dentro de una imagen, llegando a aumentar de tamaño los bordes. En la figura 3.31 se observa que los bordes de los globos y de la mochila se aclararon debido a la acción del filtro máximo.

Contraste lineal a pedazos.

Este filtro realiza el contraste de una imagen dependiendo de los puntos que se quieran evaluar, para este caso de la imagen 3.32 se dividió el umbral en 4 partes (ecuación 3.31).

$$CP = \begin{cases} p + 85, & \text{if } 0 \leq p \leq 85 \\ p + 30, & \text{if } 85 < p \leq 170 \\ p + 10, & \text{if } 170 < p \leq 245 \\ p, & \text{if } 245 < p \leq 255 \end{cases} \quad 3.31$$

Donde:

- p es el promedio de las 3 bandas RGB.
- CP es el pixel resultante



Figura 3-32. Imagen resultante de la figura 3-27 con contraste a pedazos.

Esta operación realzo mucho el contraste en los tonos negros de la imagen haciéndolas más claras, en los casos en que la imagen es más uniforme aclaro toda la imagen, haciendo que los detalles de esta misma no se realcen. Este filtro depende de lo que se quiera realzar de la imagen en la figura 3.32 se trató de hacerla un poco más clara, el resultado de la imagen dependerá del umbral o umbrales utilizados.

Ecuación

Los histogramas son la base para numerosas técnicas de procesamiento dominio espacial. Manipulando el histograma se puede utilizar eficazmente para una mejora de las imágenes. Además de proporcionar útiles estadísticas de las imágenes. Los histogramas son fáciles de calcular en software y además se prestan a las implementaciones de hardware económicas, lo que los hace una herramienta popular para el procesamiento de imágenes en tiempo real [32].

El histograma de una imagen es definido como la curva que en ordenadas representa cada uno de los posibles niveles de gris, mostrando en abscisas la frecuencia relativa de aparición del mismo en la imagen.

Un vistazo al histograma ofrece una idea rápida de cuan distribuidos se encuentran los niveles de gris en la imagen, aspecto relacionado con el contraste.

En un histograma muy polarizado en torno a un valor central, y si tiene poco contraste está desaprovechando el margen dinámico, entonces con la ecualización modificamos la luminancia de los píxeles para distribuirlos en forma más uniforme.

Un histograma de una imagen es la distribución de cada nivel de intensidad dentro de la imagen, es decir nos da un estimado de la probabilidad de ocurrencia de cada nivel de gris (r)

$$p(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad 3.32$$

Donde

- $p(r_k)$ es la probabilidad del nivel k.
- n_k es el número de pixeles que toma este valor.
- n es el número total de pixeles en la imagen

En la figura 3.33 se muestra en forma gráfica el histograma de dos imágenes, una a escala de grises y la otra ya ecualizada.

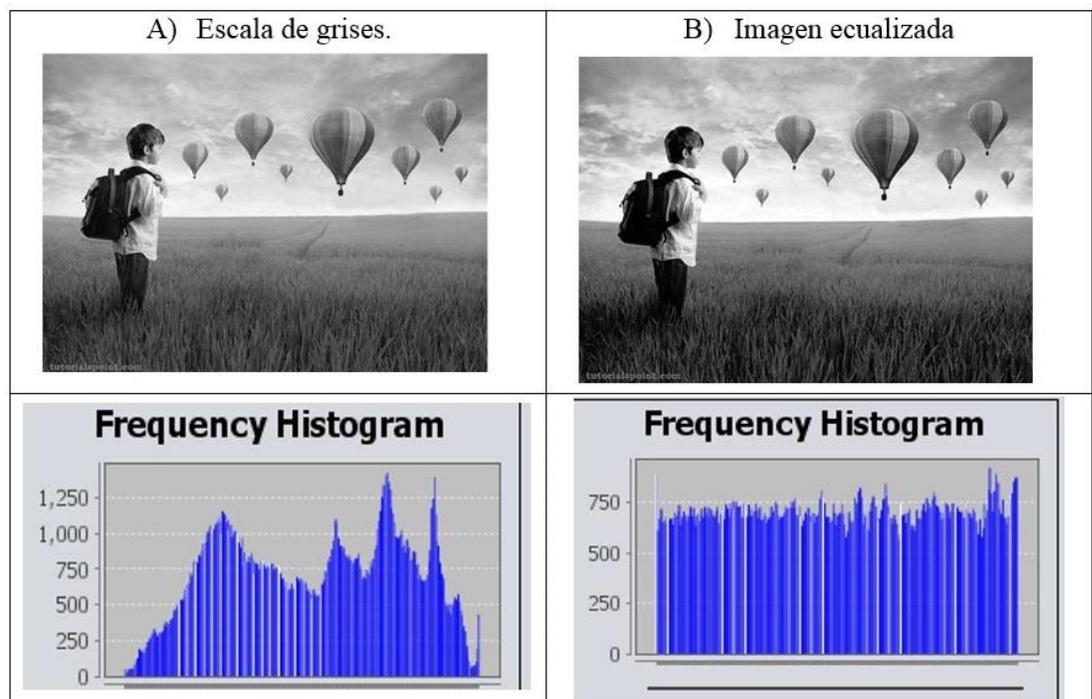


Figura 3-33. Imagen a escala de grises A), imagen ecualizada B) y sus respectivos diagramas de frecuencia.

El histograma nos presenta una descripción global de la imagen y sobre todo nos da una indicación del contraste en la imagen. De aquí que si modificamos el histograma, podemos controlar el contraste en la imagen. Primero asumimos que el nivel de gris de la imagen, r,

es una función continua y normalizada (entre 0 y 1). Deseamos realizar una transformación de forma que a cada nivel de gris r corresponda s (ecuación 3.31).

$$s = T(r) \quad 3.31$$

Esta transformación debe satisfacer lo siguiente (ver fig. 2.9):

- T es una función monofónicamente creciente (mantener el orden).
- $0 \leq T \leq 1$ (mantener el rango).

Podemos considerar las distribuciones de $p(r)$ y $p(s)$ como densidades de probabilidad. Entonces de teoría de probabilidad (ecuación 3.31).

$$p(s) = \left[\frac{p(r)dr}{ds} \right] \quad 3.31$$

Si utilizamos como función de transformación la distribución acumulativa de r (ecuación 3.32).

$$s = T(r) = \int p(r)dr \quad 3.32$$

Entonces, derivando s respecto a r en la ecuación 3.32, obtenemos la ecuación 3.33.

$$\frac{ds}{dr} = p(r) \quad 3.33$$

Y, substituyendo 3.33 en la ecuación 3.31, finalmente llegamos a la ecuación 3.34.

$$p(s) = 1 \quad 3.34$$

De forma que con esta transformación obtenemos una distribución uniforme para el histograma, maximizando así el contraste en la imagen. En el caso discreto, la transformación se convierte en la ecuación 3.35.

$$s(k) = T(r) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n} \quad 3.35$$

Para $k = 0, 1, \dots, N$, donde N es el número de niveles. Esto considera que ambos r y s están normalizados entre cero y uno. Para poner la imagen de salida en otro rango hay que multiplicar por una constante (p. ej., 255.5) y redondear este valor.

Mejora el contraste en los histogramas muy concentrados. Busca el histograma plano. Aprovechando los tonos totales del histograma, que la imagen original no utiliza.

Cada filtro expuesto en este documento, realiza una función muy determinada, realzando la calidad de la imagen o disminuyéndola, estos factores dependen mucho de la imagen, por lo cual es necesario primero analizar en la imagen a filtrar que mejorar o que es lo que se quiere resaltar de esta misma.

Por ejemplo si se trata a una imagen con ruido un filtro pasa bajas, si el ruido es negro en una imagen clara este ruido aumentara, por lo que no sería muy recomendable hacer esta operación, para esto es más recomendable utilizar un filtro mediana el cual como se observa en el documento ayuda a quita el ruido de la imagen. Pero aun tratando la imagen el ruido no desaparecerá del todo.

3.2.4. Detección de bordes.

Es usada en aplicaciones en donde se requiere identificar y localizar discontinuidades en la intensidad de los pixeles de la imagen. A un borde se le conoce como un cambio significativo del valor en escala de grises entre los pixeles adyacentes de una imagen.

Al usar mascarar que detectan los bordes si la suma de los coeficientes es igual a 0. Esto significa que a medida que la máscara pasa sobre regiones de la imagen con valores de brillo constantes (no bordes), el resultado que se produce es 0, lo que representa una pendiente de brillo igual a 0 [33]. En la figura 3.34 se puede observar gráficamente la transición de un nivel de gris a otro.

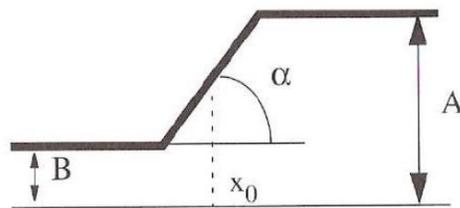


Figura 3-34. Representación del modelo de transición de un nivel de gris a otro.

El nivel B representa un nivel bajo de gris y A un nivel alto, pero además existen varios parámetros, que son de interés:

- Variación de la intensidad: $H = A - B$
- Ángulo de inclinación de la rampa: α
- Coordenada horizontal x_0 donde se encuentra el punto medio de la rampa.

Las técnicas de detección de bordes se pueden clasificar en:

- Operadores de gradiente.
- Múltiples respuestas a diferentes orientaciones.

Las técnicas clásicas de detección de bordes se basan en diferenciar a la imagen, esto es, encontrar la derivada respecto a los ejes x e y , o gradiente [34].

El gradiente de una imagen en un punto indica la variación máxima de la función en ese punto. Se define con la ecuación 3.36:

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_F \\ G_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) \end{bmatrix} \quad 3.36$$

El proceso de determinar si un punto es borde o no lo da si el valor del módulo del gradiente supera o no un valor de umbral dado (ecuación 3.37).

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad 3.37$$

En general el gradiente se suele aproximar mediante la ecuación 3.38.

$$|G| = |G_x| + |G_y| \quad 3.38$$

La ecuación 3.38 es mucho más simple de implementar en la práctica que la ecuación 3.37. Se le conoce como fuerza de borde o contraste de borde que es la diferencia mínima en escala de grises entre el fondo y el borde. Este parámetro puede variar por condiciones de iluminación o por diferencias en las características de la escala de grises.

La primera derivada es positiva para cambio a nivel de gris más claro, negativa en caso contrario y cero en aquellas zonas con nivel de gris uniforme. El valor de la magnitud de la

primera derivada nos sirve para detectar la presencia de bordes. La primera derivada en cualquier punto de la imagen vendrá dada por la magnitud del gradiente.

La segunda derivada presenta valor positivo en la zona oscura de cada borde, valor negativo en la zona clara de cada borde y valor cero en las zonas de valor de gris constante y justo en la posición de los bordes. El signo de la segunda derivada nos indica si el pixel pertenece a la zona clara o a la zona oscura. Además la segunda derivada presenta siempre un cruce por cero en el punto medio de la transición. Esto puede ser muy útil para localizar bordes en una imagen. La segunda derivada vendrá dada por *el operador Laplaciano*.

Las derivadas se pueden implementar digitalmente de varias formas. Todo este cálculo se realiza usando máscaras de píxeles a partir de las cuales se hallan los valores G_x (gradiente por fila) y G_y (gradiente por columna). La magnitud del gradiente puede tomar cualquier valor real y el ángulo cualquier valor real entre 0° y 360° .

En el caso discreto, podemos aproximar la derivada tomando simplemente la diferencia entre dos valores contiguos. Si consideramos una sección de 2x2 de la imagen como:

$$\begin{array}{cc} I_{1,1} & I_{1,2} \\ I_{2,1} & I_{2,2} \end{array} \quad 3.39$$

Una posible aproximación discreta al gradiente en dicha región es (ecuación 3.40a y 3.40b):

$$\frac{\partial}{\partial x} = I_{1,2} - I_{1,1} \quad 3.40a$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = I_{2,1} - I_{1,1} \quad 3.40b$$

Otra posible alternativa para construir el operador de derivada en una máscara de 2x2 es tomar las diferencias cruzadas (ecuación 3.41a y 3.41b)

$$\frac{\partial}{\partial x} = I_{1,1} - I_{2,2} \quad 3.41a$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = I_{1,2} - I_{2,1} \quad 3.41b$$

Operador de Roberts, Operador de Sobel y Operador de Prewitt.

Operadores direccionales: Operadores de Kirsch, Operador de Frei-Chen, Máscaras de Robinson, Extensión de operadores

Los detectores de bordes de la primera derivada, comparan un umbral para determinar si existía o no un punto de borde. Esta aproximación presenta problemas de ruido, falsos negativos y falsos positivos, por ejemplo en forma de puntos sueltos, que no se corresponden con ningún verdadero borde.

Los operadores que utilizan estos métodos no son dependientes de la dirección de los bordes, al contrario que los operadores de la primera derivada. En ciertas aplicaciones, se recomienda utilizar un operador que sea totalmente independiente de la orientación, ya que puede ofrecer evidentes ventajas computacionales. Algunos operadores de la segunda derivada son: Operador Laplace, Operador LoG y Operador DoG.

El Laplaciano de una función $f(x, y)$ se define con la ecuación 3.42:

$$\Delta f = \nabla^2 = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad 3.42$$

El Laplaciano vale cero si $f(x, y)$ es constante o cambia de forma lineal su amplitud. El cambio de signo de la función resultante nos indica que en ese lugar existe un cruce por cero, ya sea un cambio de positivo a negativo o viceversa, y, por lo tanto, hace notar la presencia de un borde. Hay que decir también que, a diferencia del gradiente, el Laplaciano no es un vector.

La principal característica de este operador es la capacidad de localizar los bordes de una forma bastante precisa a través de la determinación del cruce por cero. Se fundamenta en que cuando la imagen presenta un cambio de intensidades bastante relevante a lo largo de una determinada dirección, existirá un máximo en la primera derivada a lo largo de dicha dirección y un paso por cero en la segunda derivada. Al considerar imágenes discretas, es muy poco probable que el paso por cero coincida justamente en un píxel de la imagen. Por este motivo, el borde se suele marcar en aquel píxel que contenga un nivel de gris más próximo a cero, teniendo como vecino, al menos, un píxel con nivel de gris de signo contrario.

Como principales inconvenientes, hay que decir que el operador Laplaciano presenta una gran sensibilidad al ruido por tratarse de un operador que utiliza la segunda derivada. Por este motivo, en muchos casos en lugar de aplicarlo directamente, se realiza primero un suavizado de la imagen que se combina posteriormente con la aplicación del operador. Además, con este operador pueden darse casos de detección de bordes dobles debido a que sus anchuras no siempre son óptimas.

Existen distintas máscaras Laplacianas (figura 3.35) que representan diferentes aproximaciones del operador Laplaciano. A diferencia de las máscaras utilizadas por los operadores de primera derivada, estas son simétricas rotacionalmente, lo que significa que pueden detectar bordes en todas las direcciones del espacio. Se aplican seleccionando primero la máscara y realizando una operación de convolución sobre la imagen. El signo del resultado de dos píxeles adyacentes proporciona información direccional y nos dice que lado del borde es más o menos oscuro.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 3-35. Algunas mascarar Laplacianas.

Normalmente, estos operadores no son utilizados directamente en el ámbito de la Visión Artificial, debido a que cualquier operador que involucre a más de una derivada se verá más afectado por el ruido que un operador que utilice una sola derivada. Para evitar el efecto del ruido, será necesario aplicar primero filtros sobre la imagen de entrada, algo que se analizará en los siguientes apartados

El operador Laplaciano del Gaussiano consiste en aplicar el operador Laplaciano a la imagen una vez que ha sido suavizada con un filtro gaussiano. El operador Laplaciano por sí mismo es bastante sensible al ruido, por lo que es prácticamente imprescindible utilizarlo de forma combinada con un operador de suavizado, en este caso el filtro gaussiano.

Consiste en aproximar el operador LoG mediante un operador diferencia de Gaussianas con distintas desviaciones estándar denominado DoG (“Difference of Gaussians”).

El inconveniente más importante de este operador es que, además del elevado coste computacional que conlleva, tiene un comportamiento bastante pobre en regiones donde intersectan bordes con diferentes orientaciones, deformándose las esquinas y desconectándose bordes.

Otros problemas que puede presentar el operador DoG son:

- La influencia del ruido todavía es considerable debido a que se utiliza la segunda derivada.
- La generación de contornos cerrados en el proceso de detección no siempre es realista.
- El operador DoG marca puntos considerados como ejes en ciertas localizaciones donde no existen bordes.

En 1986, Canny propuso un método para la detección de bordes que ofrecía mejores resultados que otros métodos aunque presentaba una mayor complejidad computacional [35].

El método de Canny se basa en tres criterios principales:

- El criterio de detección, que expresa el hecho de evitar la eliminación de bordes importantes así como no suministrar falsos bordes.
- El criterio de localización, que establece que la distancia entre la posición real y la posición localizada para el borde debe ser minimizada.
- El criterio de respuesta única, que establece la necesidad de que el detector retorne un único punto por cada punto de borde verdadero.

El algoritmo de Canny consta de tres grandes pasos:

1 - Obtención del gradiente:

Para la obtención del gradiente, lo primero que se realiza es la aplicación de un filtro gaussiano a la imagen original con el objetivo de suavizar dicha imagen y conseguir la eliminación del ruido que pueda existir. Sin embargo, hay que tener cuidado de no aplicar un

suavizado excesivo, puesto que se podrían perder ciertos detalles de la imagen y provocar que el resultado final no fuese el esperado. Este suavizado se obtiene promediando los valores de intensidad de los píxeles del entorno de vecindad con una máscara de convolución.

Una vez que se suaviza la imagen, para cada píxel se obtiene la magnitud y módulo (orientación) del gradiente, obteniendo así dos imágenes.

2 – Supresión no máxima al resultado del gradiente:

Las dos imágenes generadas en el paso anterior sirven de entrada para generar una imagen con los bordes adelgazados. El procedimiento es el siguiente: se consideran cuatro direcciones identificadas por las orientaciones de 0° , 45° , 90° y 135° con respecto al eje horizontal. Para cada píxel se encuentra la dirección que mejor se aproxime a la dirección del ángulo de gradiente.

Posteriormente se observa si el valor de la magnitud de gradiente es más pequeño que al menos uno de sus dos vecinos en la dirección del ángulo obtenida en el paso anterior. De ser así, se asigna el valor 0 a dicho píxel, en caso contrario se asigna el valor que tenga la magnitud del gradiente.

La salida de este segundo paso es una imagen con los bordes adelgazados después de realizarse la supresión no máxima de puntos de borde.

3 – Histéresis de umbral a la supresión no máxima

La imagen que ha sido obtenida en el paso anterior suele contener máximos locales creados por el ruido. Una solución para eliminar dicho ruido es la denominada histéresis del umbral.

El proceso de histéresis consiste en tomar la imagen obtenida en el paso anterior, obtener la orientación de los puntos de borde de la imagen y tomar dos umbrales de forma que el primero sea más pequeño que el segundo. Para cada punto de la imagen se debe localizar el siguiente punto de borde no explorado que sea mayor que el segundo valor de umbral. A partir de dicho punto, se siguen las cadenas de máximos locales conectados en ambas direcciones perpendiculares a la normal del borde siempre que sean mayores que el primer valor de umbral. De esta forma, se marcan todos los puntos explorados y se almacena la lista de todos los puntos en el contorno conectado. Es de este modo como se logra eliminar, con

este paso, las uniones en forma de Y de los segmentos que confluyen en un determinado punto.

Principal ventaja su gran adaptabilidad para poder ser aplicado a diversos tipos de imágenes, además de no disminuir su rendimiento ante la presencia de ruido en la imagen original.

Desventaja el hecho de que al realizar el suavizado de la imagen se pueden difuminar ciertos bordes aunque con eso se consiga reducir el ruido.

Filtro Prewitt.

Se utiliza en el procesamiento de imágenes, en particular dentro de detección de bordes algoritmos. Técnicamente, es un operador de diferenciación discreta, calcular una aproximación del gradiente de la función de intensidad de la imagen. En cada punto en la imagen, el resultado del operador de Prewitt es o bien el vector gradiente correspondiente o la norma de este vector. El operador Prewitt se basa en la convolución de la imagen con un pequeño filtro, separable, y valor entero en direcciones horizontales y verticales y por lo tanto es relativamente barato en términos de cálculos. Por otra parte, la aproximación del gradiente que se produce es relativamente crudo, en particular para las variaciones de alta frecuencia en la imagen. El operador de Prewitt fue desarrollado por Judith MS Prewitt [36].

El operador calcula el gradiente de la intensidad de la imagen en cada punto, dando la dirección del mayor incremento posible de claro a oscuro y la tasa de cambio en esa dirección. El resultado muestra cómo "bruscamente" o "suavemente" los cambios de imagen en ese punto, y por lo tanto, cuán probable es que parte de la imagen representa un borde, así como la forma es probable que sea orientada ese borde.

Matemáticamente, el gradiente de una función de dos variables (en este caso la función de intensidad de la imagen) es en cada punto de una imagen de 2D vector con los componentes dados por los derivados en las direcciones horizontal y vertical. En cada punto de la imagen, los puntos de gradiente de vector en la dirección de mayor aumento de intensidad posible, y la longitud del vector de gradiente corresponde a la tasa de cambio en

esa dirección. Esto implica que el resultado del operador Prewitt en un punto de imagen que está en una región de intensidad de la imagen constante es un vector de cero y en un punto en un borde es un vector que apunta a través del borde, de más oscuro a los valores más brillantes.

Matemáticamente, el operador utiliza dos 3×3 núcleos que se convolucionada con la imagen original para calcular aproximaciones de los derivados - uno para los cambios horizontales, y uno para vertical. Si definimos A como la imagen de origen, G_x y G_y son dos imágenes que contienen en cada punto de las aproximaciones derivados horizontales y verticales, estos últimos se calcula con las ecuaciones 3.43a y 3.43b

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times A \quad 3.43a$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times A \quad 3.43b$$

La coordenada x se define aquí como el aumento en la dirección "correcta", y la coordenada y se define como el aumento en la dirección "abajo". En cada punto en la imagen, las aproximaciones de gradiente resultantes se pueden combinar para dar la magnitud del gradiente, usando la ecuación 3.37

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad 3.37$$

Con esta información, también puede calcular la dirección del gradiente (ecuación 3.44)

$$\theta = \text{atan2}(G_y, G_x) \quad 3.44$$

Utilizando las máscaras de las ecuaciones 3.43a y 3.43b y utilizando en gradiente de la ecuación 3.37 se obtiene la imagen 3.36.

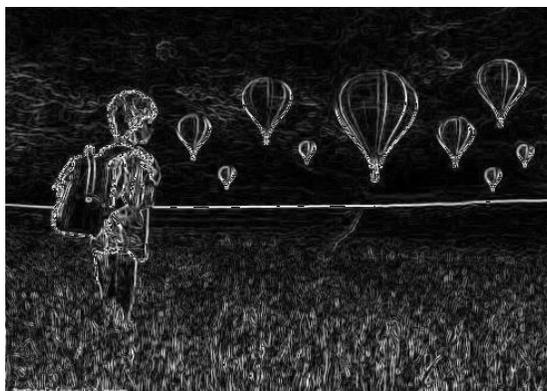


Figura 3-36. Imagen con filtro Prewitt.

Estas mascarar por si solas no detectan todos los contornos que la imagen contiene, necesitan un complemento para poder detectar más los bordes más pronunciados que la imagen contiene, se deben unir uno o más de estas mascarar para tener un resultado que sea mayormente eficiente.

Los valores negativos en la convolución de acuerdo a su orientación son los que detectan estos bordes.

Filtro Sobel.

El operador Sobel es utilizado en procesamiento de imágenes, especialmente en algoritmos de detección de bordes. Técnicamente es un operador diferencial discreto que calcula una aproximación al gradiente de la función de intensidad de una imagen. Para cada punto de la imagen a procesar, el resultado del operador Sobel es tanto el vector gradiente correspondiente como la norma de éste vector.

El operador Sobel calcula el gradiente de la intensidad de una imagen en cada punto (píxel). Así, para cada punto, este operador da la magnitud del mayor cambio posible, la dirección de éste y el sentido desde oscuro a claro. El resultado muestra cómo de abruptamente o suavemente cambia una imagen en cada punto analizado y, en consecuencia, cuán probable es que éste represente un borde en la imagen y, también, la orientación a la que tiende ese borde. En la práctica, el cálculo de la magnitud -probabilidad de un borde- es más fiable y sencillo de interpretar que el cálculo de la dirección y sentido.

Matemáticamente, el gradiente de una función de dos variables (en este caso, la función de intensidad de la imagen) para cada punto es un vector bidimensional cuyos componentes están dados por las primeras derivadas de las direcciones verticales y horizontales. Para cada punto de la imagen, el vector gradiente apunta en dirección del incremento máximo posible de la intensidad, y la magnitud del vector gradiente corresponde a la cantidad de cambio de la intensidad en esa dirección.

Lo dicho en los párrafos anteriores implica que el resultado de aplicar el operador Sobel sobre una región con intensidad de imagen constante es un vector cero, y el resultado de aplicarlo en un punto sobre un borde es un vector que cruza el borde (perpendicular) cuyo sentido es de los puntos más oscuros a los más claros.

El operador Sobel calcula el gradiente de la intensidad de una imagen en cada punto (píxel). Así, para cada punto, este operador da la magnitud del mayor cambio posible, la dirección de éste y el sentido desde oscuro a claro. El resultado muestra cómo de abruptamente o suavemente cambia una imagen en cada punto analizado y, en consecuencia, cuán probable es que éste represente un borde en la imagen y, también, la orientación a la que tiende ese borde. En la práctica, el cálculo de la magnitud -probabilidad de un borde- es más fiable y sencillo de interpretar que el cálculo de la dirección y sentido.

Matemáticamente, el gradiente de una función de dos variables (en este caso, la función de intensidad de la imagen) para cada punto es un vector bidimensional cuyos componentes están dados por las primeras derivadas de las direcciones verticales y horizontales. Para cada punto de la imagen, el vector gradiente apunta en dirección del incremento máximo posible de la intensidad, y la magnitud del vector gradiente corresponde a la cantidad de cambio de la intensidad en esa dirección.

Lo dicho en los párrafos anteriores implica que el resultado de aplicar el operador Sobel sobre una región con intensidad de imagen constante es un vector cero, y el resultado de aplicarlo en un punto sobre un borde es un vector que cruza el borde (perpendicular) cuyo sentido es de los puntos más oscuros a los más claros.

Matemáticamente, el operador utiliza dos kernels de 3×3 elementos para aplicar convolución a la imagen original para calcular aproximaciones a las derivadas, un kernel para los cambios horizontales y otro para las verticales. Si definimos A como la

imagen original, el resultado, que son las dos imágenes G_x y G_y que representan para cada punto las aproximaciones horizontal y vertical de las derivadas de intensidades, es calculado con la ecuación 3.45a y 3.45b:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times A \quad 3.45a$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \times A \quad 3.45b$$

En cada punto de la imagen, los resultados de las aproximaciones de los gradientes horizontal y vertical pueden ser combinados para obtener la magnitud del gradiente, usando la ecuación 3.37

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad 3.37$$

Utilizando las máscaras de las ecuaciones 3.45a y 3.45b y utilizando en gradiente de la ecuación 3.37 se obtiene la imagen 3.37.

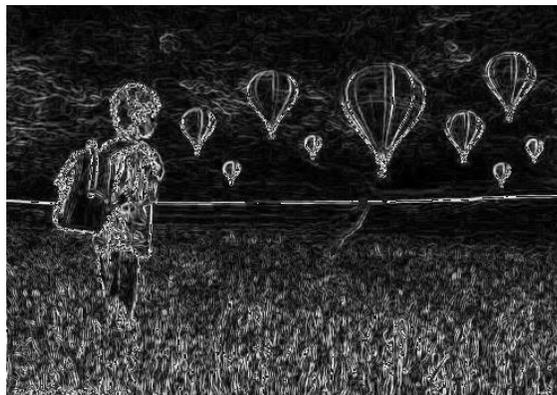


Figura 3-37. Imagen con filtro Sobel.

Filtro Robert.

El operador cruz Roberts se utiliza en el procesamiento de imágenes y visión por computadora para la detección de bordes. Fue uno de los primeros detectores de bordes y fue propuesto inicialmente por Lawrence Roberts en 1963. Como operador diferencial, la idea detrás del operador cruz Roberts es aproximar el gradiente de una imagen a través de la diferenciación discreta que se consigue mediante el cálculo de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los píxeles adyacentes diagonalmente [37].

Según Roberts, un detector de bordes debe tener las siguientes propiedades: los bordes producidos deben ser bien definidos, el fondo debe contribuir el menor ruido posible, y la intensidad de los bordes debe corresponder lo más cerca posible de lo que un ser humano pueda percibir. Con estos criterios en mente y sobre la base de la teoría psicofísica vigente en ese momento Roberts propuso las ecuaciones 3.46a y 3.46b.

$$y_{i,j} = \sqrt{x_{i,j}} \quad 3.46a$$

$$z_{i,j} = \sqrt{(y_{i,j} - y_{i+1,j+1})^2 + (y_{i+1,j} - y_{i,j+1})^2} \quad 3.46b$$

Donde

- x es el valor de intensidad inicial en la imagen
- z es la derivada calculada
- i, j representa la ubicación en la imagen.

Los resultados de esta operación pondrán de relieve cambios en la intensidad en una dirección diagonal. Uno de los aspectos más atractivos de esta operación es su simplicidad; el núcleo es pequeño y sólo contiene números enteros. Sin embargo, con la velocidad de las computadoras de hoy esta ventaja es insignificante y la cruz Roberts sufre en gran medida de la sensibilidad al ruido.

Con el fin de realizar la detección de borde con el operador Roberts que primero convoluciona la imagen original, con las siguientes dos núcleos (ecuación 3.47a y 3.47b)

$$G_x(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad 3.47a$$

$$G_y(x, y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad 3.47b$$

Dejar $I(x, y)$ de ser un punto en la imagen original y $G_x(x, y)$ es un punto en una imagen formada por convolución con el primer núcleo y $G_y(x, y)$ es un punto en una imagen formada por convolución con el segundo núcleo. El gradiente puede entonces ser definida con la ecuación 3.48:

$$\nabla I(x, y) = G(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad 3.48$$

Utilizando las máscaras de las ecuaciones 3.47a y 3.47b y utilizando en gradiente de la ecuación 3.48 se obtiene la imagen 3.38.



Figura 3-38. Imagen con filtro Robert.

Capítulo 4.

Metodología.

4.1. Termografía.

La termografía es una técnica que permite calcular y determinar temperaturas a distancia, con exactitud y sin necesidad de contacto físico con el objeto. Permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético, utilizando cámaras termográficas.

La comparación de las temperaturas (correlación temperatura) obtenidos por los instrumentos de medición y por simulación térmica es necesaria. Actualmente la forma en que los mapas térmicos se obtienen por termógrafo infrarrojo produce resultados imprecisos ya que los valores de emisividad de todos los elementos se ignoran y método de medición asume una emisividad constante. Sin los ajustes correctos de emisividad en termógrafo infrarrojo, la variación de la temperatura podría alcanzar hasta tan alto como 300%. El recubrimiento de pintura negro sobre la superficie de CI es un método ampliamente utilizado para asumir la IC con emisividad constante y simplificar los procedimientos de medición [38].

Para tener una buena medición de con la cámara térmica es necesario tener en cuenta datos de las condiciones del entorno así como las características de las superficies termografiadas. A continuación se mencionan los datos más importantes que se deben tomar en cuenta.

- Datos de las condiciones del entorno
 - Humedad y temperatura del aire
 - Distancia a objeto termografiado
 - Temperatura reflejada
 - Radiación incidente
- Características de las superficies termografiadas.
 - Emisividad

Teniendo en cuenta estos datos al convierte la energía radiada detectada por la cámara termográfica en valores de temperaturas, estos valores serán adecuados.

La emisividad es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura. Es razón entre la intensidad emitida por la superficie en una dirección particular y la intensidad que sería emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda. Cuanto más pequeño sea el valor de la emisividad, mejor aislante por reflexión será dicha superficie, siendo 1 el valor máximo, la ecuación 4.1, establece la relación de la emisividad.

$$\varepsilon = \frac{\textit{Radiación emitida por la superficie}}{\textit{Radiación emitida si fuera un cuerpo negro}} \quad 4.1$$

Un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. Las intensidades de las diferentes longitudes de onda emitidas por un cuerpo negro dependen de su temperatura. A temperatura normal, un cuerpo negro no refleja ninguna luz y por ende, aparece totalmente negro.

Hay tablas de emisividad disponibles para varios tipos de materiales, algunas cámaras térmicas incluyen por default emisividad para estos materiales, un ejemplo de esto se observa en la tabla 4.1.

Tabla 4-1. Emisividad de algunos materiales.

Material	Emisividad (ϵ)
Cuerpo negro	1
Piel humana	0.98
Agua	0.95
Amianto	0.95
Cerámica	0.95
Barro	0.95
Cemento	0.95
Tejido	0.95
Grava	0.95
Papel	0.95
Plástico	0.95
Goma	0.95
Madera	0.95
Cobre(oxidado)	0.68
Acero inoxidable	0.1
Cobre pulido	0.02
Aluminio (pulido)	0.05

La cámara termográfica registra la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y la convierte en una imagen visible. El espectro infrarrojo nuestros ojos no lo detectan, los ojos están diseñados para detectar la radiación electromagnética en el espectro de luz visible (fig 4.1), la fuente principal de radiación de infrarrojos es el calor o la radiación térmica. Cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto emite radiación en la región infrarroja.

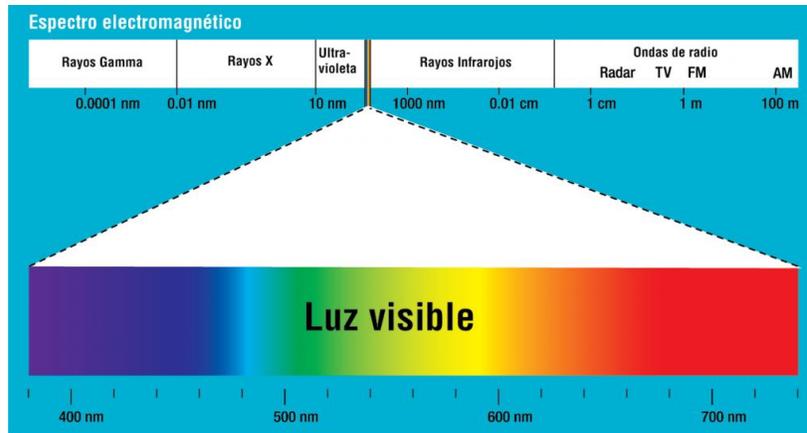


Figura 4-1. Espectro electromagnético.

Para tomar una imagen térmica de manera adecuada, además de los aspectos mencionados anteriormente, se deben de tomar en cuenta lo siguiente. Encuadre de la imagen, debe de presentar el objeto bien visible y en la posición que dé más información, acercándose todo lo que se pueda y manteniendo una distancia segura. Enfoque, una imagen desenfocada dará medidas erróneas. Ajuste del rango de la temperatura, se debe fijar el rango de medida que incluya lo que se pretende medir. Condiciones meteorológicas, la temperatura exterior cambiante, la hora a la que se realiza la inspección termográfica pueden hacer que esta y sus resultados varíen.

4.2. Cámara termográfica e imágenes térmicas.

El control de la temperatura se realiza, en la mayoría de los casos, usando sensores ópticos (fig. 4.2), estos son colocados para tomar la lectura de la temperatura en la pieza solamente, el sensor óptico mide únicamente el área que suele marcarse con indicadores laser. Esta técnica es adecuada para los metales de calefacción como el acero y para temperaturas superiores a 600 grados Celsius, ya que el acero emite radiación de luz de alta, y el tiempo de calentamiento es muy corto, lo que provoca un calentamiento bastante uniforme. Cuando el calentamiento de una pieza de trabajo no magnético con una resistividad comparable a la resistividad del cobre en los arrollamientos de la bobina, la eficacia es baja [39].



Figura 4-2. Sensor óptico.

En el aluminio, al calentarlo, este no emiten suficiente radiación para que el sensor óptico adquiriera una temperatura correcta, y el calentamiento de la barra es progresiva desde el exterior hacia el interior, por lo que puede suceder que la superficie este a una temperatura de 500 °C y el centro de la barra es a 300° C.

Se requiere poner en práctica un control inteligente, el cual en base a la lectura de temperatura en tres puntos diferentes, toma decisiones diferentes para transmitir adecuadamente la potencia de la bobina de inducción a la barra de aluminio por medio del inversor. Para ello se decidió utilizar la cámara termográfica Fril de la serie t (fig. 4.3). La cámara termográfica permite visualizar clara y gráficamente la distribución y evolución de la temperatura sobre una superficie.



Figura 4-3. Cámara térmica Fril.

Las imágenes térmicas que puede tomar la cámara se muestran en la figuras 4.2.3, las imágenes se muestran en un formato jpg., por lo cual esta imagen puede ser fácilmente tratada para obtener los valores deseados. Como se observa en las figuras 4.2.3., estas figuras son

muy llamativas y es fácil asimilar, en ellas se pueden observar en qué lugar encuentran los puntos calientes y los puntos fríos, ya que a su vez estas imágenes están acompañadas con una barra indicadora en la cual se puede observar los distintos rangos de temperaturas.

Las cámaras térmicas trabajan en base a la energía infrarroja que proviene de un objeto se hace converger, por medio de la óptica, sobre un detector de infrarrojo. El detector envía la información al conjunto sensor electrónico para que se procese una imagen. El conjunto electrónico utiliza los datos que provienen del detector para crear una imagen que puede verse en el visor o en un monitor de vídeo o pantalla LCD corriente. La termografía infrarroja es el arte de transformar una imagen infrarroja en radiométrica, lo que permite leer los valores de temperatura a partir de la imagen. Para hacerlo, la cámara infrarroja cuenta con algoritmos complejos. La cámara convierte los valores medidos en una imagen fácil de comprender.

Por ser más fácil analizar imágenes en escala de grises se optó por utilizar para el control de temperatura la figura 4.4b., a diferencia de las demás figuras, al ser en escala de grises los valores RGB en los cada uno de los pixeles serán exactamente iguales (ecuación 4.2).

$$R = G = B \quad 4.2$$

Debido a esta igualdad es más fácil determinar valores de temperaturas en los pixeles, e igual es más fácil el tratamiento de las figuras, en las otras figuras determinar la temperatura de los pixeles se dificulta más debido a que los valores RGB en cada uno de sus pixeles varía mucho, sin tener que lidiar así con 3 valores diferentes de los RGB en las demás figuras se hizo el análisis de estas.

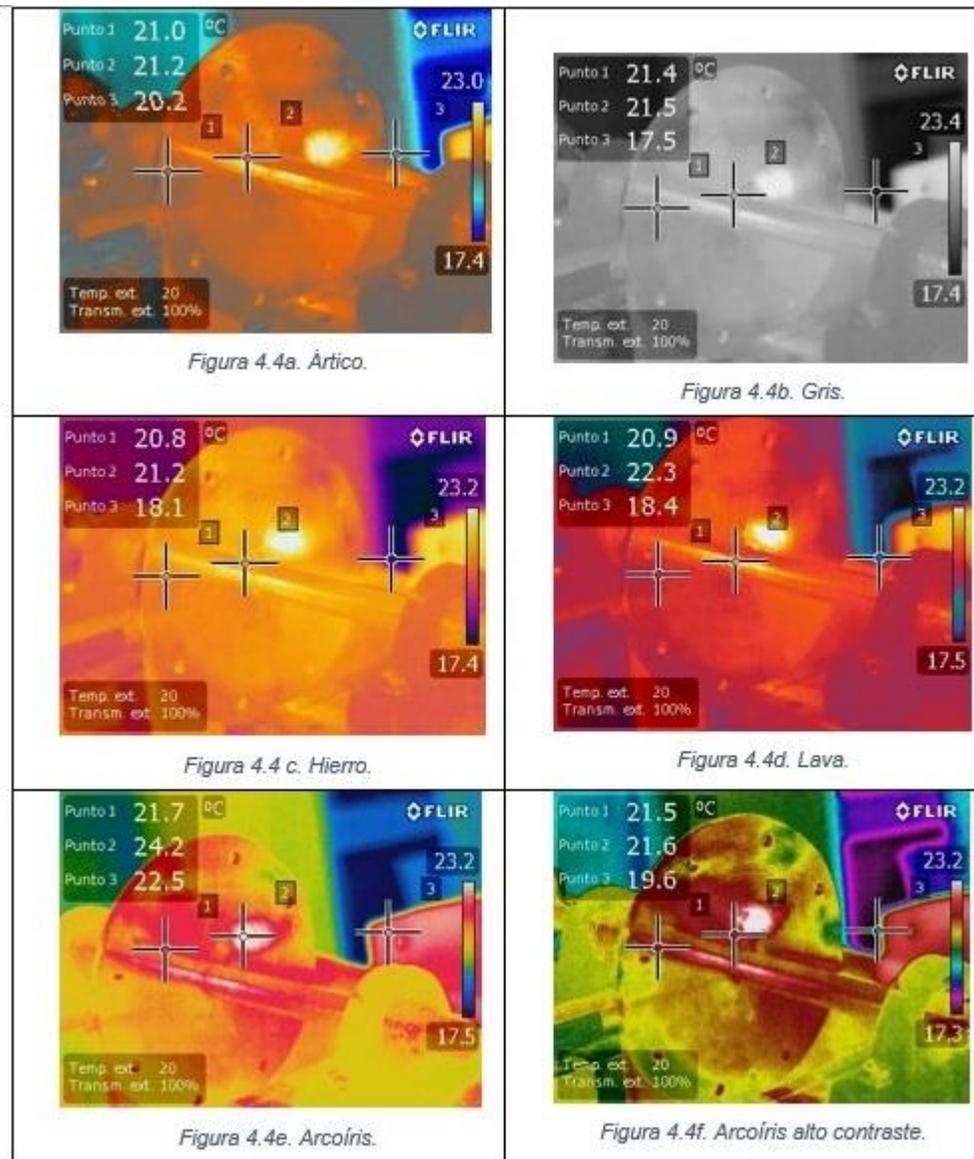


Figura 4-4. Distintos tipos de imágenes tomadas con la cámara térmica.

Se utilizó un sistema de reconocimiento de patrones para que se puedan leer los valores de los 3 puntos y estos valores ser metidos al sistema difuso. Nos interesan las lecturas medidas por la cámara por lo que se hace el reconocimiento de patrones en la imagen únicamente en lo mostrado en la figura 4.5.

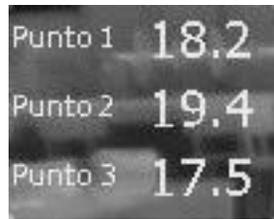


Figura 4-5. Parte de la imagen térmica a analizar

Ahora se analizan las imágenes para ver los patrones de los distintos números a continuación se muestran las matrices resultantes de los distintos número de la figuras 4.6 hasta la figura 4.8.

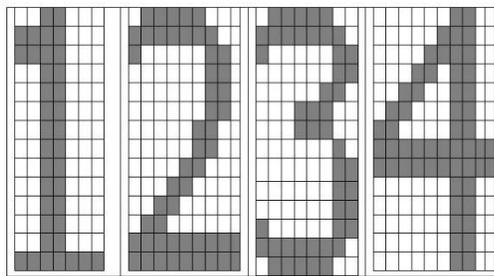


Figura 4-6. Matriz de los números 1, 2, 3, 4.

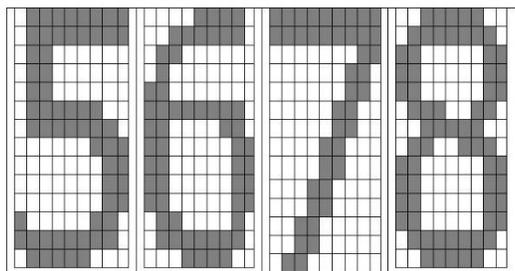


Figura 4-7. Matriz de los números 5, 6, 7, 8.

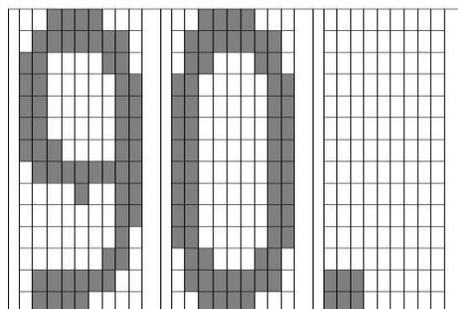


Figura 4-8. Matriz de los números 9 y 0 y del punto decimal.

El número total de matrices son 11, en ellas se observan los números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0 y un “punto decimal”; los niveles de gris en las matrices son mayores en los números y en punto mencionada son mayores a 200 (color amarillo) los demás valores en estas matrices varían pero ninguno de estos valores es mayor a 200; con estos datos se pueden empezar a trabajar con el reconocimiento de patrones. Al reconocer los patrones se debió a que el punto está en el nivel más bajo se optó por analizar la imagen desde este nivel, se recorre la figura 4.5, al encontrar un pixel con un valor mayor a 200 en escala de gris se hacer una comparación de los patrones; debido a que en los números y en el punto el primer pixel detectado mayor a 200 es en diferente posición, se hizo un reacomodo en las matrices el reacomodo quedo como se observa en la figura 4.9.

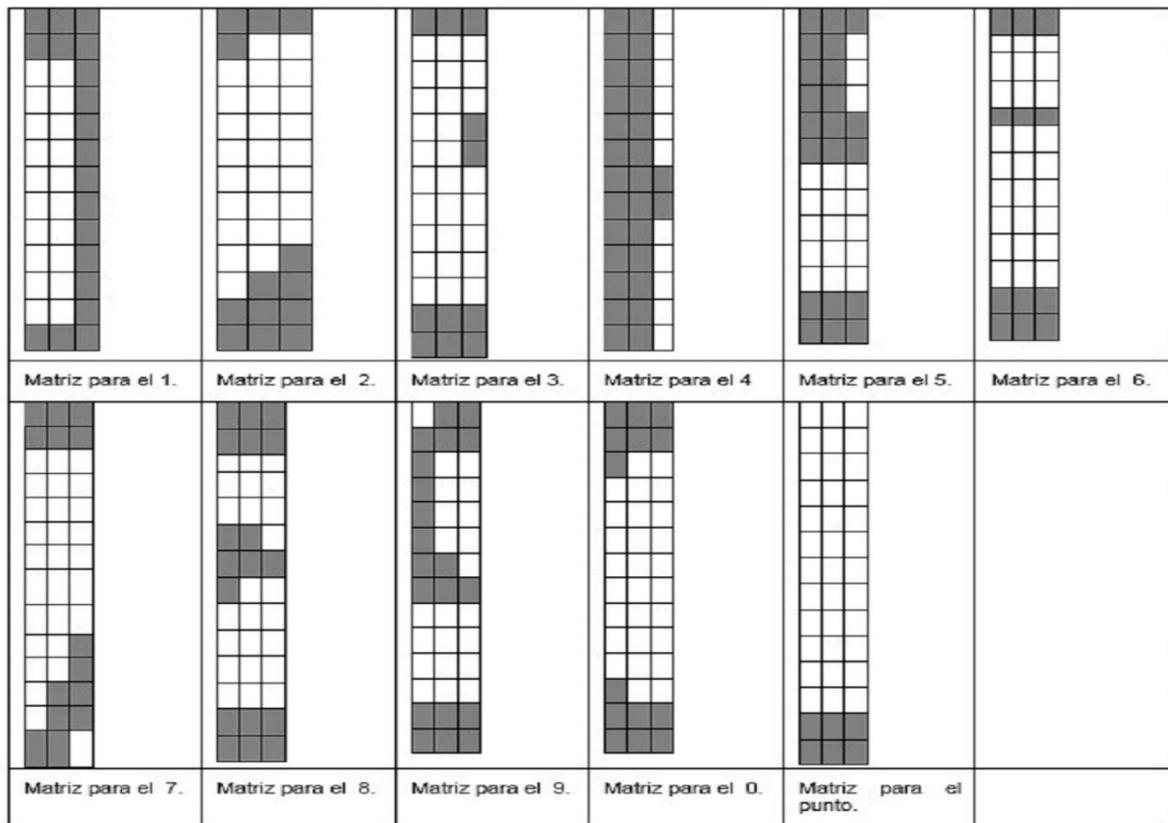


Figura 4-9. Reacomodo de las matrices.

Como se observa en las matrices, ninguna de ellas es igual, por lo que es posible hacer una diferenciación y asignare un valor diferente a cada una de ellas, así al recorrer la imagen en de la figura 4.5, se sabrá que numero se está detectando y este números, en este casos 3, se puede meter al sistema difuso para realizar el control.

4.3. Cálculo de emisividad.

Al trabaja con los la tabla 4.1., de emisividad se observa que la emisividad del aluminio (pulido) es de 0.05, se empezó a trabajar con este valor de emisividad. La pieza de trabajo se observa en la figura 4.10, al tomar la imagen térmica, con una temperatura de la pieza de trabajo de aproximadamente 30, con el valor de emisividad mencionado anteriormente los resultados obtenidos fueron valores de temperatura muy elevadas, la temperatura censada por la cama térmica en el punto central de la pieza fue de 127.5°C (fig. 4.7), esta temperatura no es la adecuada debido a que la pieza de trabajo, aunque es aluminio, no está pulida, como se puede observar en la fig. 4.11 esta pieza es opaca, así que se debe ajustar su emisividad.



Figura 4-10. Pieza de trabajo.

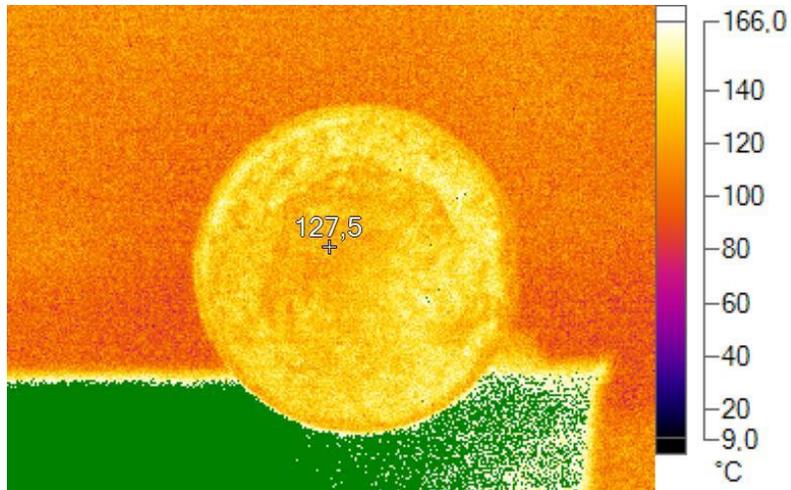


Figura 4-II. Pieza de trabajo (emisividad de 0.05).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anterior mente, se planteó una prueba, para obtener la emisividad adecuada, y así tener valores más reales de la temperatura de la pieza de trabajo. Para ello se empleó un termo par tipo j, un termómetro infrarrojo Fluke, además de 2 cámaras termográficas, la cámara Flir y la cámara Fluke, se usaron las tablas de emisividad que la cámara térmica Flir trae por default, los resultados se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4-2. Medición de la pieza de trabajo en temperatura ambiente con diferentes emisividades.

Emisividad (ϵ)		Cámara Fluke		Cámara Flir	
Caucho	0.93	Vista frontal	22.3°C	vista frontal	14.1°C
		Vista lateral	18.9°C	Vista lateral	18.5°C
Papel blanco	0.9	Vista frontal	22.3°C	Vista frontal	13.9°C
		Vista lateral	18.8°C	vista lateral	18.4°C
Porcelana esmaltica	0.92	Vista frontal	22.3°C	Vista frontal	14°C
		Vista lateral	18.9°C	Vista lateral	18.4°C
Pintura	0.94	Vista frontal	22.3°C	Vista frontal	14.1°C
		Vista lateral	18.9°C	Vista lateral	18.5°C
Cinta eléctrica negra	0.95	Vista frontal	22.2°C	Vista frontal	19.3°C
		Vista lateral	19°C	Vista lateral	18.5°C
cobre oxidado	0.65	Vista frontal	22.8°C	Vista frontal	11.4°C
		Vista lateral	18.1°C	Vista lateral	17.8°C
Cobre pulido	0.02	Vista frontal	370°C	Vista frontal	-20.4°C
		Vista lateral	370°C	Vista lateral	-20.4°C
hormigón	0.54	Vista frontal	23.2°C	Vista frontal	9.5°C
		Vista lateral	17.5°C	Vista lateral	17.3°C
Ladrillo común	0.85	Vista frontal	22.3°C	Vista frontal	13.5°C
		Vista lateral	18.7°C	Vista lateral	18.3°C
Aluminio oxidado	0.5	Vista frontal	23.3°C	Vista frontal	8.6°C
		Vista lateral	17.2°C	Vista lateral	17.1
Aluminio pulido	0.05	Vista frontal	42.6°C	Vista frontal	-20.1°C
		Vista lateral	-27.4°C	Vista lateral	-14.3°C
Termómetro infrarrojo			16.8°C		
Termopar tipo J			17.9°C		

Como se puede observar en la tabla la diferencia de temperatura, entre el termómetro infrarrojo y el termo par tipo J es de solo 1.1°C, por ello el valor de la temperatura será establecido entre estas dos medidas. Anteriormente se mencionó que la emisividad con un valor de 0.05 daba valores erróneos, en la tabla se corrobora esta premisa. Ahora bien la emisividad de 0.5 correspondiente al aluminio oxidada da un valor aceptable, en la cámara Fluke y en la cámara Flir de 17.2°C y de 17.1°C respectivamente, pero ese valor es solo en la vista lateral, en la vista frontal en la cámara Fluke se registra un valor de 23 °C y en la cámara Flir el valor registrado es de 8.6°C; estos valores difieren mucho por lo que se considera que la emisividad del aluminio oxidado, marcado en la tabla con valor de (0.5), no es adecuado.

La temperatura más cercana registrada por el termómetro infrarrojo (temp. 16.8°C) es la del aluminio oxidado (emisividad de 0.5, temp 17.1°C) en su vista lateral de la cámara Flir, con una diferencia de 0.3°C. La temperatura más cercana a la que se registró con el termopar tipo J (temp. 17.9°C) es la del cobre oxidado (emisividad de 0.65, temp 17.8°C) en su vista lateral con la cámara Flir, con una diferencia de 0.1°C. Con estos valores obtenidos se puede llegar a la conclusión de que la mejor manera de tomar una imagen térmica es de la forma lateral, debido a que la diferencia entre los valores sensados con el termopar tipo J y el termómetro infrarrojo son menores que los tomados con una vista frontal. A emisividades bajas la medida de la temperatura registrada no es adecuada por ello se descartan estos parámetros de emisividad en otras pruebas.

Después de esta prueba y al ver que los valores solo se acercaban se decidió hacer una segunda prueba, en la cual la temperatura sensada con el termopar tipo j y la temperatura de la cámara Flir fueran iguales, la emisividad propuesta fue de 0.84, a continuación se calentó la pieza de trabajo la tabla 4.3 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 4-3. Pruebas con emisividad de 0.84.

Termopar tipo J	Cámara térmica Flir	Emisividad (ϵ)	Diferencia entre termopar tipo J y cámara Flir
163	163.4	0.84	0.4
135	133.9	0.84	1.1
122	121.8	0.84	0.2
118	118.3	0.84	0.3
108	107.5	0.84	0.5
36	36.7	0.84	0.7
35	31.4	0.84	3.6
35	30.8	0.84	4.2
Diferencia Promedio			0.84

En la tabla 4.3 se observan que las temperaturas entre la cámara Flir y el termopar tipo J son similares, de las medidas tomadas el margen de error máximo fue de 4.2°C y el mínimo fue de 0.2°C, con un promedio total del error de 0.84°C. Lo cual demuestra que la emisividad de 0.84 puede ser utilizada para nuestro sistema, la figura 4.12 muestra de forma gráfica estas lecturas.

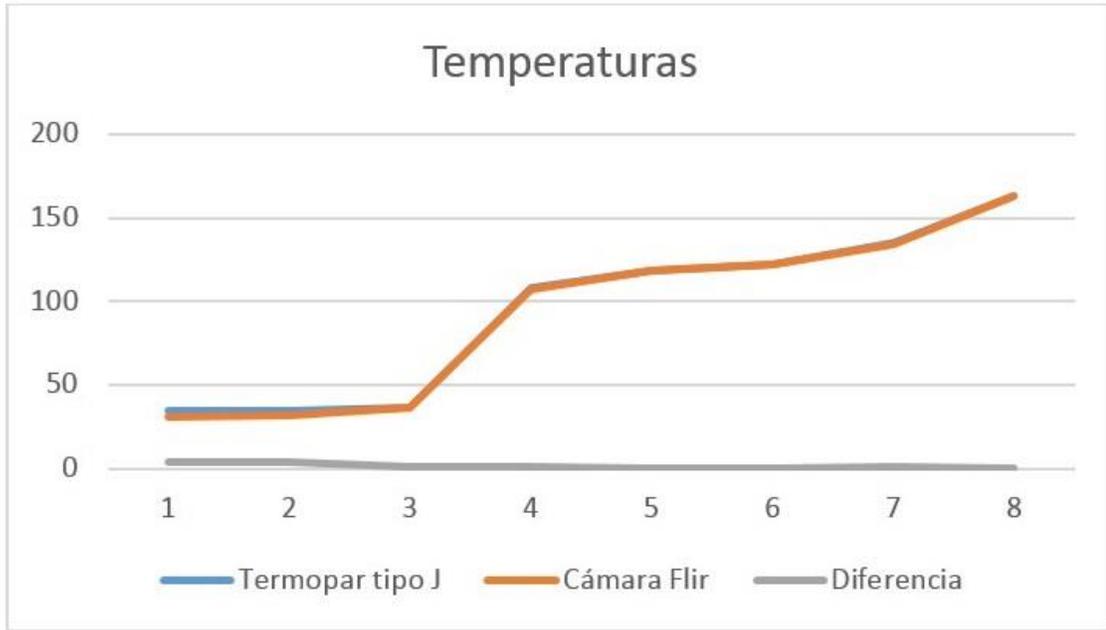


Figura 4-12. Graficas de temperaturas medidas de la tabla 4.3.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se realizaron más pruebas con esta emisividad, de tal modo que la imagen fuera tomada de forma frontal, debido a que en la prueba anterior la diferencia de la temperatura fue más alta tomando la imagen de forma, la siguiente tabla 4.4 muestra los resultados.

Tabla 4-4. Segunda prueba con emisividad de 0.84.

Termopar tipo J	Cámara Flir	Diferencia de tem.
14.9	14.9	0.2
17.9	17.4	0.5
18.1	17.9	0.2
20.3	20.5	0.2
30	23	7
39	34.3	4.7
40	35.8	4.2
40	35.7	4.3
42	34	8
41	35	6
41	35.4	5.6
49	38.5	10.5
59	46.8	12.2
61	52.2	8.8
60	56.6	3.4
75	68.8	6.2
80	78	2
83	79	4
107	108	1
Promedio diferencias		4.67368421

En la tabla 4.4 se los valores de las diferencias de las temperaturas varían más que en la primera prueba, puesto que en ella hay una variación del error desde 0.2 grados hasta 12 grados, aun así la diferencia promedio es relativamente baja, siendo en este caso de 4.6 grados, estos valores erróneos pueden ser resultado de tomar las imágenes térmicas de una manera inadecuada, la figura 4.13 muestra de forma gráfica los valores de las temperaturas del termopar y la cámara térmica, así como su diferencia.

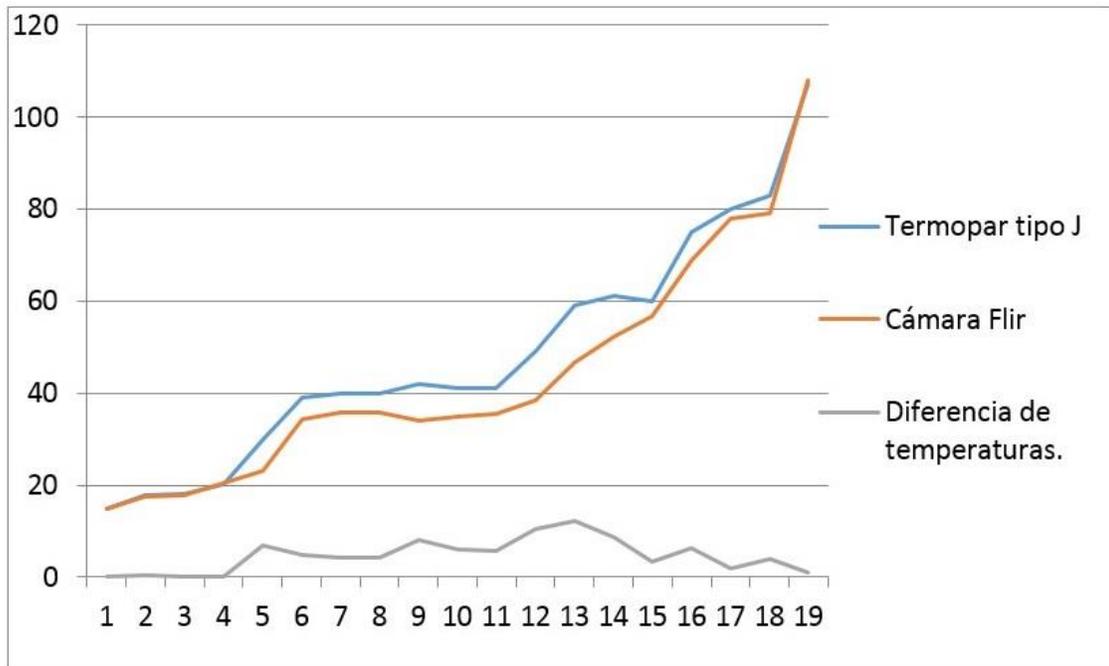


Figura 4-13. Grafica de las temperaturas medidas.

Para que el valor de la temperatura tomada por la cámara térmica, tenga una variación cercana a cero, con respecto al termopar tipo j, es necesario tener en cuenta que si la imagen que es tomada de forma frontal (fig 4.14), por el reflejos de la luz, su temperatura sensada tendrá una mayor variación, debido a eso la imagen térmica debe de ser tomada de forma lateral (fig 4.15).

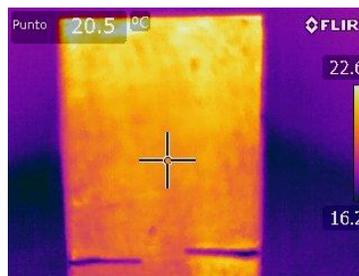


Figura 4-14. Imagen térmica tomada de forma frontal.

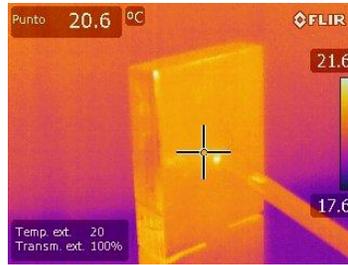


Figura 4-15. Imagen térmica tomada de forma lateral.

4.4. Lógica difusa en el sistema.

La lógica difusa se selecciona en este control de la temperatura, ya es una forma de lógica multivariada en el que los valores de verdad de las variables pueden ser cualquier número real entre 0 y 1, que se considera "difusa". Por el contrario, en la lógica de Boole, los valores de verdad de las variables sólo pueden ser 0 o 1. La lógica difusa se ha ampliado para manejar el concepto de verdad parcial, en el que el valor de verdad puede oscilar entre todo cierto y completamente falsa. [40]

Los conjuntos se definen un universo de discurso que contiene a conjuntos cuyos bordes están bien definidos, un elemento puede o no pertenecer a cierto conjunto, El concepto de conjunto difuso es asociado a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde esta es el nombre del conjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$, indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A (ecuación 4.3).

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \quad 4.3$$

A continuación, un sistema de control difuso es un sistema de control basado en una lógica de sistema matemático difusa que analiza valores de entrada analógica en términos de variables lógicas que toman valores continuos entre 0 y 1, en contraste con la lógica clásica o digital, que opera en valores discretos de 1 o 0 (verdadero o falso, respectivamente). [41]

La forma más común de funciones de pertenencia es triangular como se muestran en la figura 3.3, donde a , b y c son parámetros que dan forma a la función (3.2), y donde x es una variable que pertenece al universo de discurso X . El trapezoidal se muestra en la fig. 3.4, viene dada por la siguiente ecuación, donde a , b , c y d son los parámetros que dan forma a

esta función (3.3) y en el que x es una variable perteneciente al universo de discurso X . Y también se utilizan curvas de campana, pero la forma es en general menos importante que el número de curvas y su colocación. De tres a siete curvas son generalmente apropiadas para cubrir el rango requerido de un valor de entrada, o el "universo de discurso" en la jerga confusa. Por ser las más ocupadas se utilizarán las funciones de pertenencia triangular y trapezoidal.

Como se señaló anteriormente, la etapa de procesamiento se basa en un conjunto de reglas lógicas en forma de IF-THEN, donde la parte SI se denomina "antecedente" y la parte Entonces se le llama la "consecuente". Los sistemas de control borroso típicos tienen docenas de reglas. [42]

Si la función toma el valor 0 significa que tal valor de x no está incluido en A y si toma el valor 1 el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A . En la Figura 4.16 se puede apreciar un ejemplo donde el conjunto (con variable x) está subdividido en subconjuntos {low, medium, high}, con sus respectivas funciones de membresía (4.4).

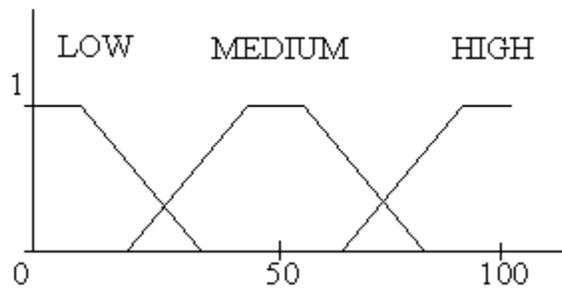


Figura 4-16. Subconjuntos difusos de temperatura.

$$\{\mu_{\text{low}}(x), \mu_{\text{medium}}(x), \mu_{\text{high}}\} \quad 4.4$$

Sea X una colección de objetos, expresados en forma genérica por x . Entonces, un conjunto difuso A en X , se define como un conjunto de pares ordenados (4.5).

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad 4.5$$

Las reglas se establecieron de la siguiente manera. En la Fig. 4.17 se muestra el área transversal de la barra de aluminio donde se puede observar tres capas (exterior, interior y

medianas) que indican los tres lugares en los que permiten detectar la temperatura. La cámara termográfica se utiliza para detectar la temperatura.

Es necesario tener en cuenta que la calefacción en la barra se origina en la capa exterior y gradualmente se penetra en la capa interior.

Dado que el tiempo de calentamiento debe ser corto, y debe ser uniforme, una vez que la capa externa alcanza 500 ° C máximos, el inversor debe dejar de energizar la bobina de inducción o energizarlo muy poco, para que la temperatura pueda introducirse hasta el centro de la pieza de aluminio, con el fin a homogenizarse.

Esto reducirá la temperatura de la capa exterior y aumentará la temperatura de las capas interiores; a continuación, el inversor de nuevo energía a la bobina de inducción para aumentar la temperatura de la capa exterior de nuevo, y el proceso continuará hasta llegar a una temperatura estándar de 450 ° grados C.

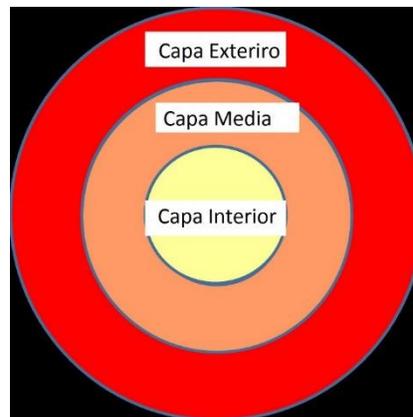


Figura 4-17. Capas en las que se detecta la temperatura.

Teniendo en cuenta estas 3 capas, ahora utilizando las funciones de membrecía triangular y trapezoidal para hacer 3 universos de discurso, el primer universo de discurso será para la capa exterior (fig. 4.18), el segundo para la capa media (fig. 4.19), y el tercero para la capa interior (fig. 4.20), estos tres universos tendrán una sola salida (fig. 4.21), los universos de discursos se muestran a continuación.

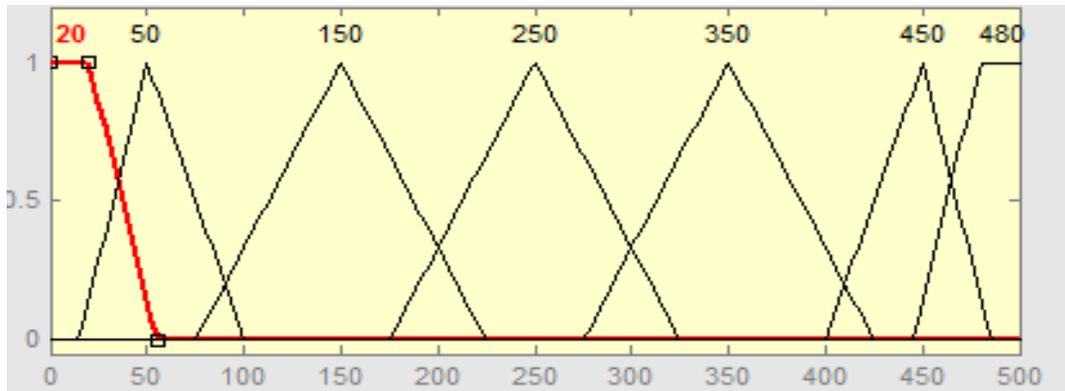


Figura 4-18. Universo de discurso capa exterior.

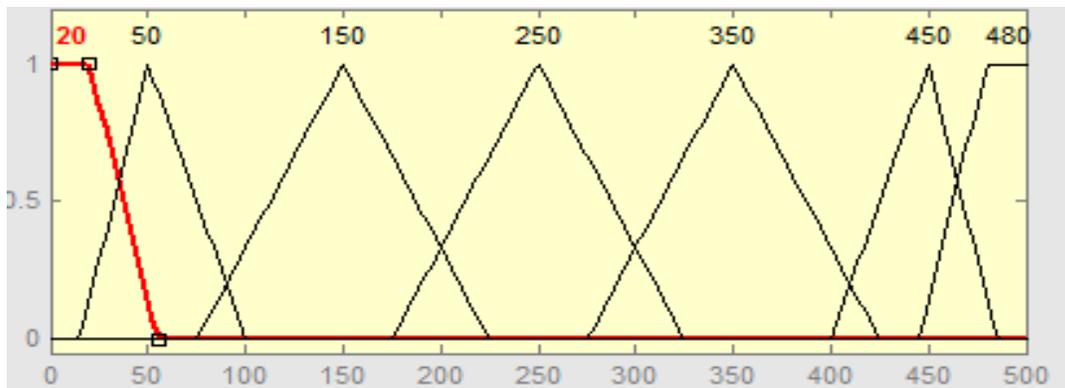


Figura 4-19. Universo de discurso capa media.

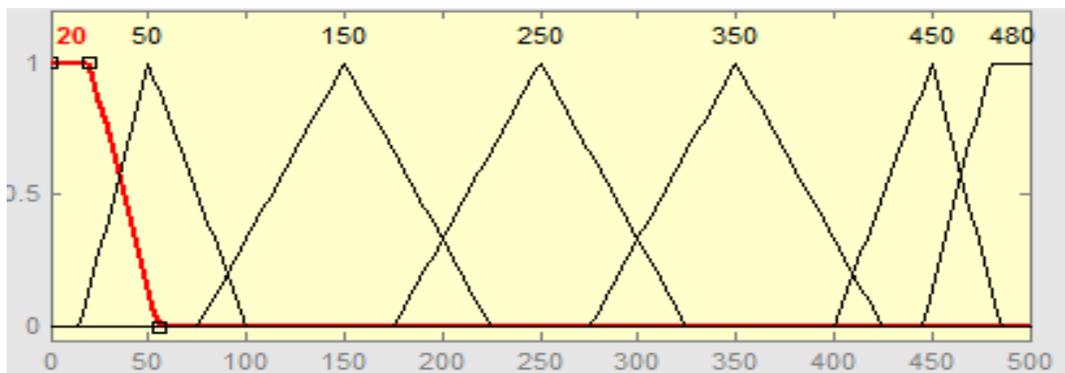


Figura 4-20. Universo de discurso capa interior.

Se espera que la transferencia de calor sea la misma en las 3 capas por ello se usó un universo de discurso con las mismas temperaturas, ahora sustituyendo las ecuaciones 3.2 y 3.3 en los universos de discurso se tiene el siguiente.

Para la función de membrecía trapezoidal de nombre 20 se tiene

$$\begin{aligned}
 &Trapezoidal(x; a = -\infty, b = 0, c = 20, d = 55) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - (-\infty)}{0 - (-\infty)}, 1, \frac{55 - x}{55 - 20}\right), 0\right) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x + \infty}{\infty}, 1, \frac{55 - x}{35}\right), 0\right) \\
 &= \max\left(\min\left(\infty, 1, \frac{55 - x}{35}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Como se observa en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 los valores que van desde $-\infty$ hasta 20 toman un grado de pertenencia con un valor igual a 1 en la función de membrecía llamada 20, esto es comprobable con la ecuación 4.8.

Al ser las siguientes 5 funciones de membrecía triangulares, estas se calcularan con la ecuación 3.3.

Para la función de membrecía triangular de nombre 50 se tiene la ecuación 4.7.

$$\begin{aligned}
 &Triangular(x; a = 15, b = 50, c = 100) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - 15}{35}, \frac{100 - x}{50}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Para la función de membrecía triangular de nombre 150 se tiene la ecuación 4.8.

$$\begin{aligned}
 &Triangular(x; a = 75, b = 150, c = 225) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - 75}{75}, \frac{225 - x}{75}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Para la función de membrecía triangular de nombre 250 se tiene la ecuación 4.9.

$$\begin{aligned}
 &Triangular(x; a = 175, b = 250, c = 325) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - 175}{75}, \frac{325 - x}{75}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Para la función de membrecía triangular de nombre 350 se tiene la ecuación 4.10.

$$\begin{aligned}
 &Triangular(x; a = 275, b = 350, c = 425) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - 275}{75}, \frac{425 - x}{75}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Para la función de membrecía triangular de nombre 450 se tiene la ecuación 4.11.

$$\begin{aligned} & \text{Triangular}(x; a = 400, b = 450, c = 485) \\ & = \max\left(\min\left(\frac{x - 400}{50}, \frac{485 - x}{35}\right), 0\right) \end{aligned} \quad 4.11$$

Para la función de membrecía trapezoidal de nombre 90 se tiene

$$\begin{aligned} & \text{Trapezoidal}(x; a = 445, b = 480, c = 550, d = \infty) \\ & = \max\left(\min\left(\frac{x - 445}{480 - 445}, 1, \frac{\infty - x}{\infty - 550}\right), 0\right) \\ & = \max\left(\min\left(\frac{x - 445}{35}, 1, \frac{\infty - x}{\infty}\right), 0\right) \\ & = \max\left(\min\left(\frac{x - 445}{35}, 1, \infty\right), 0\right) \end{aligned} \quad 4.12$$

Se puede ver en las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 los valores que van desde 550 hasta ∞ toman un grado de pertenencia con un valor igual a 1 en la función de membrecía llamada 90, esto es comprobable con la ecuación 4.12.

Teniendo en cuenta la ecuación 4.4, los subconjuntos difusos de los 3 capaz quedarían de cómo se muestra en la ecuación 4.13.

$$\{\mu_{20}(x), \mu_{50}(x), \mu_{150}(x), \mu_{250}(x), \mu_{350}(x), \mu_{450}(x), \mu_{480}(x)\} \quad 4.13$$

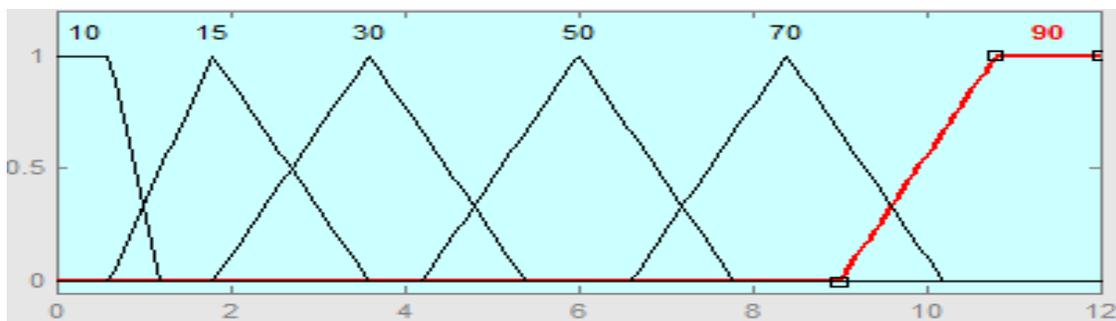


Figura 4-21. Universo de discurso salido.

Para la salida mostrada en la figura 4.21, el universo de discurso va desde 0 a 12, es mucho menor a los universos de entrada los cuales van desde 0 a 500 (figuras 4.14, 4.15 y 4.16), esa salida controlara un pulso el cual ira hacia los IGBT's controlando su tiempo de trabajo. Esta salida simular el control que va de 0 a 100% aproximadamente, se evita un valor igual a

100% porque puede haber un corto debido al cruce por 0. A continuación sustituyendo las ecuaciones 3.2 y 3.3 en el universo de discurso de la salida se tiene lo siguiente.

Para la función de membrecía trapezoidal de nombre 10, el cual simula una salida aproximada del 10% se tiene la ecuación 3.3.

$$\begin{aligned}
 &Trapezoidal(x; a = -\infty, b = 0, c = 0.6, d = 1.2) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - (-\infty)}{0 - (-\infty)}, 1, \frac{1.2 - x}{1.2 - 0.6}\right), 0\right) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x + \infty}{\infty}, 1, \frac{1.2 - x}{0.6}\right), 0\right) \\
 &= \max\left(\min\left(\infty, 1, \frac{1.2 - x}{0.6}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Al igual que las entradas la salida (figuras 4.17) los valores que van desde $-\infty$ hasta 0.6 toman un grado de pertenencia con un valor igual a 1 en la función de membrecía trapezoidal de nombre 10, esto es comprobable con la ecuación 4.14.

Las 4 siguientes funciones de membrecía son triangulares, estas se calcularan con la ecuación 3.2.

Para la función de membrecía triangular de nombre 15, la cual simula una salida aproximadamente del 15% se tiene la ecuación 4.15.

$$\begin{aligned}
 &Triangular(x; a = 0.6, b = 1.8, c = 3.6) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - 0.6}{1.2}, \frac{3.6 - x}{3}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Para la función de membrecía triangular de nombre 30, esta simula una salida aproximada del 30% se tiene la ecuación 4.16.

$$\begin{aligned}
 &Triangular(x; a = 1.8, b = 3.6, c = 5.4) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - 1.8}{1.8}, \frac{5.4 - x}{1.8}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Para la función de membrecía triangular de nombre 50, esta simula una salida de aproximadamente del 50% se tiene la ecuación 4.17.

$$\begin{aligned}
 &Triangular(x; a = 4.2, b = 6, c = 7.8) \\
 &= \max\left(\min\left(\frac{x - 4.2}{1.8}, \frac{7.8 - x}{1.8}\right), 0\right)
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Para la función de membrecía triangular de nombre 70, que simula una salida de aproximadamente del 70% se tiene la ecuación 4.18

$$\begin{aligned} & \text{Triangular}(x; a = 6.6, b = 8.4, c = 10.2) \\ & = \max\left(\min\left(\frac{x - 6.6}{1.8}, \frac{10.2 - x}{1.8}\right), 0\right) \end{aligned} \quad 4.18$$

Para la función de membrecía trapezoidal de nombre 90, en la cual se simula una salida del 90% aproximadamente se tiene la ecuación 4.19.

$$\begin{aligned} & \text{Trapezoidal}(x; a = 9, b = 10.8, c = 12, d = \infty) \\ & = \max\left(\min\left(\frac{x - 9}{1.8}, 1, \frac{\infty - x}{\infty - 12}\right), 0\right) \\ & = \max\left(\min\left(\frac{x - 9}{1.8}, 1, \infty\right), 0\right) \end{aligned} \quad 4.19$$

Se puede ver en las figuras 4.19 los valores que van desde 10.8 hasta ∞ toman un grado de pertenencia con un valor igual a 1 en la función de membrecía llamada 90, esto es comprobable con la ecuación 4.19.

Teniendo en cuenta la ecuación 4.4, los subconjuntos difusos de los 3 capaz quedarían de cómo se muestra en la ecuación 4.20.

$$\{\mu_{10}(x), \mu_{15}(x), \mu_{30}(x), \mu_{50}(x), \mu_{70}(x), \mu_{90}(x)\} \quad 4.20$$

Teniendo ya establecidos los universos de discurso de entradas y el de salida se establecen las reglas difusas. En este caso como hay 3 entradas y cada una de estas entradas están divididas en 7 funciones de membrecía las reglas en total serian 349, para un sistema de control soy muchas reglas, el control al ser en tiempo real, ocuparía muchos recursos para computar este sistema de control, lo cual haría que el tiempo de respuesta fuera muy lento.

Por ello, partiendo de la premisa, de que en la barra la temperatura siempre será mayor en la región exterior, se pueden omitir varias reglas difusas, en base a lo anterior se lograron reducir las reglas difusas a 81.

Las reglas difusas se muestran a continuación:

1. If(Temp_Exterio is 20) and (Temp_Centro is 20) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 90)
2. If(Temp_Exterio is 50) and (Temp_Centro is 20) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 90)
3. If(Temp_Exterio is 50) and (Temp_Centro is 50) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 90)
4. If(Temp_Exterio is 50) and (Temp_Centro is 50) and (tem_Iterior is 50) the (output1 is 90)
5. If(Temp_Exterio is 150) and (Temp_Centro is 20) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 90)

48. If(Temp_Exterio is 450) and (Temp_Centro is 350) and (tem_Iterior is 350) the (output1 is 30)
49. If(Temp_Exterio is 450) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 30)
50. If(Temp_Exterio is 450) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 50) the (output1 is 30)
51. If(Temp_Exterio is 450) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 150) the (output1 is 30)
52. If(Temp_Exterio is 450) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 150) the (output1 is 15)
53. If(Temp_Exterio is 450) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 250) the (output1 is 15)
54. If(Temp_Exterio is 450) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 350) the (output1 is 15)
55. If(Temp_Exterio is 450) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 450) the (output1 is 10)
56. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 20) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 10)
57. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 50) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 10)
58. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 50) and (tem_Iterior is 50) the (output1 is 10)
59. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 150) and (tem_Iterior is 150) the (output1 is 10)
60. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 250) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 10)
61. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 250) and (tem_Iterior is 50) the (output1 is 10)
62. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 250) and (tem_Iterior is 150) the (output1 is 10)
63. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 250) and (tem_Iterior is 250) the (output1 is 10)
64. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 350) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 10)
65. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 350) and (tem_Iterior is 50) the (output1 is 10)
66. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 350) and (tem_Iterior is 150) the (output1 is 10)
67. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 350) and (tem_Iterior is 250) the (output1 is 10)
68. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 350) and (tem_Iterior is 350) the (output1 is 15)
69. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 20) the (output1 is 10)
70. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 50) the (output1 is 10)
71. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 150) the (output1 is 10)
72. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 250) the (output1 is 15)
73. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 350) the (output1 is 15)
74. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 450) and (tem_Iterior is 450) the (output1 is 10)
75. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 480) and (tem_Iterior is 200) the (output1 is 10)
76. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 480) and (tem_Iterior is 50) the (output1 is 10)
77. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 480) and (tem_Iterior is 150) the (output1 is 10)
78. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 480) and (tem_Iterior is 250) the (output1 is 15)
79. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 480) and (tem_Iterior is 350) the (output1 is 15)
80. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 480) and (tem_Iterior is 450) the (output1 is 10)
81. If(Temp_Exterio is 480) and (Temp_Centro is 480) and (tem_Iterior is 480) the (output1 is 10)

El sistema utilizado es un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani. El sistema está basados en los conceptos de conjuntos difusos, reglas lingüísticas de la forma Si- Entonces, las reglas difusas mencionado anteriormente, y en un sistema de razonamiento difuso basado en lógica difusa. La figura 3.6 mostrada en el capítulo anterior se puede observar el sistema difuso tipo Mamdani.

El método Mamdani se utilizó la forma *min.-máx*, la composición de las reglas de inferencia estarán dadas por el operador de intersección *T-norm min* (ecuación 4.21).

$$T_M(x, y) = \min(x, y) \quad 4.21$$

La ecuación 4.21 es utilizada para sistemas con 2 entradas, como nuestro sistema cuenta con 3 entradas es necesario modificar esta ecuación por lo tanto la ecuación 4.21 se sustituiría con la ecuación 4.22, quedando de la siguiente forma:

$$T_M(x, y, z) = \min(x, y, z) \quad 4.22$$

Para el operador de unión *S-conorm máx* (ecuación 4.23).

$$S_M(x, y) = \max(x, y) \quad 4.23$$

Al igual que la ecuación 4.21, la ecuación 4.23, ocupa 3 entradas por lo tanto la ecuación 4.23 es sustituida por la ecuación 4.24.

$$S_M(x, y, z) = \max(x, y, z) \quad 4.24$$

El método de agregación de las salidas es el método máximo (ecuación 4.25)

$$\mu_{c'}(z) = \text{Max}(\mu_{c1}(z), \mu_{c2}(z), \mu_{c3}(z), \dots, \mu_{cn}(z)) \quad 4.25$$

Un sistema inferencia difusa, transforma las variables u objetos rígidos en variables difusas por medio de las funciones de pertenencia, por lo tanto, para poder obtener un valor rígido como salida de dicho sistema, es necesario utilizar un desfusificador. En el método Mamdani, es común encontrarnos como resultado de la agregación, con un área irregular, por lo tanto para obtener el valor rígido como salida del sistema se utiliza alguno de los siguientes métodos de desfusificación [43] (Fig. 4.22):

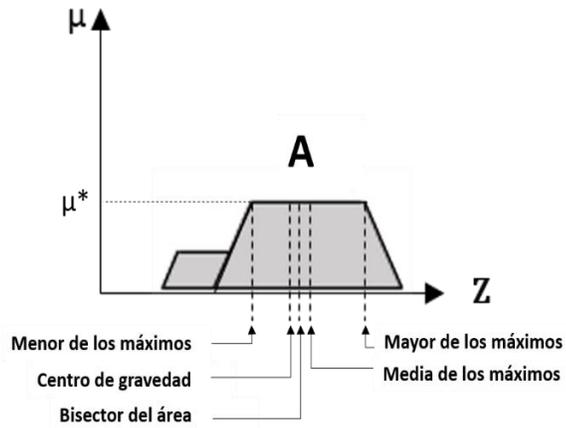


Figura 4-22. Métodos de defusificación para sistemas difusos tipo Mamdani.

El sistema defusificador más empleado es el centro de gravedad, por ello se optó por este sistema, para el valor rígido de salida del sistema (ecuación 3.4)

La visualización de las reglas se muestra en la figura 4.23.

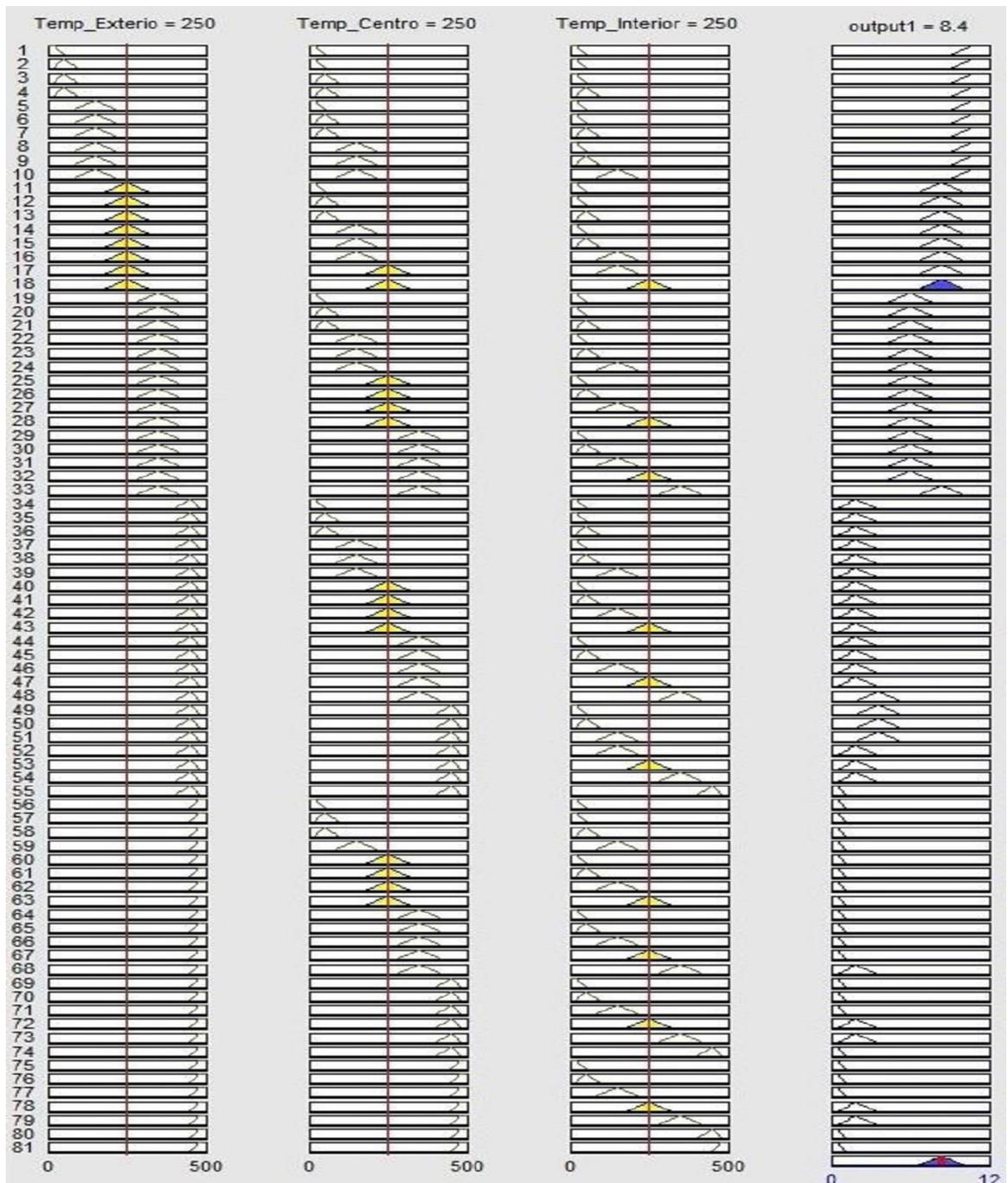


Figura 4-23. Visualización de las reglas difusa.

La figura 4.23 se muestra que con los valores de entrada de 250 para Temp_esterio, Temp_Centro y Temp_interiro, solo se cumple la regla 18. Por esa razón la salida esta solo compuesta de una función de pertenencia, al aplicar el centro de gravedad la salida da

extramente la mitad de esta función mitad del valor de esta, el valor resultante es de 8.4, lo cual implica un valor del 70% de la salida. Esta salida controlara un PWM.

4.5. Lógica difusa tipo 2 en el sistema.

Como se mencionó en capítulos anteriores los sistemas difusos de intervalo tipo 2 son una extensión de los sistemas difusos tipo 1 por lo tanto la lógica básica de los sistemas no cambia.

El sistema difuso que manejaremos de tipo-2 empleado en este documento cuenta con 3 variables lingüísticas de entrada (Exterior Temperature, Medium Temperature, Interior Temperature) y una variable lingüística de salida.

Para este sistema la variable lingüística “Exterior Temperature” está definida por los conjuntos difusos tipo-2 \tilde{A}_1 , \tilde{A}_2 y \tilde{A}_3 , figura 4.24, sus parámetros se describen en la tabla 4.5.

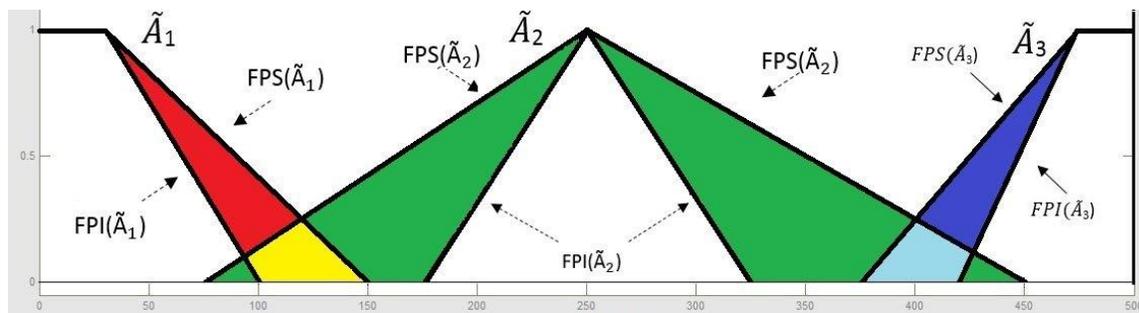


Figura 4-24. Conjunto difuso de intervalo t-2 de la Temperatura Exterior.

Tabla 4-5. Conjuntos difusos de Temperatura Exterior.

Variable lingüística Temperatura Exterior			
CDIT2	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2	\tilde{A}_3
FPS	(0, 0, 30, 150)	(75, 250, 450)	(375, 475, 500, 500)
FPI	(0, 0, 30, 100)	(175, 250, 325)	(420, 475, 500, 500)

La variable lingüística de entrada “Medium Temperature”, está definida por los conjuntos difusos tipo-2 \tilde{B}_1 , \tilde{B}_2 y \tilde{B}_3 como se muestra en la figura 4.25. y cuyos parámetros se describen en la tabla 4.6.

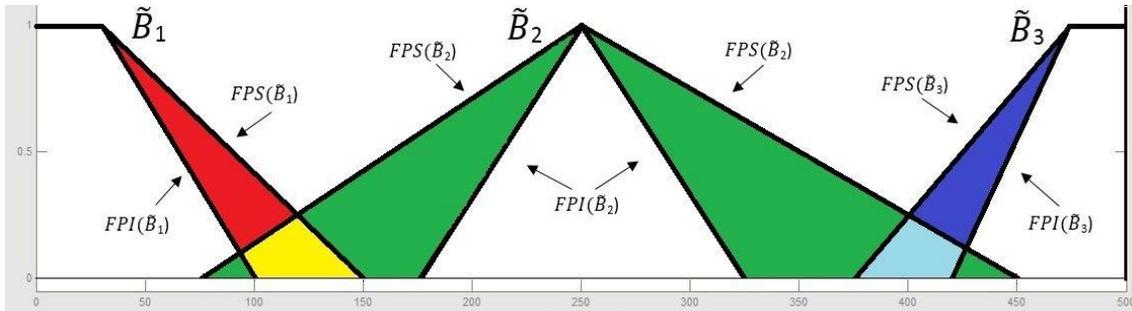


Figura 4-25. Conjunto difuso de intervalo t-2 de la Temperatura Media.

Tabla 4-6. CDIT2 de Temperatura Media.

Variable lingüística Temperatura Media			
CDIT2	\tilde{B}_1	\tilde{B}_2	\tilde{B}_3
FPS	(0, 0, 30, 150)	(75, 250, 450)	(375, 475, 500, 500)
FPI	(0, 0, 30, 100)	(175, 250, 325)	(420, 475, 500, 500)

La variable lingüística de entrada “Interior Temperature”, está definida por los conjuntos difusos tipo-2 \tilde{C}_1 , \tilde{C}_2 y \tilde{C}_3 como se muestra en la figura 4.26 y cuyos parámetros se describen en la tabla 4.7.

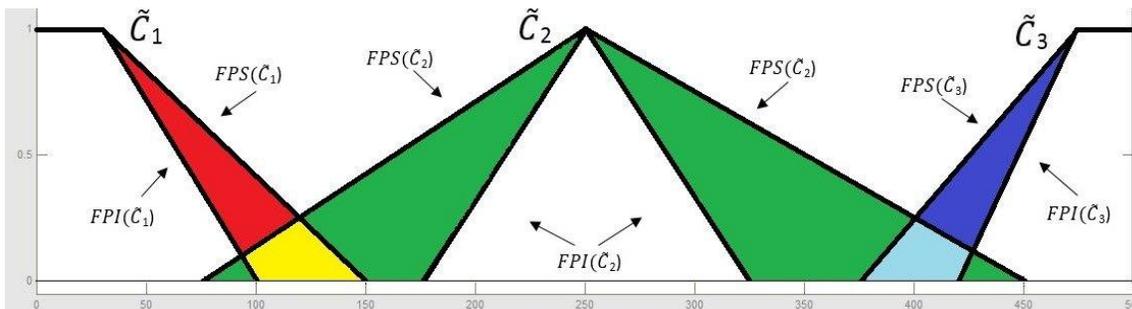


Figura 4-26. Conjunto difuso de intervalo t-2 de la Temperatura Externa.

Tabla 4-7. CDIT2 de Temperatura Interior

Variable lingüística Temperatura Interior			
CDIT2	\tilde{C}_1	\tilde{C}_2	\tilde{C}_3
FPS	(0, 0, 30, 150)	(75, 250, 450)	(375, 475, 500, 500)
FPI	(0, 0, 30, 100)	(175, 250, 325)	(420, 475, 500, 500)

Finalmente la variable lingüística de salida z , está definida por los conjuntos difusos tipo 2 \tilde{D}_1 , \tilde{D}_2 y \tilde{D}_3 como se muestra en la figura 4.27 y cuyos parámetros se describen en la tabla 4.8.

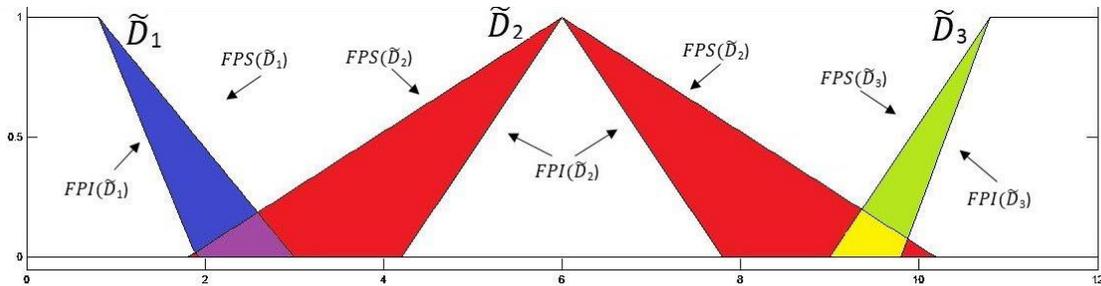


Figura 4-27. Conjuntos difusos de intervalo tipo 2 de la variable salida.

Tabla 4-8. CDIT2 de Temperatura Media.

Variable lingüística Temperatura Interior			
CDIT2	\tilde{C}_1	\tilde{C}_2	\tilde{C}_3
FPS	(0, 0, 0.8, 3)	(1.8, 6, 10.2)	(9, 10.8, 12, 12)
FPI	(0, 0, 0.8, 1.9)	(4.2, 6, 7.8)	(9.8, 10.8, 12, 12)

La primera etapa del sistema, la difusificación, es igual a la difusificación del sistema difuso tipo 1, la diferencia es que al utilizar funciones de intervalo tipo 2 obtendremos un intervalo de grado de pertenencia.

El valor de entrada es difusificado tanto en la FPS como en la FPI del conjunto difuso de intervalo tipo 2 correspondiente, obteniendo de esta manera dicho intervalo.

La segunda etapa del sistema es el mecanismo de inferencia, el cual incluye las reglas de inferencia difusa, para este sistema se consideran las siguientes reglas. Las reglas difusas se muestran a continuación en la tabla 4.9.

Tabla 4 -9. Reglas difusas.

Num. de regla	Si x es	y y es	y z es	Entonces
1	A1	B1	C1	D3
2	A2	B1	C1	D3
3	A2	B2	C1	D2
4	A2	B2	C2	D3
5	A2	B3	C2	D2
6	A2	B3	C3	D2
7	A3	B1	C1	D1
8	A3	B2	C1	D2
9	A3	B2	C2	D1
10	A3	B3	C1	D1
11	A3	B3	C2	D1
12	A3	B3	C3	D1

El sistema de inferencia difuso tipo 2 tiene como salida un intervalo, dicho intervalo permite al sistema mantener la incertidumbre asociada a cada función de pertenencia con respecto a la variable de entrada (ecuación 3.13).

Para calcular el IDI de disparo de cada regla se utilizan los grados de pertenencia obtenidos de cada conjunto de manera similar que en los sistemas difusos tipo 1. La evaluación de las reglas de inferencia antes mencionadas utilizando el t-norm(min) y el s-conorm(max)

Una vez calculados los intervalos de disparo $IDI(R_1)_{i=1}^N$, la siguiente etapa del sistema es el Reductor de tipo. Para este sistema se considera el centro de los conjuntos. Inicialmente se calcula el centro de los N conjuntos de intervalo tipo 2 de salida, para llevar a cabo el cálculo, es necesario calcular los centroides de todos los conjuntos difusos tipo 1 incrustados en el conjunto difuso tipo 2.

Cada uno de los centroides es un número finito, por lo tanto es un conjunto de cálculos que nos lleva a un conjunto de centroides que es conocido como el centro de \tilde{D} , denotado como $C(\tilde{D})$ el cual tiene un valor menor llamado c_l y un valor mayor llamado c_r , de esta manera el calculo del centroide de un conjunto de intervalo tipo 2 se define por la ecuación 4.26 vista en capítulos anteriores

$$C(\tilde{D}) = [c_l(\tilde{D}), c_r(\tilde{D})] \tag{4.26}$$

Donde \tilde{D} es un conjunto de intervalo tipo 2 perteneciente a la parte consecuente de una regla del sistema difuso tipo 2.

Por lo tanto, para calcular $C(\tilde{D})$ solamente es necesario calcular c_l y c_r . No es posible realizar esto de manera aislada, por otra parte el cálculo de c_l y c_r se realiza por medio de dos algoritmos iterativos desarrollados por Karnik y Mendel.

$$c_l = c_l(L) = \frac{\sum_{i=1}^L z_i FPS(\tilde{C}|z_i) + \sum_{i=L+1}^N z_i FPI(\tilde{C}|z_i)}{\sum_{i=1}^L FPS(\tilde{C}|z_i) + \sum_{i=L+1}^N FPI(\tilde{C}|z_i)} \quad (3.15)$$

$$c_r = c_r(R) = \frac{\sum_{i=1}^R z_i FPS(\tilde{C}|z_i) + \sum_{i=R+1}^N z_i FPI(\tilde{C}|z_i)}{\sum_{i=1}^R FPS(\tilde{C}|z_i) + \sum_{i=R+1}^N FPI(\tilde{C}|z_i)} \quad (3.16)$$

En el caso del sistema considerado como ejemplo, los centroides de los dos conjuntos de intervalo tipo 2 de salida estaría dados por:

$$C(\tilde{D}_1) = [c_l(\tilde{D}_1) = 0.69, \quad c_r(\tilde{D}_1) = 1.03]$$

$$C(\tilde{D}_2) = [c_l(\tilde{D}_2) = 5.19, \quad c_r(\tilde{D}_2) = 6.8]$$

$$C(\tilde{D}_3) = [c_l(\tilde{D}_3) = 10.8, \quad c_r(\tilde{D}_3) = 11.2]$$

Una vez que hemos calculado los centroides de los conjuntos de la parte consecuente, es posible obtener el centro de los conjuntos de Z , el cual se denomina como $Zcos(x, y) = [z_l(x, y), z_r(x, y)]$ donde:

$$z_l(x, y) = \min_{\forall I^i \in [l^i, \bar{l}^i]} \left[\frac{\sum_{i=1}^N c_l^i I^i}{\sum_{i=1}^N I^i} \right] \quad (3.17)$$

$$z_r(x, y) = \min_{\forall I^i \in [l^i, \bar{l}^i]} \left[\frac{\sum_{i=1}^N c_r^i I^i}{\sum_{i=1}^N I^i} \right] \quad (3.18)$$

Una vez obtenidos estos datos, se aplicando las ecuaciones 3.17 y 3.18 a este sistema para obtener la salida del sistema difuso tipo 2, a continuación se hace una comparación de los sistemas difusos de tipo 1 y tipo, para observar su funcionamiento y si hay mucha diferencia en este. Las siguientes tablas muestran dicha comparación.

4.6. Diseño del PWM.

En muchas aplicaciones industriales, para controlar el voltaje de salida de los inversores, se necesita con frecuencia 1) hacer frente a las variaciones del voltaje de entrada de cd, 2) regula el voltaje de los inversores y 3) satisfacer los requisitos de control de voltaje y frecuencia constantes. Hay varias técnicas para variar la ganancia del inversor. El método más eficiente de controlar la ganancia (y el voltaje de salida) es incorporar control por modulación por ancho de pulso (PWM) en los inversores. Las técnicas que se usan con frecuencia son [44]:

1. Modulación por ancho de un solo pulso.
2. Modulación por ancho de pulsos múltiples.
3. Modulación por ancho de pulso sinusoidal.
4. Modulación por ancho de pulso sinusoidal modificado.
5. Control por desplazamiento de fase.

En este documento se usara el control por desplazamiento de fase a continuación se le hace mención.

4.6.1. Desplazamiento de fase.

Se puede tener control de voltaje usando varios inversores y sumando los voltajes de salida de los inversores individuales. Se puede concebir que un puente inversor monofásico completo, como el de la figura 4.28, sea la suma de dos puentes inversores en medios como el de la figura 4.29. Un desplazamiento de fase de 180° produce un voltaje de salida como el que se ve en la figura 4.30c, mientras que un ángulo de retardo (o desplazamiento) de α produce una salida como la de la figura 4.30e.

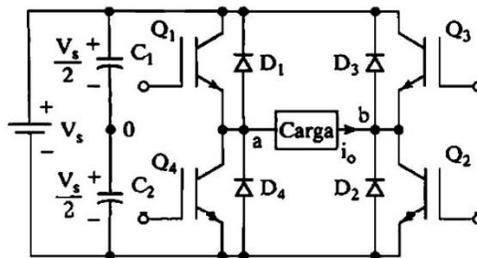


Figura 4-28. Inversor monofásico puente completo.

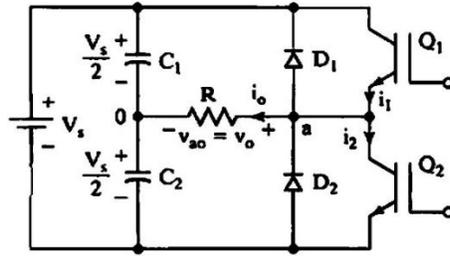


Figura 4-29. Inversor monofásico de medio puente.

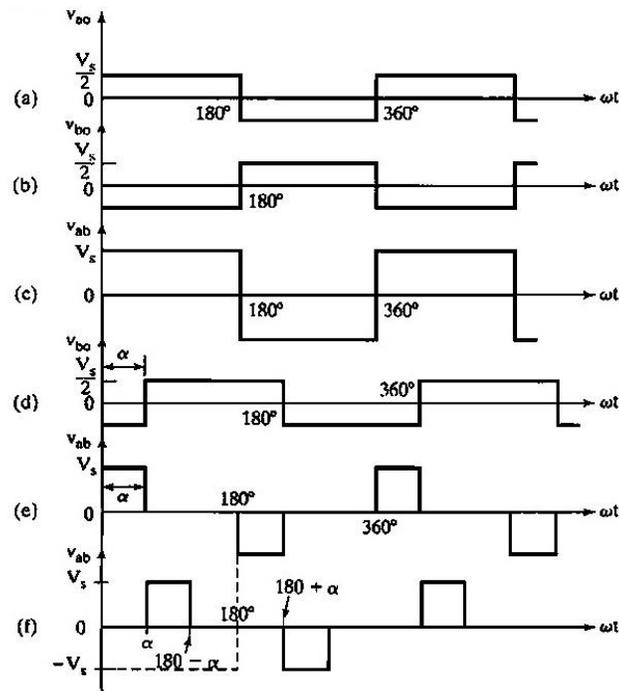


Figura 4-30. Control por desplazamiento de fase.

Por ejemplo, la señal de compuerta g_1 para el puente inversor medio se puede retardar el ángulo α para producir la señal de compuerta g_2 .

El voltaje rms de salida está dado por la ecuación 4.27.

$$V_o = V_s \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \tag{4.27}$$

Si el voltaje de salida en la figura 4.26a está dada por la ecuación 4.28.

$$V_{ao} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{sen } n\omega t \quad 4.28$$

Entonces el voltaje de salida en la figura 4.25b estará dado por la ecuación 4.29.

$$V_{bo} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{sen } n(\omega t - \alpha) \quad 4.29$$

El voltaje de salida instantáneo de salida estará dado por la diferencia del voltaje de salida representada por la figura 4.26a entre el voltaje de salida representado por la figura 4.26b. La ecuación 4.30 representa este voltaje instantáneo.

$$V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} [\text{sen } n\omega t - \text{sen } n(\omega t - \alpha)] \quad 4.30$$

Teniendo en cuenta que $\text{sen } A - \text{sen } B = 2\text{sen } [(A-B)/2] \cos [(A+B)/2]$, la ecuación 4.30 se puede reducir a la ecuación 4.31.

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen } \frac{n\alpha}{2} \cos n \left(\omega t - \frac{\alpha}{2} \right) \quad 4.31$$

El valor rms del voltaje fundamental de salida está dado por la ecuación 4.32.

$$V_{o1} = \frac{4V_s}{\sqrt{2}} \text{sen } \frac{\alpha}{2} \quad 4.32$$

La ecuación (4.39) indica que el voltaje de salida se puede variar cambiando el ángulo de retardo.

Esta clase de control tiene utilidad especial para aplicaciones con grandes potencias que requieren una gran cantidad de dispositivos de conmutación en paralelo.

4.5.2. Simulación del PWM en desplazamiento de fase.

Para simular el desplazamiento de fase se utilizó Simulink Matlab. La frecuencia que el circuito se simulara a 50 Hz, por lo que lo primero que se hizo fue poner una señal triangular que de referencia y configurarle esta frecuencia. La figura 4.31 muestra esta señal.

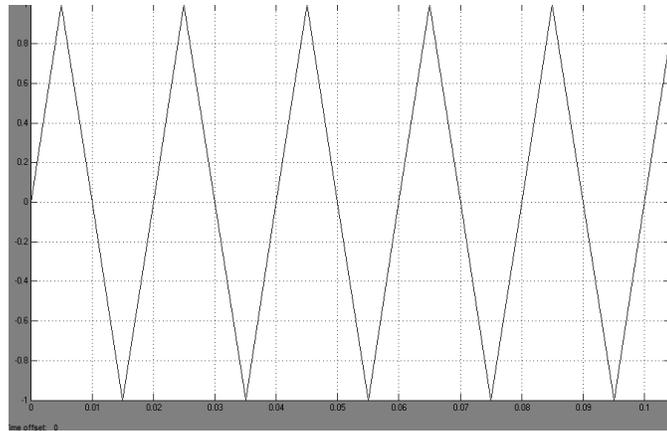


Figura 4-31. Señal triangular de referencia.

Ahora para que el pulso tenga una conducción del 100% como en la figura 4.32a esta señal se compara con un cero, cuando esta sea mayor dará un pulso positivo y cuando sea menor a cero, en la figura 4.32 se puede observar lo mencionado.

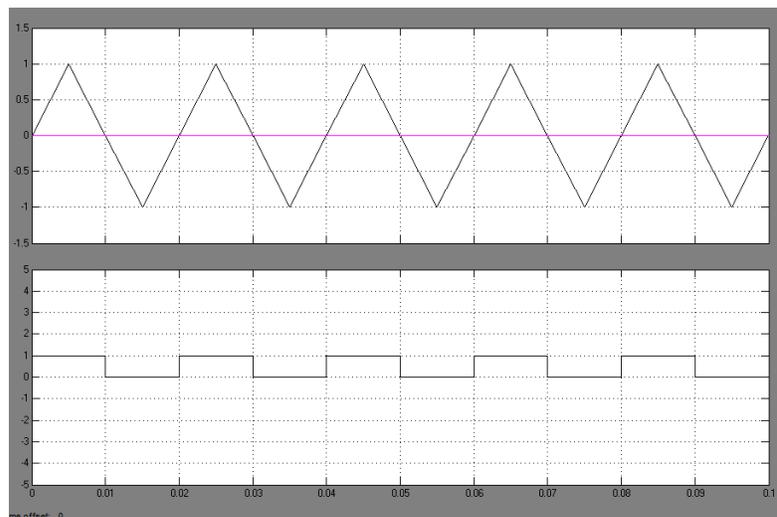


Figura 4-32. Comparación de la señal triangular (arriba) y pulsos de salida (abajo).

Teniendo los pulsos de salida mostrados en la figura 4.32 ahora se requiere establecer la señal de desfase, para ello se necesita una señal diente de sierra, con una frecuencia de 50Hz, como la entrada tiene valores que pueden variar en un rango de 0 a 12 la señal diente de sierra tendrá esta magnitud (figura 4.33)

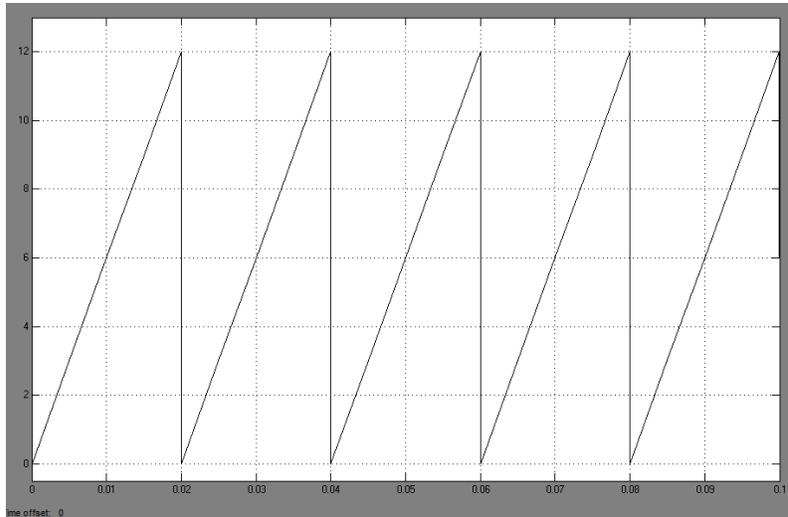


Figura 4-33. Señal diente de sierra.

Debido a que el pulso debe ser 50% (valor de 1) y 50% (valor 0) la señal de referencia será dividida entre 2, así que el máximo valor de referencia para comparar con la señal diente de sierra (fig 4.33) será 6, teniendo en cuenta esto las siguientes figuras muestran la señal de desfase.

Para un valor de entrada de 3 el valor de $\alpha=25\%$ (fig 4.34).

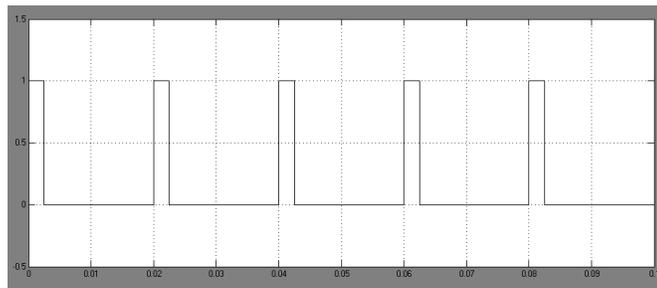


Figura 4-34. Desfase 25%.

Para un valor de entrada de 6 el valor de $\alpha=50\%$ (fig. 4.35).

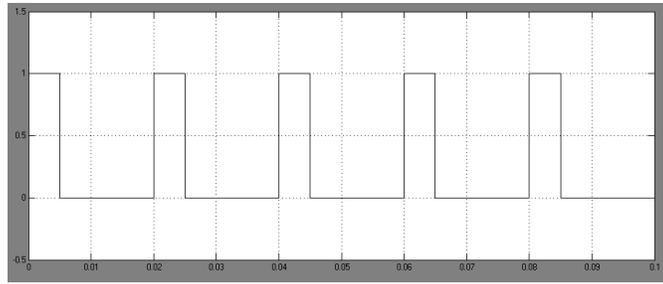


Figura 4-35. Desfase al 50%.

Para un valor de entrada de 6 el valor de $\alpha=100\%$ (fig 4.36).

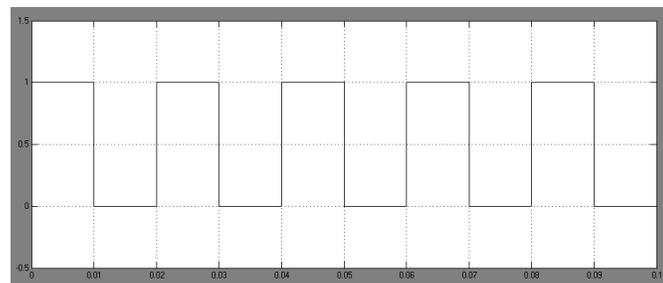


Figura 4-36. Desfase al 100%.

En la figura 4.36 se aplica un desfase del 100%, en el sistema implementado con lógica difusa, esto nunca sucederá debido a que el sistema está programado para que no suceda.

Para realizar el desfase lo primero que se hizo es desfasar la señal diente de sierra (fig. 4.32) un 50% (fig. 4.37).

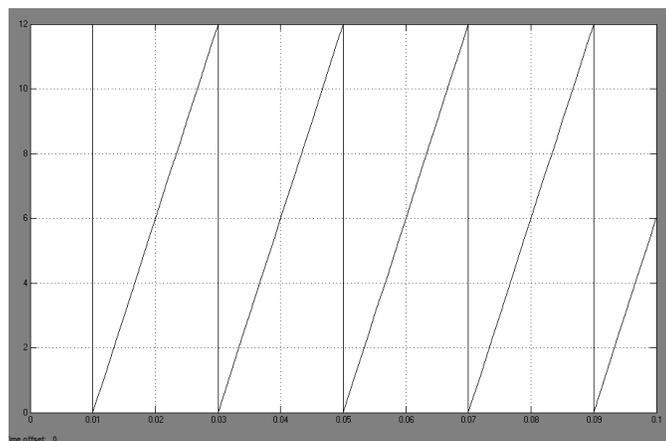


Figura 4-37. Desfase 50% señal diente de sierra.

Una vez desfasada se compara con la señal de referencia así se tendrá un desfase como los mostrados en las figuras 4.34 hasta la figura 4.37 pero iniciando a mitad del ciclo (fig. 4.38).

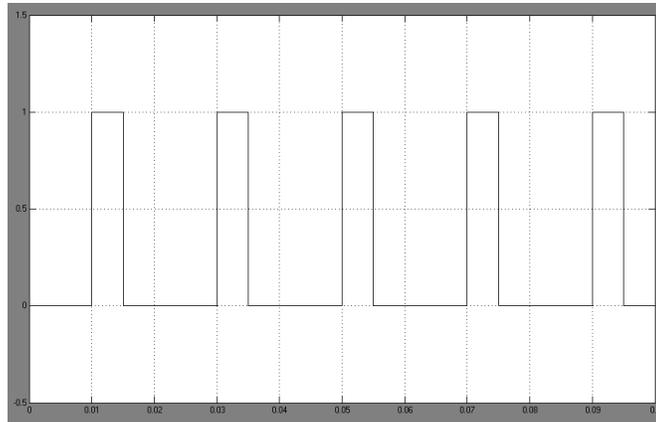


Figura 4-38. Desfase del 50% a medio ciclo.

Teniendo este desfase a medio ciclo (fig 4.38) se une con la señal de salida de la figura 4.30b y el resultado es el mostrado en la figura 4.39.

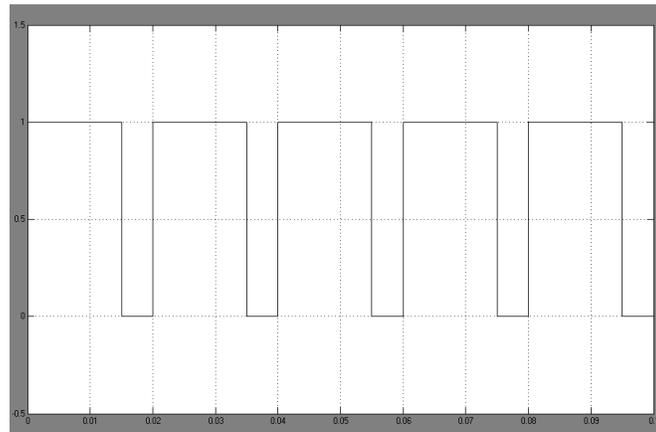


Figura 4-39. Unión de las figura 4.33 y 4.27b.

Ahora se hace la negación del desfase (para el ejemplo se realiza para un 50% fig. 4.35) resultando la figura 4.40.

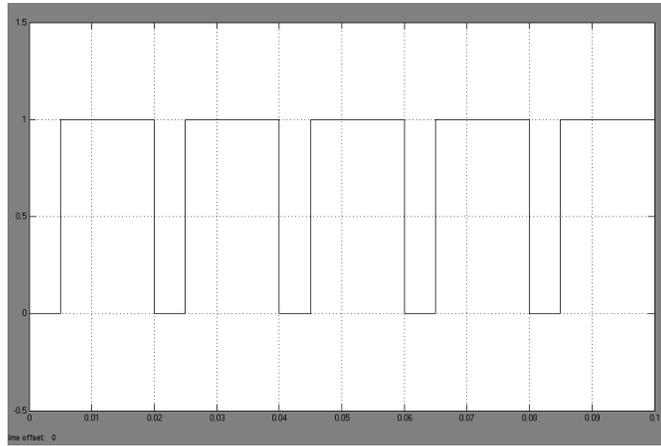


Figura 4-40. Negación del desfase.

Por ultimo estas 2 señales se intersectan para así tener es desfasamiento resultante (fig 4.41).

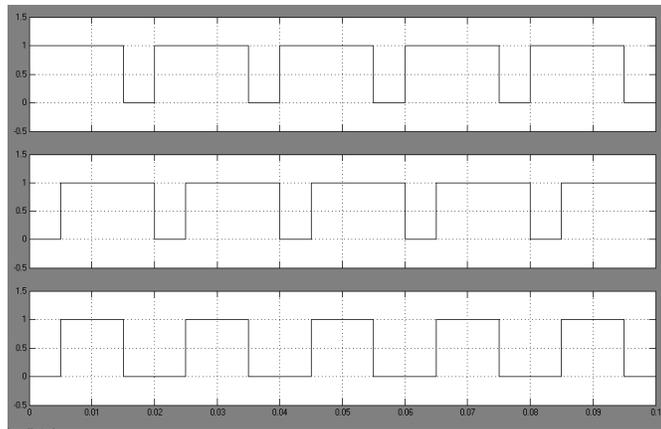


Figura 4-41. Intersección de la fig.4.35 y la fig. 4.36 para hacer el desfasamiento resultante.

La figura 4.42 muestra la señal sin desfasar, el desfase y la señal desfasada.

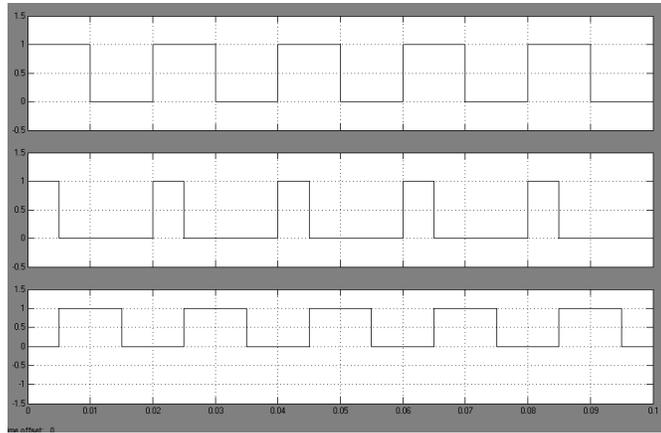


Figura 4-42. Señal sin desfase (arriba), desfasamiento (en medio) y señal desfasada.

La señal sin desfase se quedara fija siempre, esta señal controlara en medio ciclo de 2 IGBT's, la señal desfasada tendrá un mayor o menor desfase dependiendo del valor de la salida del sistema difuso, entre mayor sea su valor mayor será el desfase y viceversa, pudiendo ir desde un desfasamiento 0 hasta 100%, teóricamente, en el sistema difuso se evitó que la salida sea 0 o 100% debido a que estos valores podrían causar problemática en el inversor, pero si llegan a valores cercanos.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Simulación

La simulación es una herramienta que presenta varias ventajas aplicada a todo tipo de procesos y situaciones de la vida industrial y científica. Simulación es el desarrollo de un modelo lógico-matemático de un sistema, de tal forma que se obtiene una imitación de la operación de un proceso de la vida real o de un sistema a través del tiempo. Sea realizado a mano o en una computadora, la simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema; la observación de esta historia mediante la manipulación experimental, nos ayuda a inferir las características operacionales de tal sistema. En la definición anterior se citan dos pasos básicos de una simulación: a) desarrollo del modelo y b) experimentación. El desarrollo del modelo incluye la construcción de ecuaciones lógicas representativas del sistema y la preparación de un programa computacional. Una vez que se ha validado el modelo del sistema, la segunda fase de un estudio de simulación entra en escena, experimentar con el modelo para determinar cómo responde el sistema a cambios en los niveles de algunas variables de entrada [45].

Para la simulación se ocupa Simulink Matlab que es un lenguaje de alto nivel para realizar cálculos científico-técnicos. Integra las herramientas de cálculo necesarias con otras de visualización así como, un entorno de programación de fácil uso.

Para la simulación primero accedemos al programa Matlab (fig. 5.1).

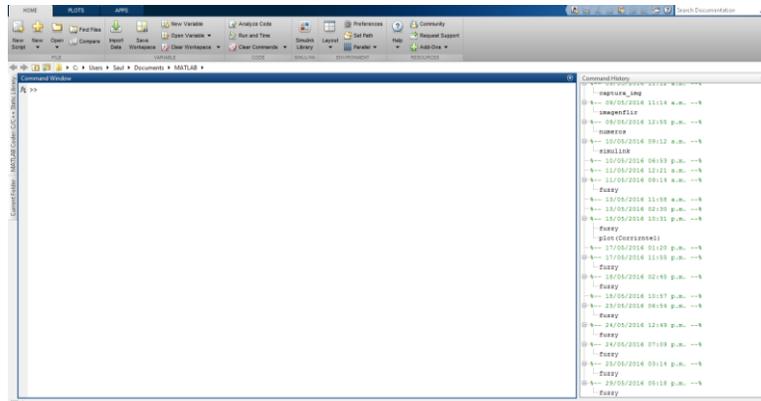


Figura 5-1. Entorno Matlab.

El sistema simulado se muestra en la figura 5.2, el sistema cuenta con 3 constantes las cuales simulan la temperatura de entrada, el nombre de estas 3 constantes son Temp Exterior, Tem Medio y Temp Interior. Esto en referencia de la figura 4.15 en la cual se muestran las capas que se analizaran de la pieza de trabajo, la salida del sistema dependerá del valor de estas temperaturas. El bloque llamado Fuzzy Logic Controller, contiene el sistema difuso mencionada en el capítulo 4, como ya se mencionó anterior mente su salida puede ir desde 0 hasta 12, siendo 12 el valor del 100%. Esta salida va hacia el Bloque llamado PWM1, este bloque son los pulsos que irán hacia los IGB's, Out1 sera un pulso con valor de 50% sin desfase, el Out2 es igual un pulso con valor de 50% pero desfasado, este desfase puede ir desde un 0% hasta un valor de 100%. El siguiente bloque es la simulación del inversor.

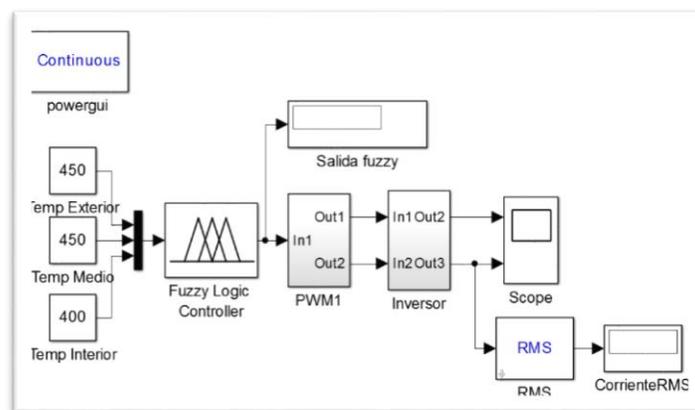


Figura 5-2. Simulación del sistema.

El inversor se puede observar en la figura 5.3, este cuenta con una fuente de 120V de corriente directa cuatro suiches ideales, los cuales son activados con los pulsos del PWM mencionado anteriormente y una carga RLC resonante a 50 Hz.

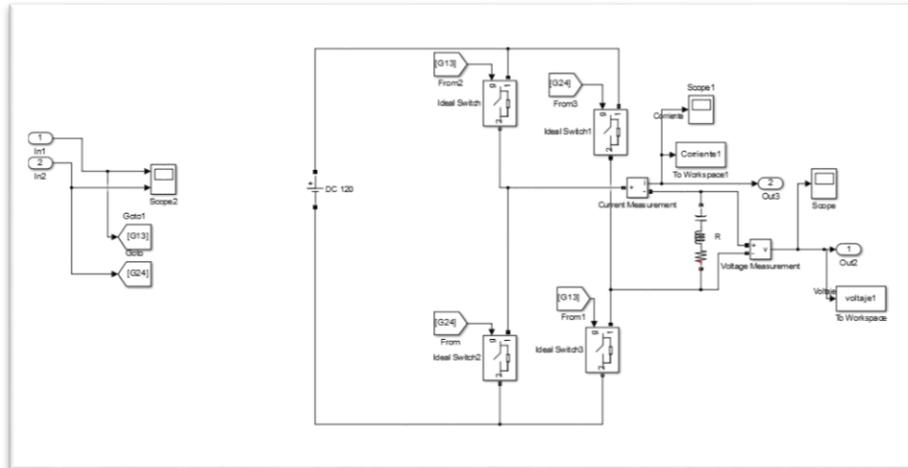


Figura 5-3. Inversor.

El valor de la resistencia para este caso es de 1Ω , el valor del inductor es de $700\mu\text{H}$, en base a esto a continuación se calcula el valor que debe tener el capacitor para que la carga sea resonante. Resonancia es el comportamiento de un circuito con elementos inductivos y capacitivos, para el cual se verifica que la tensión aplicada en los terminales del mismo circuito, y la corriente absorbida, están en fase. Se manifiesta para una o varias frecuencias, dependiendo del circuito, pero nunca para cualquier frecuencia. Las frecuencias de resonancia Pueden determinarse en términos de la inductancia y la capacitancia. La ecuación 5.1 muestra como calcular la frecuencia de resonancia.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad 5.1$$

Donde

- $f = \text{hertz}(Hz)$
- $L = \text{henrys}(H)$
- $C = \text{farasios}(f)$

Teniendo los valores de la capacitancia y de la frecuencia sustituimos esos valores en la ecuación 5.1 quedando de la siguiente manera.

$$50Hz = \frac{1}{2\pi\sqrt{700\mu\text{H}C}}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 700\mu}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 700\mu H (50H)^2}$$

$$C = 14474.455\mu f$$

Con los valores obtenidos se construye el inversor mostrado en la figura 5.3, teniendo todos los elementos mencionados se para a realizar las pruebas correspondientes.

Se compara con un sistema PWM en donde los IGBT's tienen un tiempo donde no conducen ninguno de los 4. A continuación se muestran las pruebas que se hicieron y sus comparaciones. Las entradas de temperatura son variadas de acuerdo a la evolución de calentamiento dentro de la barra de aluminio.

En este primer caso, el inicio del proceso de calentamiento es simulado, donde las temperaturas de entrada son iguales, suponiendo que estos corresponden a temperaturas ambiente (tabla 5.1).

Tabla 5-1. Simulación temperatura ambiente.

Caso 1	Temp. Exterior	Temp. Media	Temp. Interior
	20°	20°	20°

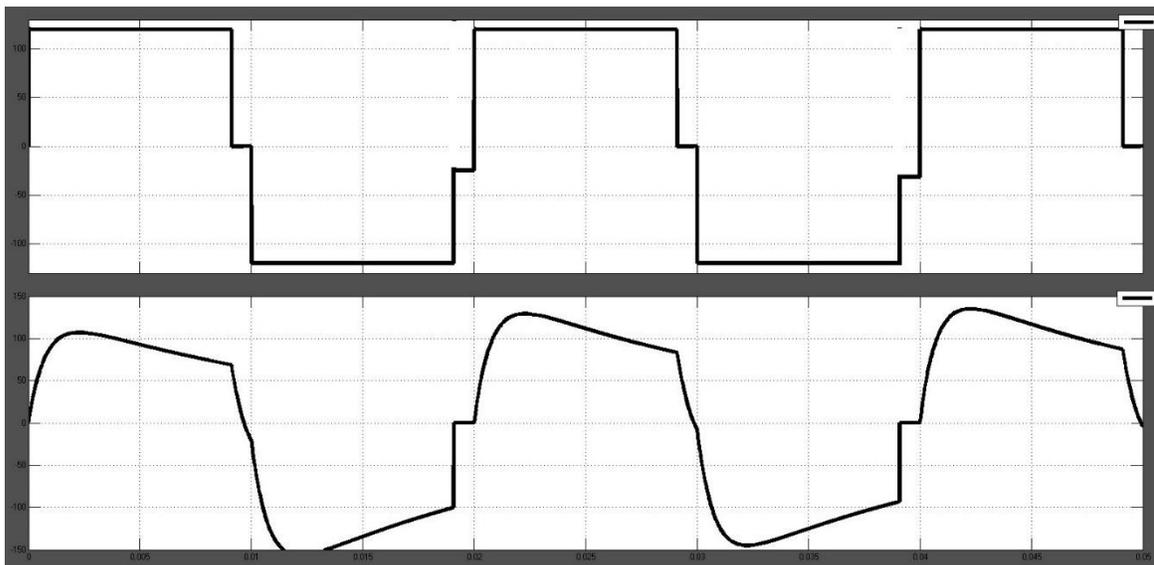


Figura 5-4. Salida de voltaje y corriente para el caso 1 (fuzzy 1).

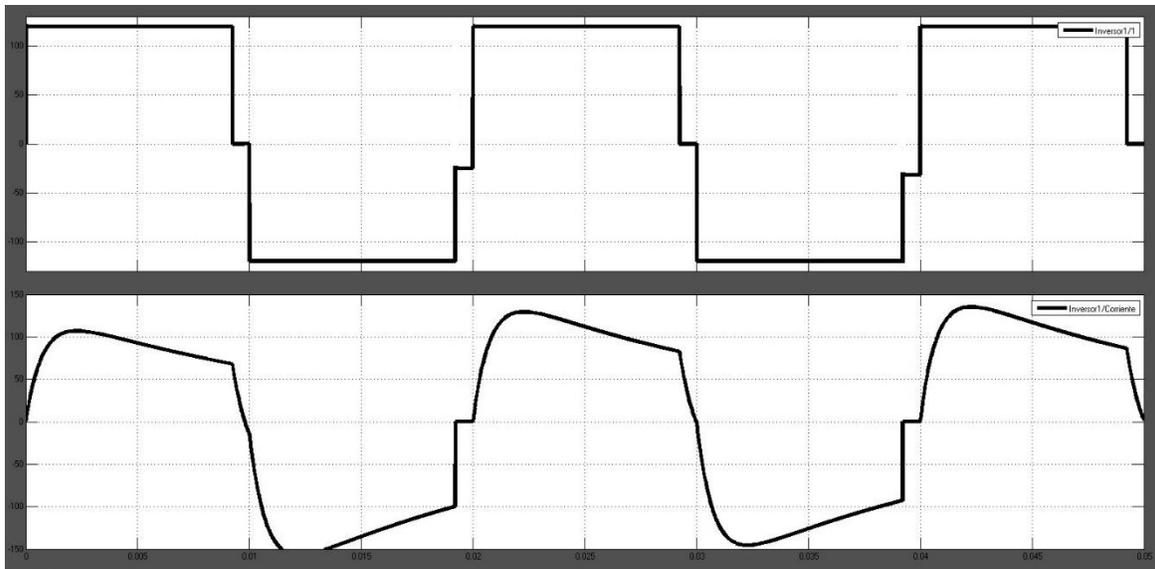


Figura 5-5. Salida de voltaje y corriente para el caso 1 (fuzzy 2)

De acuerdo con el conjunto de reglas difusas, la transmisión de energía debe ser el máximo. En la Fig. 5.4 y 5.5 muestra la tensión de carga tiene una anchura de pulso máximo, como se esperaba. La corriente rms es para el tipo 1 es 110.2 amperios, para el tipo 2 la corriente rms es 111.

En el siguiente caso, la temperatura exterior se ha elevado a 300 °C, y poco a poco el centro de la barra es de 100 ° C, las temperaturas se observan en la tabla 5.2.

Tabla 5-2. Temperatura aumentando en el centro.

Caso 2	Temp. Exterior	Temp. Media	Temp. Interior
	300°	200°	100°

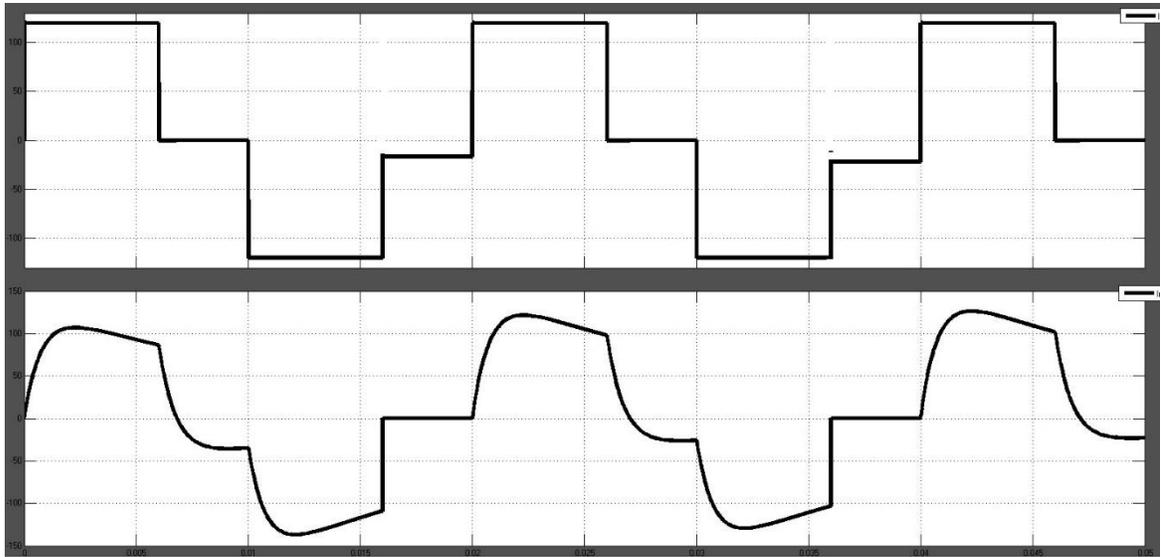


Figura 5-6. Voltaje y corriente a un 60% del ciclo de trabajo (fuzzy 1).

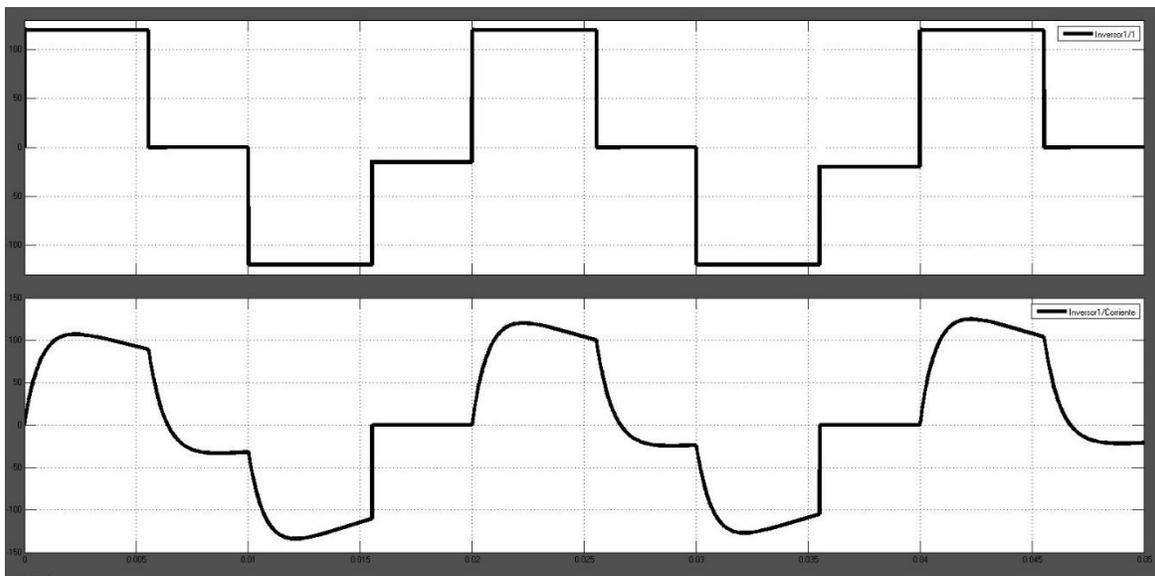


Figura 5-7. Voltaje y corriente a un 60% del ciclo de trabajo (fuzzy 2).

Como se esperaba, la anchura del impulso de tensión se reduce aproximadamente 60 por ciento, como se observa en la Fig. 5.6 y 5.7. La corriente eficaz es 88.41 Amperes para el tipo 1 y para el tipo 2 es de 84.35 Amperes.

En el caso 3, se supone que la temperatura exterior ha alcanzado el máximo permitido esta temperatura se observa en la tabla 5.3.

Tabla 5-3. Máxima temperatura alcanzada (Tem. exterior).

Caso 3	Temp. Exterior	Temp. Media	Temp. Interior
	500°	400°	250°

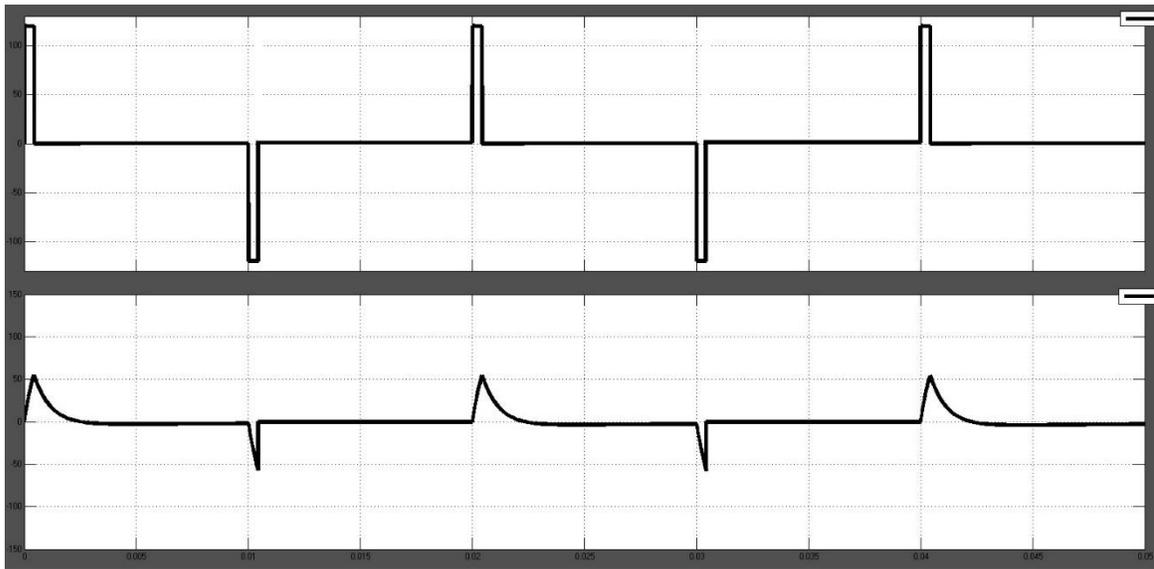


Figura 5-8. Mínimo ciclo de trabajo (fuzzy 1).

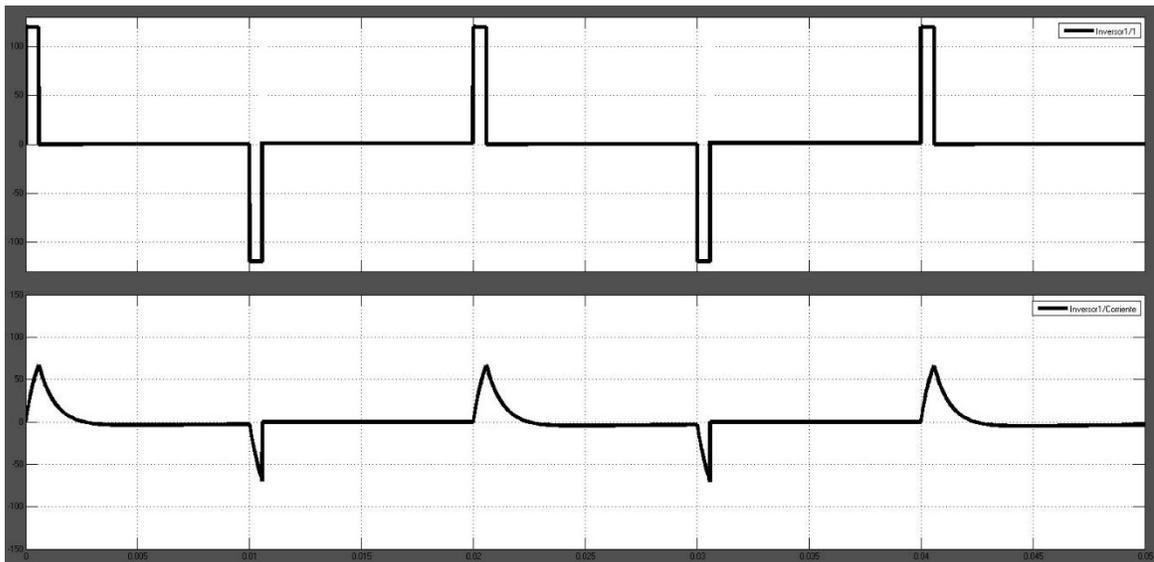


Figura 5-9. Mínimo ciclo de trabajo (fuzzy 2)

De acuerdo con las reglas difusas, la transmisión de energía debe ser mínima, por lo que para dar tiempo a que el calor se transmite desde el exterior hacia el interior del bar. En las

figuras 5.8 y 5.9 Se observa una anchura de pulso mínimo de tensión. La corriente rms para el tipo 1 es de 10.21 amperes y para el tipo 2 es 13.7 Amperes.

Una vez que el calor se transfiere a la pieza de trabajo, la temperatura será homogeneizar tabla 5.4, para el caso del sistema tipo 1 aumenta ligeramente la potencia en el caso del sistema tipo 2 sigue la misma potencia del caso anterior.

Tabla 5-4. Temperatura requerida alcanzada (Tem. exterior).

Caso 4	Temp. Exterior	Temp. Media	Temp. Interior
	450°	450°	400°

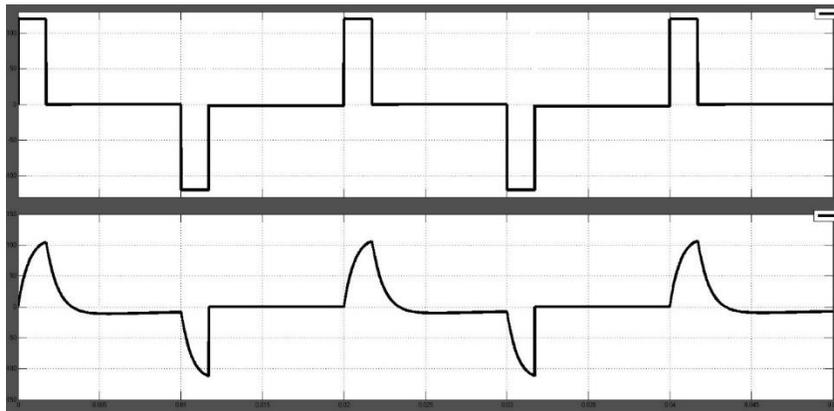


Figura 5-10. Aumento de potencia respecto al caso anterior (fuzzy 1).

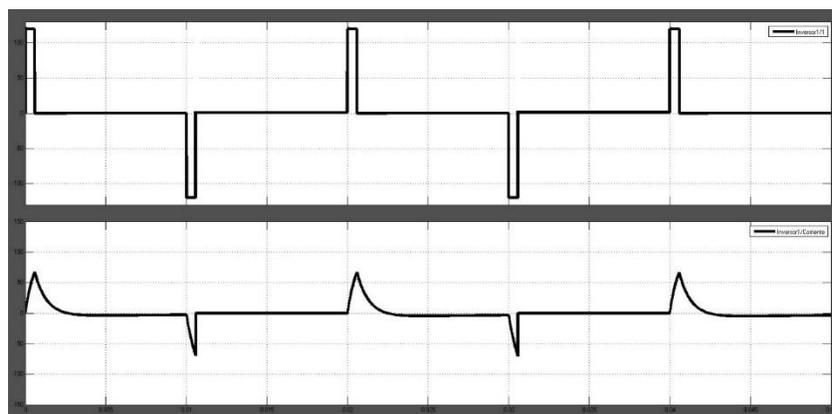


Figura 5-11. Potencia queda igual referente al caso anterior (fuzzy 2).

Figura 5.10 muestra un aumento en la anchura de impulso de tensión, en comparación con el caso anterior la corriente rms para el tipo 1 es de 34 Amperes. La figura 5.11 muestra que la potencia quedo de la misma forma al caso anterior con el sistema difuso tipo 2, la corriente rms para es te caso es 13.7 Amperes.

Aunque los sistemas difusos son diferentes, el comportamiento del voltaje y la corriente a la salida son muy parecidas, la diferencia son casi imperceptibles, siendo la más notoria la del caso número 4. Debido a que hay reglas difusas diferentes entre los 2 sistemas, para el caso del sistema difuso tipo 2 son 12 y para el caso del sistema tipo 1 son 8, no se creía que las salidas variaran tan poco.

Conclusión.

La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos para los procesos y las definiciones altamente no lineales y el conocimiento no estrictamente definido (impreciso o subjetivo).

La transferencia de calor en la pieza de trabajo cuando se calienta con el horno de inducción va desde la región de mayor temperatura a la región con temperatura más baja, referente a la temperatura que se desea alcanzar, no se sabe cuál sea la rapidez con la que se homogenizara en toda la pieza.

Con el fin de que la temperatura a la cual se desea llegar en la pieza de aluminio sea uniforme, al calentarla con el horno de inducción. Se propone un sistema difuso Mamdani tipo 1, debido a su buen desempeño en la toma de decisiones cuando los valores de entrada son vagos o no se tiene una correlación entre estos valores. El sistema difuso se simuló con una división de 3 áreas de la pieza de trabajo (valores de entrada) y una salida.

Con el fin de disminuir el número de reglas del sistema difuso tipo 1 y de igual manera realizar un calentamiento uniforme en la pieza de aluminio, con el horno de inducción. Se propone un sistema difuso tipo 2 Mamdani, pues en él se pueden agrupar 2 funciones de membresía para bajar el número de reglas difusas que el sistema tipo difuso tipo 1 presento. Un sistema difuso tipo 1 y tipo 2 se simuló con una división de 3 áreas de la pieza de trabajo y una salida.

Las reglas difusas para el sistema difuso tipo 1 en total fueron empleadas 81 reglas, esto fue reduciendo a la cantidad mínima posible de reglas, pues el total de reglas que se pueden emplear para el sistema difuso tipo 1 es de 349 reglas, debido a esto y que el control debe de ser en tiempo real se optó por utilizar un sistema difuso tipo 2. El sistema difuso tipo 2 en total puede emplear 27 reglas, de ellas se optó por solo utilizar 12 reglas. Por ello el sistema difuso tipo 2 es más confiable y ocupa menos memoria de cómputo al momento de su procesamiento, y como se vio en este documento los resultados obtenidos con el sistema difuso tipo 1 y el tipo 2 varían muy poco.

La temperatura en las 3 áreas van desde 0 a 500 grados, siendo 450 la temperatura ideal que se quiere alcanzar en estas 3 áreas, debido a que el calentamiento será mayor en el área

externa se tolera que la temperatura en esta área pueda llegar a no más de 500 grados para así poder transferir el calor a las demás áreas, cuando esto sucede el PWM reducirá su porcentaje de acción a un 4.3%. Dependiendo del valor medio de la temperaturas en las 3 áreas, aplicara un porcentaje del PWM, este porcentaje variara de un 4.3% a un 90.8%, el PWM que controla al inversor.

Para tomar una buena lectura de la temperatura con la cámara térmica, no se recomienda tomarla de una forma frontal, debido a que ciertos materiales pueden reflejar la luz de algunos objetos y por ello se toma una medición errónea, para medir la temperatura de este tipo de objetos se debe de hacer en un ángulo aproximado de 45 grados esto evita que se reflejen los objetos, estas lecturas erróneas son más visible en espejos y vidrios en ellos al momento de tomar una lectura se observan imágenes residuales de los objetos que están frente a ellos.

Los resultados de la simulación son los esperados.

Bibliografía

- [1] V. P. Hessler, "Teaching electricity and magnetism," in *Electrical Engineering*, vol. 65, no. 12, pp. 828-833, Dec. 1946. doi: 10.1109/EE.1946.6439992
- [2] Katsuhiko Ogata, "Dinámica de sistemas", Prentice-Hall, Edo. México DF, ISBN 968-880-074-0, 1987
- [3] Ziegler, J. G., and N. B. Nichols, "Process Lags in Automatic Control Circuits", *ASME Trans.* 65 (1943), pp. 433-44.
- [4] Bin Zhou and Wen-Yin Li, "Application of fuzzy theory on gas collector control," *Machine Learning and Cybernetics*, 2003 International Conference on, 2003, pp. 2516-2519 Vol.4. doi: 10.1109/ICMLC.2003.1259937
- [5] Gabriel Gonzalez, "Aplicaciones del calentamiento por inducción electromagnética en el procesamiento de PFV", 2005
- [6] Aida A. Flores, "Sistema de calentamiento por inducción basado en un inversor de medio puente de carga resonante", Cd. obregón Sonora, 2009.
- [7] Kurt Gieck, "Manual de fórmulas técnicas", septiembre 1981, 18a. edición, Editorial Representaciones y servicios de ingeniería, S. A. México.
- [8] Fairchild Semiconductor, "AN-9012: Induction heating system topology review", Application Note.
- [9] F. P. Dawson and P. Jain, "A comparison of load commutated inverter systems for induction heating and melting applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 6, no. 3, pp. 430-441, Jul 1991.
- [10] H. Xue, A. Wu, N. Dong and Z. Yan, "Active disturbance rejection control of refrigeration system," 2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Guilin, 2016, pp. 149-154. doi: 10.1109/WCICA.2016.7578594.
- [11] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdío, "Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2509-2520, May 2014.
- [12] C. Bi, H. Lu, K. Jia, J. Hu and H. Li, "A Novel Multiple-Frequency Resonant Inverter for Induction Heating Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 12, pp. 8162-8171, Dec. 2016. doi: 10.1109/TPEL.2016.2521401.
- [13] S. Dieckerhoff, M. J. Ruan and R. W. De Doncker, "Design of an IGBT-based LCL-resonant inverter for high-frequency induction heating," *Industry Applications Conference*, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, Phoenix, AZ, 1999, pp. 2039-2045 vol.3.
- [14] Barbero, A. J.; Manzanares, J. A.; Mafé, S.; "Induced EMF in a solenoid: a simple quantitative verification of Faraday's law". *Physics Education* 29(1994) 102-105
- [15] Herrán, C.; "Estudio elemental de la inducción electromagnética con un equipamiento de laboratorio asistido por ordenador". *Revista Española de Física* 7 (1993) 44-49.
- [16] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and control*, vol.8, pp 338-353, 1965.
- [17] F. Ma and F. Ma, "An improved fuzzy PID control algorithm applied in liquid mixing system," *Information and Automation (ICIA)*, 2014 IEEE International Conference on, Hailar, 2014, pp. 587-591.
- [18] Ponce C., "Modelling of a Mamdani fuzzy inference system for the diagnosis of electric motors aging", *International Journal of Innovation and Scientific Research* ISSN 2351-8014.
- [19] Mamdani E.H., Assilan S., An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975
- [20] J.M. Mende, "Type-2 Fuzzy Sets and Systems", *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2007, pag.20-29, February.,
- [21] N.N. Karnik, J.M. Mendel, "Centroid of a type-2 fuzzy set", *Information Sciences*, 2001, volume 132, num 5, pag 195-220.
- [22] L.E. Sucar Y G. Gomez "Visión Computacional", Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México.
- [23] J. J. Gibson, "The Ecological Approach to Visual Perception". Boston: Houghton Mifflin, 1979.
- [24] D. Marr, *Vision*. San Francisco: Freeman, 1982.
- [25] Gonzalez, R.C., Woods, R.E. "Digital Image Processing". Addison-Wesley Publishing Company. 1992.
- [26] L. Enrique Sucar, "Visión Computacional", Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México.
- [27] Sebastian Montabone, "Beginning Digital Image Processing" 2010, ISBN-13 (pbk): 978-1-4302-2841-7
- [28] Roger L. Easton Jr, *Fundamentals of Digital Image Processing*. 22 November 2010
- [29] Ray Smith, "Color gamut transform pair", *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, August 1978, p 12-19.
- [30] Nixon M, "Feature Extraction and Image Processing", Academic Press, 2008.
- [31] Nixon M, "Feature Extraction and Image Processing", Academic Press, 2008.
- [32] G. Aarón Estuardo Mórcole, "ESTADÍSTICA Y PROBABILIDADES", Chile 2012

- [33] BAXES, G. A. 1994. *Digital Image Processing - Principles and Applications*. U.S.A. John Wiley & Sons.
- [34] L.E. SUCAR Y G. GOMEZ *Visión Computacional*, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México.
- [35] J. Canny, A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 8(6), pp.679-698, noviembre 1986.
- [36] J. M. S. Prewitt, Object enhancement and extraction, in B.S. Lipkin and A. Rosenfeld (eds.), *Picture processing and psychopictorics*, pp. 75-149, New York: Academic Press, 1970.
- [37] L. G. Roberts, Machine perception of three-dimensional solids, in J. Tippett et al. (eds.), *Optical and electro-optical information processing*, pp. 159-197, Cambridge, MA: MIT Press, 1965.
- [38] Hsueh-Ling Yu, Yih-Lang Li, Tzu-Yi Liao, Tianchen Wang, Yiyu Shi, Shu-Fei Tsai ;“Fast and Accurate Emissivity and Absolute Temperature Maps Measurement for Integrated Circuits”, *Proceedings of the 2014 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*, Taiwan, 2014 IEEE, ISBN: 978-1-4799-6277-8
- [39] M. Runde, “Induction heating of aluminium billets using superconducting coils”, *Physica C 372–376 (2002) 1339–1341*
- [40] Novák, V., Perfilieva, I. and Močkoř, J. (1999) *Mathematical principles of fuzzy logic* Dodrecht: Kluwer Academic. ISBN 0-7923-8595-0.
- [41] Pedrycz, Witold (1993). *Fuzzy control and fuzzy systems (2 ed.)*. Research Studies Press Ltd.
- [42] Vichuzhanin, Vladimir (12 April 2012). "Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction". *Central European Journal of Engineering* 2 (3): 392–398.
- [43] J. S. R. Jang, C. T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing* , Prentice-Hall, 1997.
- [44] Muhammad H. Rashid, “ELECTRÓNICA DE POTENCIA CIRCUITOS, DISPOSITIVOS Y APLICACIONES”.Mexico Tercera edición, Prentice Hall, 2004.
- [45] Azarang M., Garcia E.”SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE MODELOS ESTOCÁSTICOS” Mc. Graw Hill. México.

Anexos.

Constancia de satisfacción.

 **TLAXCALA**
GOBIERNO DEL ESTADO
2 0 1 1 - 2 0 1 6

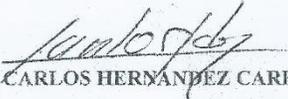
 **20**
Aniversario
UT Tlaxcala

 **XXV**
Instituto de Desarrollo de Tlaxcala
1991-2016

MTRO. FELIPE PASCUAL ROSARIO AGUIRRE
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
P R E S E N T E.

Sea este el medio para hacerle llegar un cordial saludo, de igual manera le hago saber que la Estancia Técnica del alumno, el C. Ing. José Saúl Ortiz Pacheco alumno de la Maestría en Sistemas Computacionales de la Institución que Usted dignamente dirige, desarrolló satisfactoriamente las actividades encomendadas durante su estancia, contando con la asesoría del M. en C. José Luis Hernández Corona, Responsable del Cuerpo Académico de Mantenimiento Industrial, en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo y del Dr. Rafael Ordoñez Flores, profesor investigador del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco , logrando una publicación en la revista: Red-Tes, ISSN 2395-9843 Vol. 3 con título: Determining the emissivity of aluminum to simulate fuzzy systems temperature control in induction furnace, y otra publicación indexada en la revista: Academia Journals, ISSN 1946-5351 Vol. 8 No.2, con título: Control de un motor con lógica difusa, por lo que, por mi parte, no existe inconveniente alguno, para dar por concluido su proyecto de estancia.

Sin otro asunto que tratar por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

ING. CARLOS HERNÁNDEZ CARRILLO
DIRECTOR DE LA CARRERA DE ING. EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL


GOBIERNO DEL ESTADO DE TLAXCALA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
DE TLAXCALA
PROCESOS INDUSTRIALES ÁREA
MANUFACTURA

 **Desarrollo para Todos**
UNA NUEVA REALIDAD


10 AGO 2016
RECIBIDO



Carr. a El Carmen Xalpaclahuaya S/N, Huamantla Tlaxcala.
Tel: 01 247 47 25300 / 01 800 506 3294
www.uttlaxcala.edu.mx

Constancia de liberación de estancias.

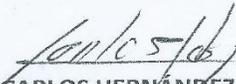


MTRO. FELIPE PASCUAL ROSARIO AGUIRRE
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
P R E S E N T E.

Por medio del presente hago de su conocimiento que el C. Ing. José Saúl Ortiz Pacheco alumno de cuarto semestre de la Maestría en Sistemas Computacionales con número de control M07370441, realizó satisfactoriamente su Estancia Técnica durante el periodo comprendido del 18 de enero al 20 de junio del presente año con horario de lunes a viernes de 08:00 a 16:00 hrs., bajo la supervisión del M. C. José Luis Hernández Corona, en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo de esta casa de estudios.

Sin otro asunto que tratar por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE


ING. CARLOS HERNÁNDEZ CARRILLO

DIRECTOR DE LA CARRERA DE ING. EN MATENIMIENTO INDUSTRIAL



GOBIERNO DEL ESTADO DE TLAXCALA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
DE TLAXCALA
PROCESOS INDUSTRIALES ÁREA
MANUFACTURA

c.c.p. archivo

CHC/thp



Carr. a El Carmen Xalpatlahuaya S/N, Huamantla Tlaxcala.
Tel: 01 247 47 25300 / 01 800 506 3294
www.uttlaxcala.edu.mx

Artículos.

Control de un motor con lógica difusa.

Ing. José Saúl Ortiz Pacheco¹, Dr. Rafael Ordoñez Flores² y
Dr. Roberto Morales Caporal³

Resumen— Los sistemas difusos se emplean en diferentes áreas de la industria. En el siguiente artículo, se presenta la simulación de un esquema de control de velocidad de un motor, empleando el método de inferencia Mamdani empalmándolo con un PID para realizar el control por medio de un PWM y un IGBT, se observará cómo reacciona la velocidad y la corriente, para corregirlas.

Palabras clave—Control Difuso, Velocidad, Motor, Simulación.

Introducción

La mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado. Se han desarrollado métodos automáticos de sintonización y algunos de los controladores PID poseen capacidad de sintonización automática en línea. Actualmente se usan en la industria formas modificadas del control PID. La utilidad de los controles PID estriba en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles. En el campo de los sistemas para control de procesos, tal vez en muchas situaciones específicas no aporten un control óptimo (Katsuhiko, 1987).

Por otro lado la lógica difusa usa otros aspectos. Por ejemplo se considera a una persona como alta si mide más de 1.80mts, pero de igual forma se considera a una persona como alta si mide 1.7999mts. Esta consideración no existe en la lógica tradicional que utiliza demarcaciones estrictas para determinar pertenencia en sets:

La lógica difusa es una extensión de la lógica tradicional que utiliza conceptos de pertenencia de sets más parecidos a la manera de pensar humana. El concepto de un subconjunto difuso fue introducido por L.A. Zadeh (1965) como una generalización de un subconjunto exacto (crisp subset) tradicional. Los subconjuntos exactos usan lógica Booleana con valores exactos como por ejemplo la lógica binaria que usa valores de 1 o 0 para sus operaciones.

La lógica difusa no usa valores exactos como 1 o 0 pero usa valores entre 1 y 0 (inclusive) que pueden indicar valores intermedios (Ej. 0, 0.1, 0.2, ..., 0.9, 1.0, ...etc). La lógica difusa también incluye los valores 0 y 1 entonces se puede considerar como un superset o extensión de la lógica exacta.

Como lo menciona Altrock (1999) en los últimos años los sistemas difusos se han venido consolidando como una herramienta útil para tratar y modelar sistemas complejos y no lineales especialmente en áreas como el control.

Marco teórico

Reglas de Ziegler-Nichols para la sintonía de controladores PID.

Control PID de plantas. Si se puede obtener un modelo matemático de la planta. Si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID (Katsuhiko, 1987).

¹ Ing. José Saúl Ortiz Pacheco es estudiante de la Maestría en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de México, Instituto Tecnológico de Apizaco, Tlaxcala. pacheco_432@hotmail.com

² Dr. Rafael Ordoñez Flores es Profesora de Ingeniería en el Instituto Tecnológico de Apizaco, México rafael.ordonezf@gmail.com

³ Dr. Roberto Morales Caporal es Profesora de Ingeniería en el Instituto Tecnológico de Apizaco, México moralescaporal@hotmail.com

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler-Nichols, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas. Tales reglas sugieren un conjunto de valores de K_p , T_i y T_d que darán una operación estable del sistema, el control PID se observa en la figura 1.

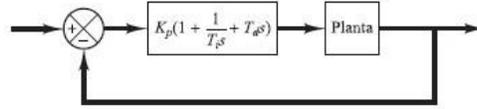


Fig. 1. Control PID de una planta.

Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o sintonía de controladores

La respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental (Figura 2). Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S (Figura 3). Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

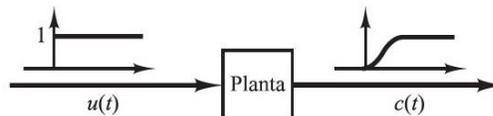


Fig. 2. Respuesta de escalón unitario de una planta

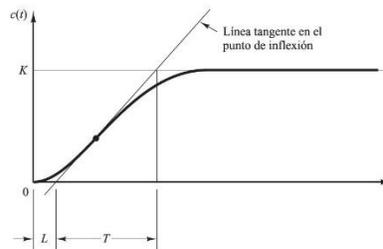


Fig. 3. Curva de respuesta en forma de S.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t)=K$, tal como se muestra en la Figura 3. En este caso, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad 1$$

Ziegler y Nichols (1943) sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9 T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

El controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) = 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad 2$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s=-1/L$.

Sets difusos y funciones de membresía.

La ventaja de este controlador es que no se necesita un modelo exacto del proceso a controlar y no se necesita tampoco la linealidad del sistema a controlar. Este está basado en reglas lingüísticas del tipo Si..Entonces, como funciona la lógica humana (Cleland 1996).

Teniendo un posible rango de valores el cual se llamará U, por ejemplo $U=R^n$, donde R^n es un espacio de n dimensiones, a U se le denomina universo de discurso. En U se tendrá un conjunto difuso de valores llamado F el cual es caracterizado por una función de pertenencia μ_f tal que $\mu_f: U \rightarrow [0,1]$, donde $\mu_f(u)$ representa el grado de pertenencia de un u que pertenece a U en el conjunto difuso F.

Asumiendo que X es un set, un set difuso A en X es asociado con una función característica: $\mu_A(x)$ $\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1]$.

La función característica es típicamente denominada función de pertenencia (membership function).

Si X es una colección de objetos en el cual $x \in X$, un set difuso es un mapa $\mu_F(x): X \rightarrow [0, \alpha]$, en el cual a cada valor x la función $\mu_F(x)$ le asigna un numero entre los valores 0 a α . • El set difuso es el set de pares ordenados: $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$

Función de pertenencia (o membresía).El valor asignado por $\mu_F(x)$ corresponde al grado en el cual el valor x tiene el atributo F. Visto de otra manera la función $\mu_F(x)$ nos indica cual es el grado de pertenencia de x al atributo F. La función $\mu_F(x)$ se llama la función de pertenencia del atributo F. La función tiene que ver con un grado de ambigüedad sobre la característica de la variable que se está midiendo pero no es una probabilidad.

Para el caso de este artículo se usara la función de membresía triangular (figura 4) y trapezoidal (figura 5).

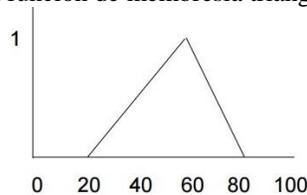


Fig. 4. Función de membresía triangular.

$$\text{Triangular}(x; a, b, c,) = \max \left(\min \left(\frac{x - a}{b - a}, \frac{c - x}{c - b} \right), 0 \right) \quad 3$$

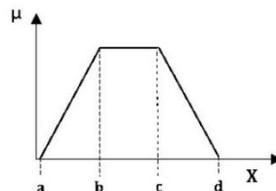


Fig. 5. Función de membresía trapezoidal.

$$\text{Trapexoidal}(x; a, b, c, d) = \max \left(\min \left(\frac{x - a}{b - a}, 1, \frac{d - x}{d - c} \right), 0 \right) \quad 4$$

Término lingüístico. Es una palabra que en el dominio de un determinado lenguaje de uso humano es empleado para hacer referencia a un conjunto difuso implícitamente definido sobre un determinado universo de discurso. En este caso utilizaremos 2 términos para las entradas Velocidad del motor (figura 6) y error (figura 7) y uno para la salida (Figura 8).

Variables Lingüísticas. Es una variable cuyos términos se representan mediante términos lingüísticos. El significado de estos términos lingüísticos se determina mediante conjuntos difusos. Proporcionan una transición gradual de estados. Tienen capacidad para expresar y trabajar con observaciones y medidas de incertidumbre. Una variable lingüística se caracteriza por (fórmula 5):

$$(v, T, X, g, m) \quad 5$$

Donde: v : es el nombre de la variable. T : es el conjunto de término lingüístico de v . X : es el universo de discurso de la variable v . g : es una regla sintáctica para generar términos lingüísticos, y m : es una regla semántica que se asigna a cada término lingüístico t su significado $m(t)$, que es un conjunto difuso.

Se usan variables lingüísticas para analizar y modelar unos sistemas:

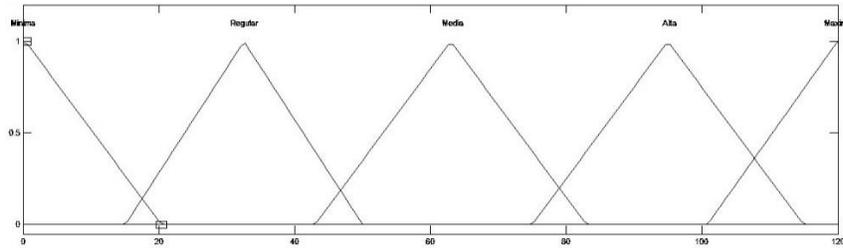


Figura 6. Velocidad del motor

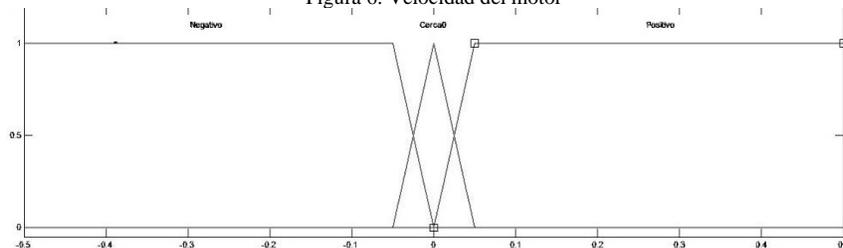


Figura 7. Error motor

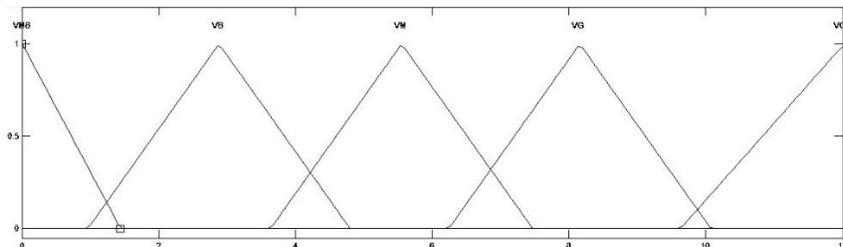


Figura 8. Salida

Para el caso $X = \text{Velocidad del motor}$ (figura 6) se definen set difusos: “Mínima”, “Regular”, “Media”, “Alta”, “Máxima”. Para el caso $X = \text{Error motor}$ (figura 7) se definen set difusos: “Negativo”, “Cerca 0” y “Positivo”. Para el caso $X = \text{Salida}$ (figura 8) se definen set difusos: “VMB”, “VB”, “VM”, “VG”, “VGM”.

Inferencia difusa. Puede definirse como el proceso de obtener un valor de salida para un valor de entrada empleando la teoría de conjuntos difusos. La inferencia de tipo Mamdani es posiblemente el método más ampliamente utilizado. El proceso se realiza en cuatro pasos:

Fuzzificador: la entrada de un sistema de lógica difusa tipo Mamdani normalmente es un valor numérico proveniente, por ejemplo de un sensor; para que este valor pueda ser procesado por el sistema difuso se hace necesario convertirlo a un “lenguaje” que el mecanismo de inferencia pueda procesar. Esta la función del fuzzificador, que toma los valores numéricos provenientes del exterior y los convierte en valores “difusos” que pueden ser procesados por el mecanismo de inferencia. Estos valores difusos son los niveles de pertenencia de los valores de entrada a los diferentes conjuntos difusos en los cuales se ha dividido el universo de discurso de las diferentes variables de entrada al sistema.

Evaluación de las reglas: teniendo los diferentes niveles de pertenencia arrojados por el fuzzificador, los mismos deben ser procesados para generar una salida difusa. La tarea del sistema de inferencia es tomar los niveles de pertenencia y apoyado en la base de reglas generar la salida del sistema difuso.

Agregación de las salidas de las reglas: La base de reglas es la manera que tiene el sistema difuso de guardar el conocimiento lingüístico que le permite resolver el problema para el cual ha sido diseñado. Estas reglas son del tipo IF-THEN.

Una regla de la base de reglas o base de conocimiento tiene dos pares, el antecedente y el consecuente (figura 9).

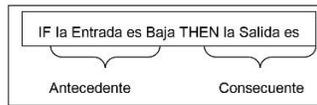


Figura 9. Estructura de una regla difusa

En un sistema difuso tipo Mamdani tanto el antecedente como el consecuente de las reglas están dados por expresiones lingüísticas. La figura 10 muestra la matriz de control para el control.

Vel.Motor / Error	Neg	Cerca 0	Pos
Min	VMB	VMB	VB
Reg	VMB	VM	VM
Med	VB	VG	VG
Alta	VM	VMG	VMG
Max	VG	VMG	VMG

Figura 10. Matiz de control.

Defuzzificación: la salida que genera el mecanismo de inferencia es una salida difusa, lo cual significa que no puede ser interpretada por un elemento externo (por ejemplo un controlador) que solo manipule información numérica. Para lograr que la salida del sistema difuso pueda ser interpretada por elementos que solo procesen información numérica, se debe convertir la salida difusa del mecanismo de inferencia: este proceso lo realiza el defuzzificador:

El centro de gravedad:

$$Z_{COA} = \frac{\int_Z \mu_A(z)z dz}{\int_Z \mu_A(z) dz} \quad 6$$

Donde $\mu_A(z)$ es el grado de pertenencia de z en A y A es el área resultante de la agregación de las partes consecuentes de las reglas de inferencia del sistema. Al ser el centro de equilibrio entre la distribución de los valores agregados, es el método más utilizado.

Modelado

En la figura 11 se observa el modelado del control en Matlab, se utiliza un valor de referencia de 20 rad/seg antes de los 0.4 segundos la velocidad se regula, por lo que se puede concluir que el resultado es adecuado. La desventaja en la implementación de esta técnica es la alta carga computacional. Es por esto que los reportes de control difuso en accionamientos de motores son fundamentalmente en simulación (Uddin, 2003).

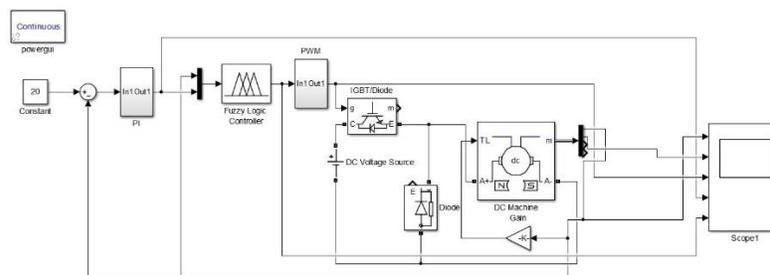


Figura 11. Simulación Matlab.

En la figura 12 se muestra el resultado del control difuso para cuando se tiene una velocidad de referencia de 20 rad/seg, en la figura se observa la velocidad y la corriente de salida.

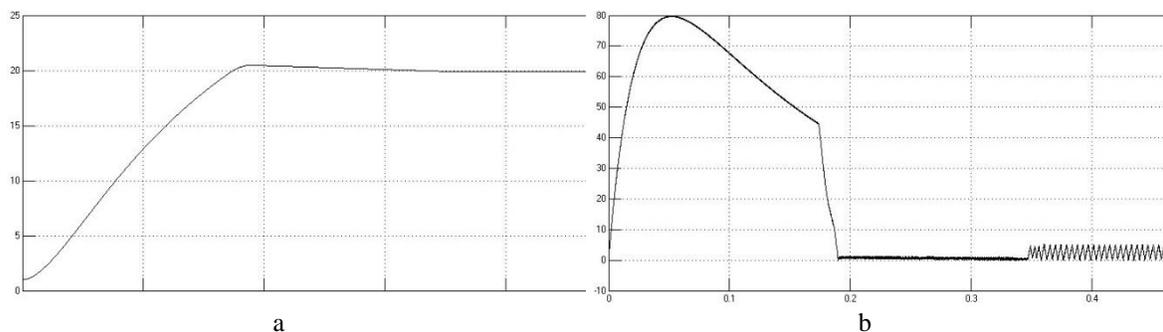


Fig.12. Velocidad (a) y corriente de salida (b).

En la figura 13 se observa el comportamiento del PWM referente a las señales de entrada del control PID y del sistema difuso. Como lo menciona Vass (1993) Cuando se trabaja con motores de grandes potencias la máquina de inducción es alimentada por un inversor a tiristores como fuente de voltaje modulado en ancho de pulso (PWM), cuya frecuencia de conmutación es baja, usualmente en el rango de 100 Hz - 1 KHz

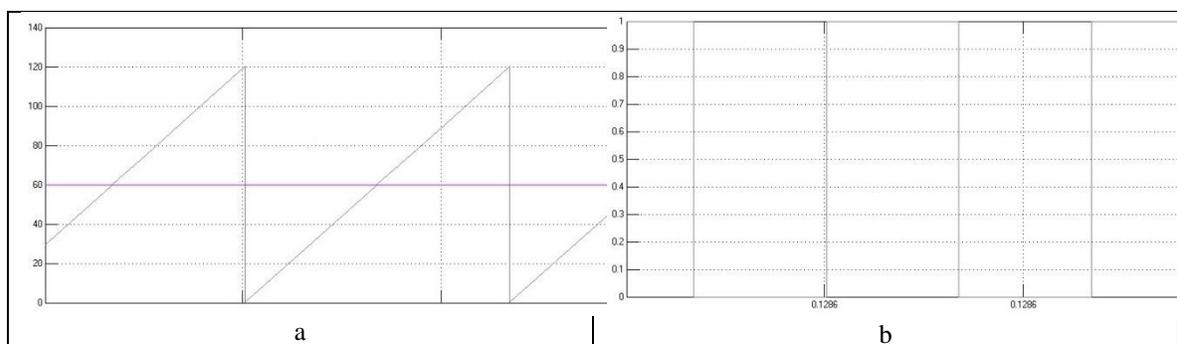


Fig.13.Diente de cierra (a) y PWM de salida hacia el IGBT (b).

Comentarios Finales

La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales y cuando se envuelven definiciones y conocimiento no estrictamente definido (impreciso o subjetivo).

En cambio, no es una buena idea usarla cuando algún modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema, cuando los problemas son lineales o cuando no tienen solución.

Para poder utilizar lógica difusa en el control de un motor al utilizar el IGBT se tuvo que sintonizar un PI y después general un PWM, el PWM se encargó de controlar el suicheo del IGBT, el acoplamiento fue un poco difícil, puesto que la simulación tardaba bastante en mostrar los resultados.

Los resultados fueron buenos y se llegó a los resultados esperados.

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo brindado por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a al Instituto Tecnológico de Apizaco que brindo las facilidades para realizar los estudio de posgrado donde fue planteado el proyecto de investigación.

Referencias

- Katsuhiko Ogata, *dinámica de sistemas*, Prentice-Hall, Edo. México DF, 1987, ISBN 968-880-074-0.
- L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and control*, vol.8, pp 338-353, 1965
- Cornel Lemus, *Simulación de Sistema difuso para el control de velocidad de un motor de CD*, I.S.C., Memoria del 3er congreso de Computo AGECOMP, UAEM, Mexico, ISBN(e) 968-878-205-X, pp 25-34

Vass, P. Vector Control of AC Machines, Oxford University Press, Oxford, 1993.

Cleland, J. and W. Tumer: Fuzzy logic Control of Electric Motor and Motor Drives Feasibility Study. EPA/600/SR-95/175 April, On-Line, 1996.

Uddin, M. N.; T. S. Radwan and M. A. Radhman: Performances of Novel Fuzzy Logic Based Indirect Vector Control for Induction Motor Drive. Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, St. John's NF, Canada, On Line, 2003.

Ziegler, J. G., and N. B. Nichols, «Process Lags in Automatic Control Circuits», *ASME Trans.* **65** (1943), pp. 433-44.

ACADEMIA JOURNALS



OPEN PRO SCIENTIA ET STUDIUM

Primer Congreso Internacional de Academia Journals
en Educación Superior Tecnológica Pública

Tlaxcala 2016

Certificado

otorgado a

Jose Saul Ortiz Pacheco
Rafael Ordoñez Flores
Roberto Morales Caporal

por su artículo intitulado

Control de un motor con lógica difusa

(Artículo No. Tlax256)

el cual fue presentado en el Congreso desarrollado del 16 al 18 de marzo 2016 en Tlaxcala, México,
y publicado en el portal de Internet *AcademiaJournals.com*,
con número de registro **ISSN 1946-5351, VOL. 8, NO. 2**
y en el libro electrónico online con **ISBN 978-1-939982-21-6** intitulado
Compendio de Investigación Academia Journals Tlaxcala 2016

Dr. Rafael Moras
Editor, Academia Journals
Profesor de Ing. Industrial, St. Mary's University



Simulation of a Temperature Fuzzy Control into Induction Furnace

Ordoñez Rafael

Dept. of Electrical & Electronics Engineering
Instituto Tecnológico de Apizaco
Apizaco, Mexico
Rafael.ordonezf@gmail.com

Ortiz J. Saul

Master on Computational Systems
Instituto Tecnológico de Apizaco
Apizaco, Mexico
pacheco_432@hotmail.com

Morales Roberto

Dept. of Electrical & Electronics Engineering
Instituto Tecnológico de Apizaco
Apizaco, Mexico
moralescaporal@hotmail.com

Abstract— This paper presents simulation of a fuzzy control to carried out temperature tracked into an induction furnace implemented with a transistorized inverter. Basically, in this work is shown the fuzzy rules to assure a homogeneous heating in the aluminum bar localized inside to induction coil to arrive to an average temperature of 450° Celsius degrees. This heating method will be used in the extrusion process of aluminum.

Keywords—fuzzy control; temperature; induction heating.

I. INTRODUCTION

The company "Aluminios Atotonilco S.A de C.V." manufactures aluminum structural shapes as sills, angles and others, by means the extrusion process. Today, the company uses gas furnaces to heat up aluminum bars, nevertheless exists some drawbacks: the energetic cost is high, the heating time is long, and the temperature control into aluminum bar is neither precise nor homogenous. These two last drawbacks cause illage of aluminum during its extrusion. Therefore, it was decided to change the induction furnace instead of a gas furnace, and so, temperature could be controlled accurately and uniformly.

The most important heat treatment parameter is the temperature. Hence, it is essential to have a good temperature monitoring and control technique suitable for high precision. A traditional PID control is compared with a variable universe fuzzy control where the latter control showed better performance; however use two fuzzy controllers [1]. To obtain uniformity in the temperature profile across a long workpiece, a zone-control system is used which consists of multiple working coils a multiple inverters to control the amplitude and phase angle of each coil current [2]. Temperature control on a vacuum induction heating furnace is presented. This is based on the Smith predictive compensation combined with fuzzy PID control, system with time delay compensation but makes the control structure more complex [3].

According to the literature reviewed, it is found that the temperature control is performed using optical sensors and positioned so to take the sample temperature at a single point of the bar. This technique is suitable for heating metals such as steel and for temperatures above 600° Celsius degrees, since steel emits high light radiation, and the heating time is very short, which causes a fairly uniform heating.

For the case of aluminum, the temperature required to heat, this does not emit enough radiation to the optical sensor to acquire a correct temperature, and also heating bar is progressive from the outside to inwards, so can happen the surface is 500°C degrees and the center of the bar is at 300°C degrees.

It is therefore required to implement an intelligent control which, based on the temperature reading at three different points, takes different decisions to adequately transmit the power of the induction coil to the aluminum bar by means the inverter.

Fuzzy logic is selected in this temperature control because is a form of many-valued logic in which the truth values of variables may be any real number between 0 and 1, considered to be "fuzzy". By contrast, in Boolean logic, the truth values of variables may only be 0 or 1. Fuzzy logic has been extended to handle the concept of partial truth, where the truth value may range between completely true and completely false. [4] Then, a fuzzy control system is a control system based on fuzzy logic—a mathematical system that analyzes analog input values in terms of logical variables that take on continuous values between 0 and 1, in contrast to classical or digital logic, which operates on discrete values of either 1 or 0 (true or false, respectively). [5]

II. FUZZY CONTROL SYSTEM

A. Basics of Fuzzy Control

Fuzzy controllers are very simple conceptually. They consist of an input stage, a processing stage, and an output stage. The input stage maps sensor or other inputs, such as switches, thumbwheels, and so on, to the appropriate membership functions and truth values. The processing stage invokes each appropriate rule and generates a result for each, then combines the results of the rules. Finally, the output stage converts the combined result back into a specific control output value.

The most common shape of membership functions is triangular as is shown in Fig 1, where a, b and c are parameters

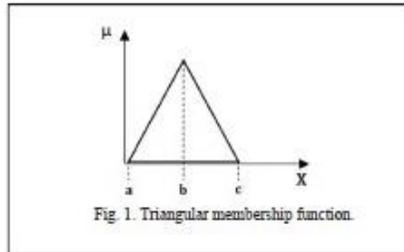


Fig. 1. Triangular membership function.

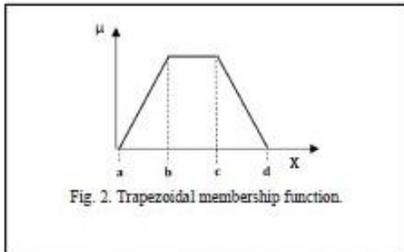


Fig. 2. Trapezoidal membership function.

that forms the function in (1), and X is a variable belonging to the universe of discourse X. The trapezoidal shown in Fig. 2, is given by the following equation where a, b, c and d are the parameters that forms this function in (2), and X is a variable belonging to the universe of discourse X [6]. Bell curves are also used, but the shape is generally less important than the number of curves and their placement. From three to seven curves are generally appropriate to cover the required range of an input value, or the "universe of discourse" in fuzzy jargon.

$$\text{Triangular}(x; a, b, c) = \max(\min((x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)), 0) \quad (1)$$

$$\text{Triangular}(x; a, b, c) = \max(\min((x-a)/(b-a), 1, (d-x)/(d-c)), 0) \quad (2)$$

As discussed earlier, the processing stage is based on a collection of logic rules in the form of IF-THEN statements, where the IF part is called the "antecedent" and the THEN part is called the "consequent". Typical fuzzy control systems have dozens of rules. [7]

Tecnológico Nacional de México is sponsor under project 5306.15-P, and CONACyT by Master scholarship.

B. Applying Truth Values

Sets define a universe of discourse containing sets whose edges are well defined; an element may or may not belong to a certain set. The concept of fuzzy set is associated with a particular linguistic value, defined by a word or linguistic label, where this is the name of the set. For each set a membership function or membership called $\mu_A(x)$ is defined, it indicates the degree to which the variable x is included in the concept represented by the label A in (1).

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \quad (3)$$

If the function takes the value 0 means that such value of x is not included in A and if set to 1 the corresponding value of x is absolutely included in A. Fig. 3 shows an example where the set (variable x) is subdivided into subsets {cold, warm, hot}, with their respective membership functions in (4).

A basic application might characterize various sub-ranges of a continuous variable. For instance, a temperature measurement for anti-lock brakes might have several separate membership functions defining particular temperature ranges needed to control the brakes properly. Each function maps the same temperature value to a truth value in the 0 to 1 range. These truth values can then be used to determine how the brakes should be controlled. Fig. 3 shows an example of membership functions of temperature.

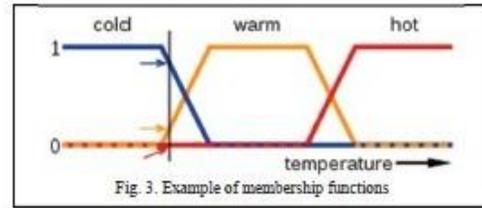


Fig. 3. Example of membership functions

$$\{\mu_{\text{cold}}(x), \mu_{\text{warm}}(x), \mu_{\text{hot}}\} \quad (4)$$

Let X be a collection of objects, expressed generically by x. Then, a fuzzy set A in X, is defined as a set of ordered pairs in (5).

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad (5)$$

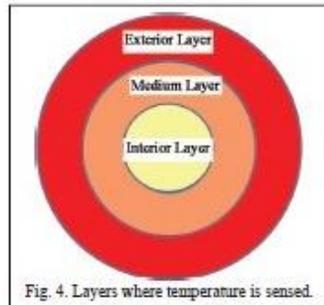
Fuzzy logic temperature:

In this image, the meanings of the expressions cold, warm, and hot are represented by functions mapping a temperature scale. A point on that scale has three "truth values" — one for each of the three functions. The vertical line in the image represents a particular temperature that the three arrows (truth values) gauge. Since the red arrow points to zero, this temperature may be interpreted as "not hot". The orange arrow (pointing at 0.2) may describe it as "slightly warm" and the blue arrow (pointing at 0.8) "fairly cold".

Under this concept, the rules for the aluminum heating were established.

C. Establishment of Rule Set

The rules were established from the next way. In Fig. 4 is shown transversal area of aluminum bar where it can observe three layers (exterior, medium and interior) which indicate the three places where temperature is sensed. A Thermal Imager will be used to sense temperature.



It is necessary to note that the heating in the bar originates in the exterior layer and gradually it penetrates into the interior layer.

Since the heating time should be short, and heating should be uniform, once the outer layer reaches 500°C degrees maximum, the inverter should stop energizing the induction coil to wait for the heat to penetrate to the center of the piece of aluminum in order to homogenizing the temperature.

This will reduce the temperature of the exterior layer and will increase the temperature of the inner layers; then, inverter again energize the induction coil to increase the temperature of the outer layer again, and the process will continue until to reach a standard temperature of 450°C degrees.

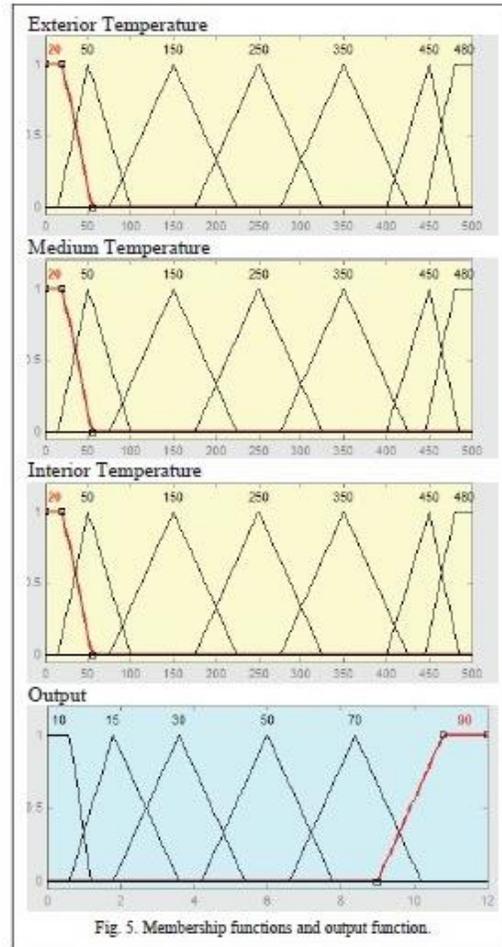
The layers are abbreviated as EL (external layer), ML (medium layer), and IL (internal layer). The inputs are three temperature samples and the output is the percentage of the pulse width modulation of the inverter.

The rule set includes 81 rules, such as:

- Rule 1: IF (EL is 20) AND (ML is 20) AND (IL is 20)
THEN (output is 10)
- Rule 11: IF (EL is 250) AND (ML is 20) AND (IL is 20)
THEN (output is 15)
- Rule 25: IF (EL is 350) AND (ML is 250) AND (IL is 20)
THEN (output is 30)
- Rule 47: IF (EL is 450) AND (ML is 350) AND (IL is 250)
THEN (output is 70)
- Rule 74: IF (EL is 480) AND (ML is 450) AND (IL is 450)
THEN (output is 90)
- Rule 80: IF (EL is 480) AND (ML is 480) AND (IL is 450)
THEN (output is 90)

The Fig. 5 shows the membership functions of the three inputs and the output.

All 3 inputs will be taken from a thermographic camera FLIR, Fig. 6; this camera takes pictures as shown in Fig. 7, in a



jpg format, so these images can be easily treated to obtain the desired values.



A system of pattern recognition to read the temperature values of the 3 points, which will be introduced to the fuzzy

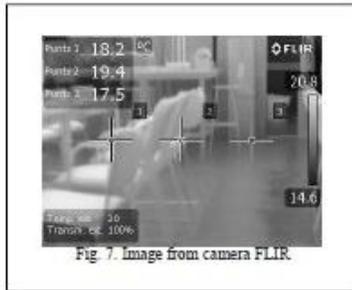


Fig. 7. Image from camera FLIR.

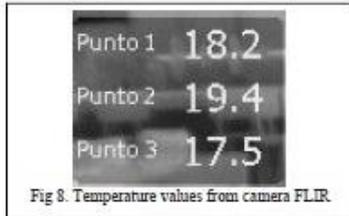


Fig. 8. Temperature values from camera FLIR.

system, was used. In Fig. 8 shows the measured temperatures at the 3 points.

The system used is a Mamdani fuzzy inference system. The system is based on the concepts of fuzzy sets, linguistic rules in the form of IF-THEN mentioned earlier, and a system of fuzzy reasoning based on fuzzy logic. The figure 9 shows the Mamdani fuzzy system.

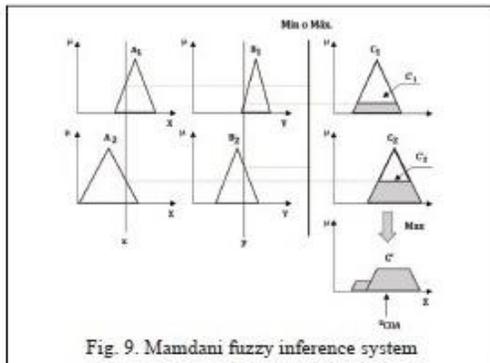


Fig. 9. Mamdani fuzzy inference system

The Mamdani method how min-max is used, the composition of the inference rules are given by the intersection operator T-norm min in (6), by the union operator S-conorm max in (7) and the aggregation method outputs is the maximum method in (8).

$$T_n(x,y)=\min(x,y) \quad (6)$$

$$S_n(x,y)=\max(x,y) \quad (7)$$

$$\mu_c(z)=\text{Max}(\mu_{c1}(z), \mu_{c2}(z), \mu_{c3}(z), \dots, \mu_{cn}(z)) \quad (8)$$

In order to obtain a rigid output value of such a system, it is necessary to use a defuzzyfier. For the rigid system output value as the center of gravity method is used in (9)

$$Z_{COA} = \frac{\int \mu_A(x) x dx}{\int \mu_A(x) dx} \quad (9)$$

Where $\mu_A(z)$ is the membership degree of z in A and A is the area resulting from the aggregation of the consequent parts of the rules of inference system. Being the center of balance between the distributions of the added values, it is the preferred method.

The Fig. 7 shows the thermomagnetic image of the transversal area of aluminum bar. In this image, it can see the three areas considered for sensing temperature.

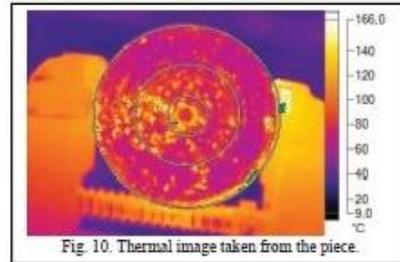


Fig. 10. Thermal image taken from the piece.

III. SIMULATION RESULTS

The power electronics stage consists of a voltage fed inverter as is shown in Fig. 11. This inverter will be fed from a three phase uncontrolled rectifier (in simulation it is not shown.)

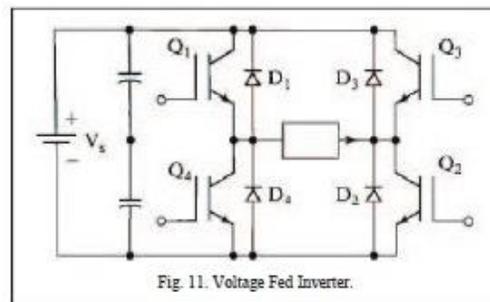


Fig. 11. Voltage Fed Inverter.

The PWM generator compares the reference signal from the fuzzy logic controller with a sawtooth modulation signal.

The induction load is simulated by a series resistive-inductive branch; it is compensated by means a capacitor to obtain a resonant load. The switching frequency is 50 Hz

Mathlab Simulink is used to simulate the circuit. The schematic is shown in Fig. 12. The inputs named as Exterior, Medium and Interior are temperatures sensed from the bar.

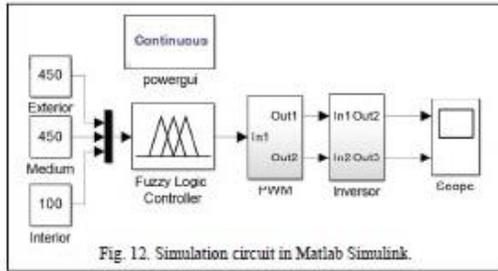


Fig. 12. Simulation circuit in Matlab Simulink.

Some cases were simulated to verify the operation of the control theoretical approach. The temperature inputs are varied according to the evolution of heating within the aluminum bar.

	Exterior Temp.	Medium Temp.	Interior Temp.
Case 1	20°	20°	20°

In this first case the start of the heating process is simulated, where the input temperatures are equal, assuming that these correspond to ambient temperatures.

According to the fuzzy rules set, power transmission should be the maximum. In Fig. 13 shows the load voltage has a maximum pulse width, as expected. The rms current is 103.6 Amperes.

	Exterior Temp.	Medium Temp.	Interior Temp.
Case 2	300°	200°	100°

In this case, the exterior temperature has risen to 300°C degrees, and gradually the center of the bar is 100°C degrees. As expected, the width of the voltage pulse is decreased approximately 60 percent, as is observed in Fig. 14. The rms current is 77.69 Amperes.

	Exterior Temp.	Medium Temp.	Interior Temp.
Case 3	500°	400°	250°

In case 3, it is assumed that the exterior temperature has reached the maximum allowable; according to the fuzzy rules, power transmission must be minimal, so to allow time for the heat to be transmitted from outside to inside the bar. In Fig. 15

a minimum pulse width of voltage is observed. The rms current is 5.8 Amperes.

	Exterior Temp.	Medium Temp.	Interior Temp.
Case 4	450°	450°	400°

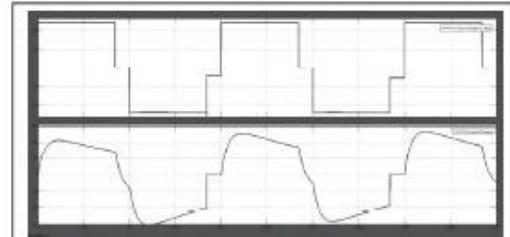


Fig. 13. Load current and load voltage at maximum duty cycle.



Fig. 14. Load current and load voltage at 60% of duty cycle.

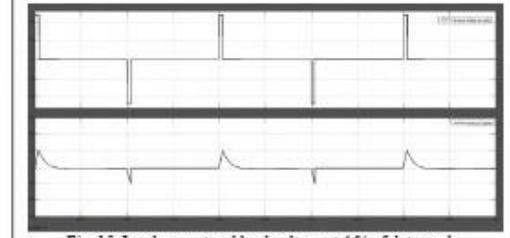


Fig. 15. Load current and load voltage at 4% of duty cycle.

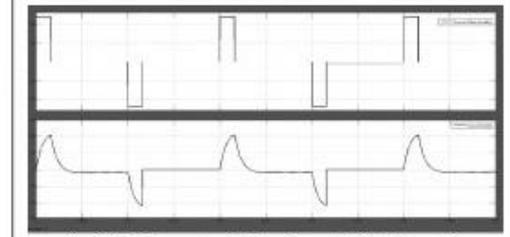


Fig. 16. Load current and load voltage at 23% of duty cycle.

Once the heat is transferred into the workpiece, the temperature will homogenizing, and is necessary to slightly increase the power to keep warming the bar. Fig. 16 shows an

increase in the voltage pulse width, compared with the previous case. The rms current is 33.52 Amperes.

IV. CONCLUSIONS

The temperature control in the heating of metals has always been discussed in principle by the problem itself to measure the temperature. We think that taking data from a thermographic image is better. Subsequently, it was decided to select the fuzzy control given the evolution of heating in an aluminum bar where heating speed, accuracy and temperature uniformity is required; so this control offers a wide range of decisions to be taken to achieve the established requirements.

Fuzzy logic is used when the complexity of the process involved is very high and there are no accurate mathematical models for highly nonlinear processes and definitions and knowledge not strictly defined (imprecise or subjective).

Heat transfer in the workpiece is carried out in the region of higher temperature to lower temperature, but do not know how fast this homogenizes.

In order to homogenize the temperature in the heated aluminum bar with induction furnace, the Mamdani fuzzy system is proposed due to its good performance.

The temperature measured in the 3 points ranging from 0 to 500° Celsius degrees. These temperature values modulate from 4.3% to 90.8% maximum the PWM applied to the inverter.

The simulation results are as expected.

REFERENCES

- [1] Yiwang Wang, Fenwen Cao, "Induction heating power supply temperature control based on a novel fuzzy controller," in International Conference on Computer and Electrical Engineering, ISBN 978-0-7695-3504-3, IEEE Computer Society, pp. 615-618, 2008.
- [2] Ha Ngoc Pham, Hideaki Fujita, Naoki Uchida and Kasuhiro Ozaki, "Heat distribution control using amplitude and phase angle in zone-control induction heating systems," ISBN 978-1-4673-0803-8, pp. 2474 - 2481, 2012.
- [3] Ningning Teng and Jian Zhang, "Vacuum induction heating furnace temperature control system based on Smith fuzzy-PID," in Proc. International Conference on Mechatronics and Control (ICMC), ISBN 978-1-4799-2538-4, pp. 2207-2210, Jinzhou, China, 2014.
- [4] Novák, V., Perfilieva, I. and Močkoř, J. (1999). *Mathematical principles of fuzzy logic* Dordrecht: Kluwer Academic. ISBN 0-7923-8595-0.
- [5] Pedrycz, Witold (1993). *Fuzzy control and fuzzy systems* (2 ed.). Research Studies Press Ltd.
- [6] Ponce C., Perfecto Malaquias P. and Hernández J., "Modelling of a Mamdani fuzzy inference system for the diagnosis of electric motors aging," in International Journal of Innovation and Scientific Research, ISSN 2351-8014.
- [7] Vichuzhanin, Vladimír (12 April 2012). "Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction". *Central European Journal of Engineering* 2 (3): 392–398. doi:10.2478/s13531-012-0003-7.

Determining the emissivity of aluminum to simulate fuzzy systems temperature control in induction furnace.

Determinación de la emisividad del aluminio para la simulación de sistemas difusos de control de temperatura en horno de inducción.

*Ortiz J. Saul*¹, *Hernandez J. Luis*² *Ponce S. Carlos*³, *Ordoñez Rafael*⁴,

Master on Computational Systems^{1,3}
Dept. of Electrical & Electronics Engineering⁴
Instituto Tecnológico de Apizaco, Mexico^{1,3,4}

Universidad Tecnológica de Tlaxcala²
Cuerpo Académico de Mantenimiento Industrial UTT²

pacheco_432@hotmail.com¹, coronahluis@hotmail.com² ssergio_7898@hotmail.com³,
Rafael.ordonezf@gmail.com⁴,

Resumen: En este trabajo se presenta la simulación de 2 sistemas de control difuso que lleva a cabo un seguimiento de temperatura en un horno de inducción implementado con un inversor de transistores. Los controles generan diferentes PWM, uno de ellos es un desplazamiento de fase. Así como la determinación de la emisividad de la barra de trabajo. En este trabajo se muestran las reglas difusas para asegurar un calentamiento homogéneo en la barra de aluminio localizada en el interior de la bobina de inducción para llegar a una temperatura media de 450 ° C. Este método de calentamiento se utilizará en el proceso de extrusión de aluminio.

1. Introducción.

En la actualidad, las máquinas de inducción alimentados por convertidores son omnipresentes en muchas áreas. Aunque la mayoría de las unidades son relativamente eficientes, siempre existe la presión para reducir las pérdidas de potencia y el costo de accionamiento de la máquina [1].

Aun hoy en día algunas empresas utiliza hornos de gas para calentar barras de aluminio, este tipo de calentamiento tiene diversos inconvenientes tales como: el costo energético es alto, el tiempo de calentamiento es largo, y el control de la temperatura en la barra de aluminio no es preciso, ni homogéneo. Estos dos últimos inconvenientes causan espacio vacío de aluminio durante su extrusión. Por lo tanto, se decidió cambiar el horno de gas para un horno de inducción, para poder controlar la temperatura con precisión y de una manera uniforme.

Algunos controles de la temperatura son realizados usando sensores ópticos, estos al ser colocados solo pueden tomar la lectura de un único punto de la barra. Esta

Abstract: In this paper the simulation of 2 systems of fuzzy control that carries out a temperature monitoring in an induction furnace implemented with a transistor inverter is presented. The controls generate different PWM, one of them is a phase shift. As well as determining the emissivity of the aluminum bar. This paper shows the fuzzy inference rules to ensure an homogeneous heating in the aluminum bar localized inside the induction coil to reach an average temperature of 450°C. This heating method will be used in the aluminum's extrusion process.

1. Introduction.

At present induction machines fed by converters are ubiquitous in many areas. Although most of the units are relatively efficient, there is always the pressure to reduce power losses and the cost of the machine drive [1].

Even today some companies use gas furnaces for heating aluminum bars, such heating has several drawbacks such as: the energy cost is high, the heating time is long, and the temperature control in the aluminum bar its not accurate, nor homogeneous. The latter two drawbacks cause aluminum empty space during extrusion. Therefore, it was decided to change the gas furnace for an induction furnace in order to control the temperature precisely and evenly.

Some temperature controls are performed by using optical sensors, these when placed can only read a single point of the bar. This technique is suitable for heating metals such as the steel and for temperatures above 600 ° C, since the steel emits high light radiation,

técnica es adecuada para los metales de calefacción como el acero y para temperaturas superiores a 600°C, ya que el acero emite radiación de luz de alta, y el tiempo de calentamiento es muy corto, lo que provoca un calentamiento bastante uniforme.

Para el caso del aluminio, la temperatura requerida para calentar, esto no emiten suficiente radiación para el sensor óptico para adquirir una temperatura correcta, y también el calentamiento de la barra es progresiva desde el exterior hacia el interior, por lo que puede suceder la superficie es de 500 ° C y el centro de la barra es a 300 grados ° C. La termografía es una técnica que permite calcular y determinar temperaturas a distancia, con exactitud y sin necesidad de contacto físico con el objeto. Permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético, utilizando cámaras termográficas.

Por lo tanto, se requiere para poner en práctica un control inteligente que, en base a la lectura de temperatura en tres puntos diferentes, tome decisiones diferentes para transmitir adecuadamente la potencia de la bobina de inducción a la barra de aluminio por medio del inversor.

La lógica difusa se selecciona en este control de la temperatura, ya que es una forma de lógica multivariada en el que los valores de verdad de las variables pueden ser cualquier número real entre 0 y 1, que se considera "difuso". Por el contrario, en la lógica de Boole, los valores de verdad de las variables sólo pueden ser 0 o 1. La lógica difusa se ha ampliado para manejar el concepto de verdad parcial, en el que el valor de verdad puede oscilar entre todo cierto y completamente falso. [2]

Por lo tanto, un sistema de control difuso es un sistema de control basado en un sistema lógico matemático difuso que analiza valores de entrada analógica en términos de variables lógicas que toman valores continuos entre 0 y 1, en contraste con la lógica clásica o digital, que opera en valores discretos de 1 o 0 (verdadero o falso, respectivamente). [3]

2. Emisividad.

Actualmente la forma en que los mapas térmicos se obtienen por un termógrafo infrarrojo, produce resultados imprecisos ya que los valores de emisividad de todos los elementos se ignoran y método de medición asume una emisividad constante. Sin los ajustes correctos de emisividad en el termógrafo infrarrojo, la variación de la temperatura podría elevarse tan alto como en un 300%. El recubrimiento de pintura negro sobre la superficie de CI es un método ampliamente utilizado para asumir la IC con emisividad constante y simplificar los procedimientos de medición [4].

Para tener una buena medición con la cámara térmica es necesario tener en cuenta los datos de las condiciones del entorno así como las características de las superficies termografiadas. A continuación se mencionan los datos más importantes que se deben tomar en cuenta.

and the heating time is very short, the resulting is an uniform heating.

For the case of the aluminum, the temperature required for heating, does not emit enough radiation to the optical sensor to acquire the correct temperature, and the heating of the bar is progressively from the outside to the inwards, so can happen that the surface is 500 ° C and the center of the bar is at 300 degrees ° C. Thermography is a technique which allows to calculate and determine temperatures at distance accurately and without physical contact with the object. It allows the capture of infrared radiation of the electromagnetic spectrum, using thermal imaging cameras.

Therefore, it is required to implement an intelligent control, based on the temperature reading at three different points, making different decisions to adequately convey the power of the induction coil to the aluminum bar through the inverter.

Fuzzy logic is selected in this temperature control, as it is a form of multivariate logic in which truth values of the variables can be any real number between 0 and 1, which is considered "fuzzy". By contrast, in the logic of Boole, the truth values of the variables can only be 0 or 1.

Fuzzy logic has been extended to handle the concept of partial truth, in which the truth value can range from quite true and completely false. [2]

Then a fuzzy control system is a control system based on a logic of fuzzy mathematical system that analyzes analog input values in terms of logical variables taking continuous values between 0 and 1, in contrast to classical or digital logic, operating in discrete values of 1 or 0 (true or false, respectively). [3]

2. Emissivity.

Currently the way in which the thermal maps are obtained by a thermal infrared, produces imprecise results, because the emissivity values of all elements are ignored and measuring method assumes a constant emissivity. Without the correct settings of emissivity in the infrared thermometer, the temperature variation could rise as high as 300%. The coating of black paint on the surface of CI is a widely used method to assume the IC constant emissivity and simplify measurement procedures [4].

To have a good measurement with the thermal camera, is necessary to consider the data of the environment as well as the conditions and the characteristics of the thermal images of the surfaces. In the following, the most important data to be taken into account are mentioned.

- Datos de las condiciones del entorno
 - Humedad y temperatura del aire
 - Distancia a objeto termografiado
 - Temperatura reflejada
 - Radiación incidente
- Características de las superficies termografiadas.
 - Emisividad

Teniendo en cuenta estos datos, al convertir la energía radiada detectada por la cámara termográfica en valores de temperaturas, estos valores serán adecuados.

La emisividad es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura. Es la razón entre la intensidad emitida por la superficie en una dirección particular y la intensidad que sería emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda. Cuanto más pequeño sea el valor de la emisividad, mejor aislante por reflexión será dicha superficie, siendo 1 el valor máximo. La ecuación 1 establece la relación de la emisividad.

$$\epsilon = \frac{\text{Radiation emitted from the surface}}{\text{Radiation emitted if it were a black body}} \quad 1$$

Un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. Las intensidades de las diferentes longitudes de onda emitidas por un cuerpo negro dependen de su temperatura. En una temperatura normal, un cuerpo negro no refleja ninguna luz y por ende, aparece totalmente negro.

Hay tablas de emisividad disponibles para varios tipos de materiales, algunas cámaras térmicas incluyen por default, emisividad para estos materiales. Un ejemplo de esto se muestra en la tabla 1.

- Data of the environment conditions
 - Humidity and air temperature
 - Distance to the thermographed object
 - Reflected temperature
 - Incident radiation
- Characteristics of the thermographed surfaces.
 - Emissivity

Taking in account these data, when converting the radiated energy detected by the thermal imager in temperature values, these values will be adequate.

The emissivity is the ratio of thermal radiation emitted by a surface or object due to its temperature. It is the ratio of intensity emitted by the surface in a particular direction and intensity that would be emitted by a black body at the same temperature and wavelength. The smaller the emissivity value, better insulation for reflection will be that surface, with 1 being the maximum value. The equation 1 establishes the relationship of emissivity.

A black body is a theoretical or ideal object that absorbs all light and all radiant energy that strikes it. None of the incident radiation is reflected or passes through the black body. The intensities of the different wavelengths emitted by a black body depend on its temperature. At a normal temperature, a black body reflects no light and therefore appears totally black.

There are tables available for various types of emissivity material, some thermal imagers include by default, emissivity for these materials. An example of this is shown in Table 1.

Table 1. Different emissivities.

Material	Emissivity (ε)
Black body	1
Human Skin	0.98
Water	0.95
Earth flax	0.95
Ceramics	0.95
Clay	0.95
Cement	0.95
Gravel	0.95
Paper	0.95
Plastic	0.95
Rubber	0.95
Wood	0.95
Copper (oxidized)	0.68
Stainless steel	0.1
Polished Copper	0.02
Aluminum (polished)	0.05

Al trabajar con la tabla 1, de emisividad se observa que la emisividad del aluminio (pulido) es de 0.05, se empezó a trabajar con este valor de emisividad en la pieza de trabajo mostrada en la Fig. 1, al tomar la imagen térmica, con una temperatura de la pieza de trabajo de aproximadamente 30°C, con el valor de emisividad mencionado anteriormente, los resultados obtenidos fueron valores de temperatura muy elevados, la temperatura censada por la cama térmica en el punto central de la pieza fue de 127.5°C (Fig. 4.7), esta temperatura no es la adecuada debido a que la pieza de trabajo, aunque es aluminio, no está pulida, como se puede observar en la Fig. 2, esta pieza es opaca, así que se debe ajustar su emisividad.



Figure 1. *Workpiece.*

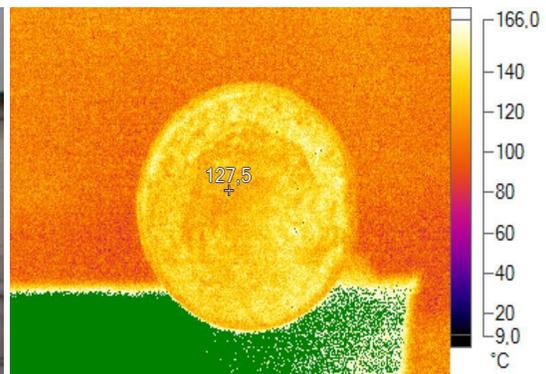


Figure 2. *Temperature of the workpiece ($\epsilon = 0.05$)*

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, se planteó una prueba, para obtener la emisividad adecuada, y así tener valores más reales de la temperatura de la pieza de trabajo. Para ello se empleó un termopar tipo j, un termómetro infrarrojo Fluke, además de 2 cámaras termográficas, la cámara Flir y la cámara Fluke. Se utilizaron las tablas de emisividad que la cámara térmica Flir trae por default, los resultados se muestran en la Tabla 2, la cual muestra la diferencia de temperatura, entre el termómetro infrarrojo y el termopar tipo J es de solo 1.1°C, por ello el valor de la temperatura será establecido entre estos 2 rangos.

Anteriormente se mencionó que la emisividad con un valor de 0.05 daba valores erróneos (correspondiente a el valor del aluminio pulido) es por ello que no se tomó en cuenta en la tabla. La emisividad de 0.5 correspondiente al aluminio oxidada da un valor aceptable, en la cámara Fluke y en la cámara Flir de 17.2°C y de 17.1°C respectivamente, pero ese valor esta solo en la vista lateral, en la vista frontal en la cámara Fluke se registra un valor de 23 °C y en la cámara Flir el valor registrado es de 8.6°C; estos valores difieren mucho por lo que se considera que la emisividad del aluminio oxidado da una buena aproximación, pero la forma de tomar la imagen

When working with Table 1, emissivity shows that the emissivity of aluminum (polished) is 0.05, the work begin with this emissivity value on the piece shown in Fig.1, when taking the thermal image with a temperature of the workpiece of about 30°C, with the emissivity value mentioned above, the obtained results were very high temperature values, the censed temperature by the thermal bed at the center point of the workpiece was 127.5 °C (Fig. 4.7). This temperature is not adequate because the workpiece, although it is aluminum, is not polished, as shown in Fig. 2, this piece is opaque, and therefore the emissivity should be adjusted.

Given the results above, a test is proposed to obtain the proper emissivity, and thus have more accurate values of the temperature of the workpiece. For that purpose a j type thermocouple, an infrared thermometer Fluke, plus 2 thermal imagers, the Fluke camera and the Flir camera was used. Emissivity tables that the thermal camera FLIR brings by default were used, the results are shown in Table 2 where the temperature difference between the infrared thermometer and the type J thermocouple is only 1.1 °C, thereby the temperature value will be established between these 2 ranges

Earlier it was mentioned that the emissivity with a value of 0.05 gives wrong values (corresponding to the value of polished aluminum) is therefore not taken into account in the table. The emissivity of 0.5 for the oxidized aluminum gives an acceptable value, for the Fluke camera and the Flir camera, 17.2°C and 17.1°C respectively, but that value is only in the side view, in the front view of the Fluke camera, a value of 23°C is recorded and for the Flir camera the recorded value is 8.6°C; these values differ greatly so it is considered that the emissivity of oxidized aluminum gives a good approximation, but the way to make the thermal image must be a lateral way, for better readings.

térmica debe de ser de una forma lateral, para tener mejores lecturas.

Table 2. Measurement of the workpiece at ambient temperature with different emissivity.

Emissivity (ϵ)		Fluke Camera		Flir Camera	
Rubber	0.93	Frontal	22.3°C	Frontal	14.1°C
		Lateral	18.9°C	Lateral	18.5°C
White paper	0.9	Frontal	22.3°C	Frontal	13.9°C
		Lateral	18.8°C	Lateral	18.4°C
Enamel Porcelain	0.92	Frontal	22.3°C	Frontal	14°C
		Lateral	18.9°C	Lateral	18.4°C
Painting	0.94	Frontal	22.3°C	Frontal	14.1°C
		Lateral	18.9°C	Lateral	18.5°C
Black electrical tape	0.95	Frontal	22.2°C	Frontal	19.3°C
		Lateral	19°C	Lateral	18.5°C
Oxidized copper	0.65	Frontal	22.8°C	Frontal	11.4°C
		Lateral	18.1°C	Lateral	17.8°C
Concrete	0.54	Frontal	23.2°C	Frontal	9.5°C
		Lateral	17.5°C	Lateral	17.3°C
Common brick	0.85	Frontal	22.3°C	Frontal	13.5°C
		Lateral	18.7°C	Lateral	18.3°C
Oxidized aluminum	0.5	Frontal	23.3°C	Frontal	8.6°C
		Lateral	17.2°C	Lateral	17.1°C
Infrared thermometer			16.8°C		
Thermocouple type J			17.9°C		

Los valores mostrados en la Tabla 2 solo se acercaban, se decido hacer una segunda prueba, en la cual la temperatura sensada con el termopar tipo j y la temperatura de la cámara Flir fueran iguales, la emisividad propuesta fue de 0.84. A continuación se calentó la pieza de trabajo, la tabla 3 muestra los resultados obtenidos. En ella se puede observar que las temperaturas entre la cámara Flir y el termopar tipo J son similares, de las medidas tomadas, el margen de error máximo fue de 4.2°C y el mínimo fue de 0.2°C, con un promedio total del error de 0.84°C. Lo cual demuestra que la emisividad de 0.84 puede ser utilizada para nuestro sistema.

The values shown in Table 2 only approached, it was decided to do a second test, in which the temperature sensed with the j type thermocouple and the temperature of the FLIR camera being equal, the proposed emissivity was 0.84. Then the workpiece was heated, Table 3 shows the results obtained. It can be seen that temperatures between Flir camera and type J thermocouple are similar, of the measures taken the maximum margin of error was 4.2 ° C and the minimum was 0.2 ° C, with a total average error 0.84 ° C. This shows that the emissivity of 0.84 can be used to our system.

Table 3. Comparison of temperature measurements in the workpiece (emissivity 0.84).

Emissivity (ϵ)	Flir thermal camera	Thermocouple type J	Difference
0.84	163.4	163	0.4
0.84	133.9	135	1.1
0.84	121.8	122	0.2
0.84	118.3	118	0.3
0.84	107.5	108	0.5
0.84	36.7	36	0.7
0.84	31.4	35	3.6
0.84	30.8	35	4.2
average difference			0.84

3. Sistema De Control difuso.

Los controladores difusos son conceptualmente muy simples. Se componen de una etapa de entrada, una etapa de procesamiento, y una etapa de salida. Los sensores miden las temperaturas que serán las entradas al sistema, esto se hace mapeando la zona de trabajo, se acoplan estas entradas con las funciones de pertenencia. La etapa de procesamiento invoca cada regla apropiada y genera un resultado para cada uno, a continuación, combina los resultados de las reglas. Por último, la etapa de salida convierte el resultado combinado de nuevo en un valor de salida de control específica.

La forma más común de funciones de pertenencia es triangular como se muestra en la Figura 3, donde a, b y c son parámetros que dan forma a la función (2), y donde x es una variable que pertenece al universo de discurso X. La trapezoidal se muestra en la Fig. 5, viene dada por la siguiente ecuación, donde a, b, c y d son los parámetros que dan forma a esta función (3) y en el que x es una variable perteneciente al universo de discurso X [5].

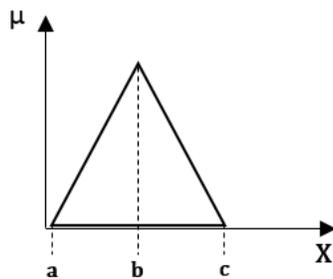


Figure 3. Triangular membership function.

$$\text{Triangular}(x; a, b, c,) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad 2$$

$$\text{Trapezoidal}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad 3$$

Como se señaló anteriormente, la etapa de procesamiento se basa en un conjunto de reglas lógicas en forma de SI-ENTONCES, donde la parte SI se denomina "antecedente" y la parte ENTONCES se le llama el "consecuente". Los sistemas de control difuso típicos tienen docenas de reglas. [6]

A. Aplicación de valores de verdad.

Una aplicación básica podría caracterizar diferentes sub-rangos de una variable continua. Por ejemplo, una medición de la temperatura de los frenos antibloqueo puede tener varias funciones de pertenencia separadas que definen los rangos de temperatura específicos necesarios para controlar los frenos correctamente. Cada función

3. Fuzzy control system.

Fuzzy controllers are conceptually very simple. They consist of an input stage, a processing stage and an output stage. The sensors measure the temperatures are the inputs to the system, this is done by mapping the work area, these inputs are coupled with the membership functions. The processing stage invokes each appropriate rule and generates a result for each, then combines the results of the rules. Finally, the output stage converts the combined result again in a specific output value control.

The most common form of membership functions is triangular as shown in Figure 3, where a, b and c are parameters that shape the function (2), and where x is a variable that belongs to the universe of discourse X. The trapezoidal shown in Fig. 5, is given by the following equation where a, b, c and d are the parameters that shape the function (3) and in which x is a variable belonging to the universe of discourse X [5].

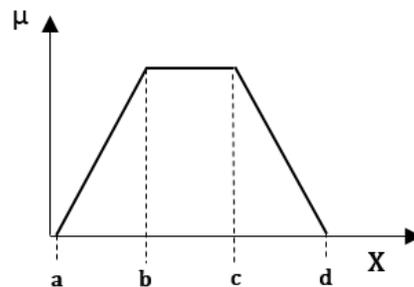


Figure 4. Trapezoidal membership function.

As noted above, the processing step is based on a set of logical rules in the form of IF-THEN where the IF part is called "antecedent" and THEN part is called the "consequent". Typical systems have dozens of fuzzy control rules. [6]

A. Application of truth values.

A basic application might characterize different sub-ranges of a continuous variable. For example, a measurement temperature antilock brakes can have several separate membership functions defining the necessary specific temperature ranges to control the brakes properly. Each function assigns the same

asigna el mismo valor de la temperatura a un valor de verdad en el rango de 0 a 1. Estos valores de verdad se pueden utilizar para determinar cómo se deben controlar los frenos. La Fig.5 muestra un ejemplo de funciones de pertenencia de la temperatura.

temperature value to a truth value in the range of 0 to 1. These truth values can be used to determine how to control the brakes. Fig.5 shows an example of membership functions of temperature.

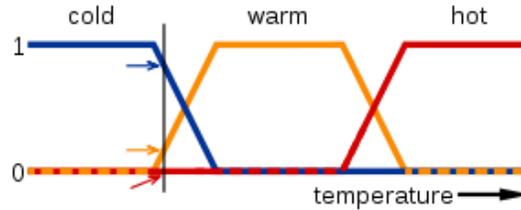


Figure 5. Example of membership functions.

Temperatura de la lógica difusa:

Fuzzy logic Temperature:

En esta imagen, los significados de las expresiones frías (cold), tibio (warm) y caliente (hot) están representados por funciones mapeando a una escala de temperatura. Un punto en la escala tiene tres "valores de verdad" - uno para cada una de las tres funciones. La línea vertical en la imagen representa a una temperatura particular que el indicador (valores de verdad) tres flechas. Desde la flecha roja apunta a cero, esta temperatura puede ser interpretada como "no caliente". La flecha naranja (señalando a 0,2) se puede describir como "un poco caliente" y la flecha azul (señalando a 0,8) "bastante frío".

In this image, the meanings of expressions cold, warm and hot are represented by functions mapping a temperature scale. A point on the scale has three "truth values" - one for each of the three functions. The vertical line in the image represents a particular temperature the (truth values) three arrows. From the red arrow pointing to zero, this temperature can be interpreted as "hot". The orange arrow (pointing at 0.2) can be described as "a little hot" and the blue arrow (pointing at 0.8) "fairly cold".

Bajo este concepto, se establecieron las normas para la calefacción de aluminio.

Under this concept, the rules for heating aluminum were established.

Las reglas se establecieron a partir de la siguiente manera. En la Fig. 6 se muestra el área transversal de la barra de aluminio donde se puede observar tres capas (exterior, interior y medianas) que indican los tres lugares en los que permiten detectar la temperatura. Una cámara termográfica se utiliza para detectar la temperatura.

The rules were established from follows.

Es necesario tener en cuenta que la calefacción en la barra se origina en la capa exterior y gradualmente se penetra en la capa interior.

In Fig. 6 the cross sectional area of the aluminum bar where you can see three layers (exterior, interior and medium) indicating the three places that detect temperature is shown. A thermographic camera is used to detect the temperature.

Dado que el tiempo de calentamiento debe ser corto, y el calentamiento debe ser uniforme, una vez que la capa externa alcanza 500 ° C grados máximo, el inversor debe dejar de energizar la bobina de inducción para esperar a que el calor penetre hasta el centro de la pieza de aluminio con el fin a homogeneizar la temperatura.

It is necessary to note that the heating in the bar originates from the outer layer and gradually penetrates into the inner layer.

Esto reducirá la temperatura de la capa exterior y aumentará la temperatura de las capas interiores; a continuación, el inversor de nuevo energiza a la bobina de inducción para aumentar la temperatura de la capa exterior de nuevo, y el proceso continuará hasta llegar a una temperatura estándar de 450 °C.

Since the heating time should be short, and heating should be uniform, once the outer layer reaches 500 ° C maximum degrees, the investor must stop energizing the induction coil to wait for the heat to penetrate to the center of the aluminum in order to homogenize the temperature.

This will reduce the temperature of the outer layer and increase the temperature of the inner layers; then again the inverter power the induction coil to increase the temperature of the outer layer again, and the process will continue until a standard 450 °C.

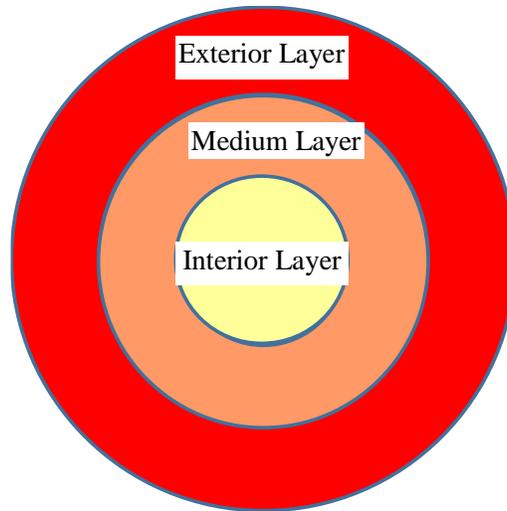


Figure 6. Layers where temperature is sensed.

A continuación las capas se abrevian como EL (capa externa), ML (capa media), y IL (capa interna). Las entradas son tres muestras de temperatura y la salida es el porcentaje de la modulación de anchura de impulso del inversor.

El conjunto de reglas incluye 81 reglas, tales como:

Las figuras 7, 8 y 9 muestran las funciones de pertenencia de las tres entradas, la figura 10 muestra la salida.

In the following the layers are abbreviated as EL (outer layer), ML (middle layer) and IL (inner layer). The inputs are three samples of temperature and the output is the percentage of the pulse width modulation of the inverter.

The set of rules includes 81 rules, such as:

Figures 7, 8 and 9 show the membership functions of the three inputs, Figure 10 shows the output.

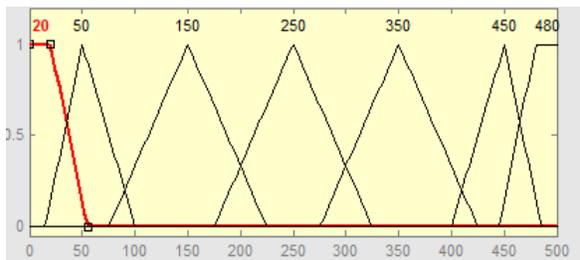


Figure 7. Membership functions of the external temperature

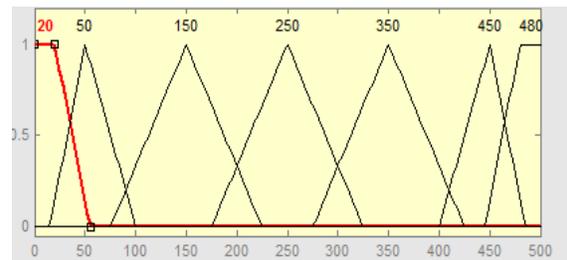


Figure 8. Membership functions of the medium temperature

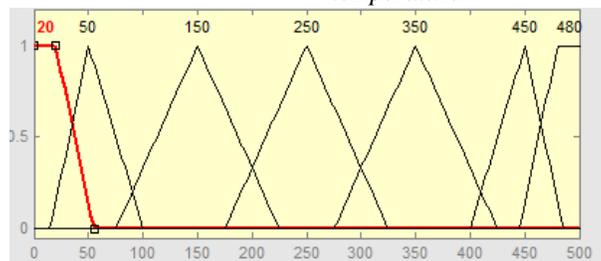


Figure 9. Membership functions of the internal temperature.

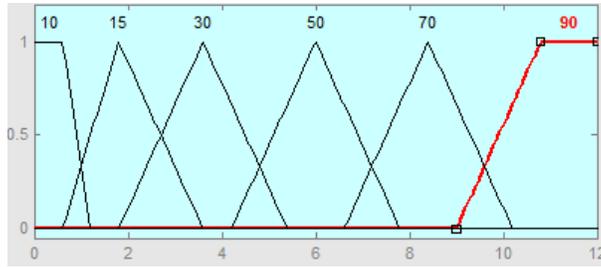


Figure 10. Output membership functions.

Lo anterior es aplicado para el primer sistema difuso. Para el segundo sistema difuso lo que cambia es la salida y las reglas difusas. La figura 11 muestra la salida del sistema difuso número 2.

This is applied to the first fuzzy system. For the second fuzzy system, the output and the fuzzy rules are changed. Figure 11 shows the output of the fuzzy system number 2.

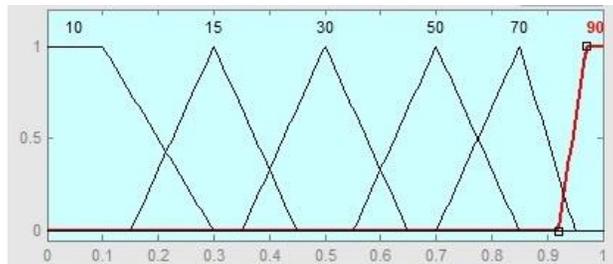


Figure 11. Output membership functions.

Como se puede observar en la Figura 11 el universo de discurso es parecido, solo que este va desde 0 a 1, la salida del sistema 1 es más amplia, esta va desde 0 a 12. Debido a este cambio, como se menciona anteriormente, las reglas difusas fueron afectadas.

As shown in Figure 11 the universe of discourse is similar, the differences is that this ranges from 0 to 1, the output of the first system is larger, this ranges from 0 to 12, because of this change, as mentioned above, the fuzzy rules were affected.

El sistema utilizado, en los 2 sistemas difusos, es un sistema de inferencia difuso tipo Mamdani. El sistema se basa en los conceptos de conjuntos difusos, reglas lingüísticas en la forma de la mente anterior Si-Entonces, ya mencionado, y un sistema de razonamiento difuso basado en la lógica difusa. La figura 6 muestra el sistema difuso Mamdani.

The system used in the 2 fuzzy systems, is a Mamdani fuzzy inference system. The system is based on the concepts of fuzzy sets, linguistic rules already mentioned, and a fuzzy reasoning system based on fuzzy logic. Figure 6 shows the Mamdani fuzzy inference system.

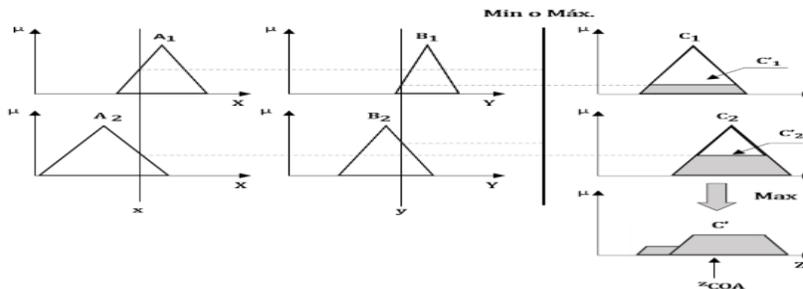


Figure 12. Mamdani fuzzy inference system.

El método de Mamdani cómo se usa min-max, la composición de las reglas de inferencia son dados por el operador de intersección mínimo (4), por el operador de unión máximo (5) y las salidas método de agregación es el método de máxima (6) [7].

$$T_M(x,y)=\min((x,y)) \quad (4)$$

$$S_M(x,y)=\max((x,y)) \quad (5)$$

$$\mu_c(z)=\text{Max}(\mu_{c1}(z), \mu_{c2}(z), \mu_{c3}(z), \dots \mu_{cn}(z)) \quad (6)$$

Con el fin de obtener un valor de salida rígido de un sistema de este tipo, es necesario utilizar un desdifusificador. En este caso se utilizó el método del centro de gravedad. (7)

$$Z_{\text{COA}} = \frac{\int_Z \mu_A(z)z \, dz}{\int_Z \mu_A(z) \, dz} \quad (7)$$

Donde $\mu_A(z)$ es el grado de pertenencia de z en A y A es el área resultante de la suma de las partes consecuentes de las reglas del sistema de inferencia. Al ser el centro de equilibrio entre las distribuciones de los valores añadidos, es el método más utilizado.

4. Salidas de los sistemas y resultados.

La imagen tomada en la pieza con la cámara de calor se muestra en la Figura 7, como se muestra el calentamiento no es uniforme en toda la pieza, se puede ver los puntos más calientes que otros a través de esta superficie. Por ellos se trabajara con una temperatura promedio de cada una de las zonas. Una imagen digital es un arreglo bidimensional de píxeles. El valor de cada píxel se representa mediante una función f , donde $f(x, y)$ representa el nivel de brillantez, color, o intensidad de la imagen en tales coordenadas [11].

The Mamdani method is used in the min-max form, the composition of the inference rules are given by the minimum intersection operator (4), by the maximum union operator (5) and the output method aggregation is the method of maximum (6) [7].

In order to obtain a value of output of a rigid system of this type, it is necessary to use a defuzzifier. In this case the center of gravity method was used. (7)

Where $\mu_A(z)$ is the membership degree of z in A and A is the area resulting from the sum of the consequent parts of the rules of the inference system. Because it is the center of balance between the distributions of the added values, is the most widely used method.

4. System's Outputs and results.

The image taken of the piece with the heat camera is shown in Figure 7, as it shown, the warming is not uniform throughout the piece, you can see the hottest spots than others through this surface. For them it will work with an average temperature of each of the areas. A digital image is a two-dimensional array of pixels. The value of each pixel is represented by a function f , where $f(x, y)$ represents the brightness level, color, or intensity of the image in such coordinates [11].

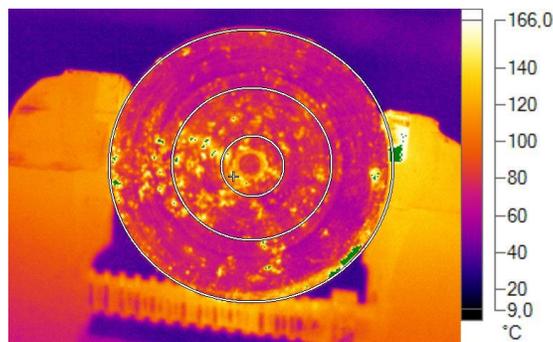


Figure 13. Thermal image of the workpiece.

Sin embargo, aunque algunas de estas tareas pueden llevarse a cabo mediante visión artificial, el software o el hardware necesario no consigue los resultados que serían deseables [8].

El procesamiento digital de la imagen consiste en eliminar la mayor cantidad de ruido que se le agrega durante la adquisición así como también mejorar las características de dicha imagen como: definición de contornos, color, brillo, etc. [9]

La etapa de electrónica de potencia consta de un inversor alimentado de voltaje como se muestra en la Fig. 14. Este inversor se alimenta desde un rectificador no controlado de tres fases. En la simulación no se muestra. El generador de PWM compara la señal de referencia del controlador de lógica difusa con una señal de modulación, el PWM es diferente para los 2 sistemas.

La carga de inducción se simula mediante una serie de ramas resistivas-inductivas; se compensa por medio de un condensador para obtener una carga resonante. La frecuencia de conmutación es 50 Hz. Se puede tener control de voltaje usando varios inversores y sumando los voltajes de salida de los inversores individuales. Se puede concebir que un puente inversor monofásico completo (figura 14).[10]

However, although some of these tasks can be accomplished by artificial vision, the necessary software or hardware not get the results that would be desirable [8].

The digital image processing is to remove the most quantity of noise as is added during the acquisition as well as improve the characteristics of the image as contour definition, color, brightness, etc. [9]

Stage power electronics comprises a voltage fed inverter as shown in Fig. 14. This inverter is fed from an uncontrolled three-phase rectifier. In the simulation is not displayed.

The PWM generator compares the reference signal fuzzy controller with a modulation signal, the PWM is different for the two systems.

The induction load is simulated by a series of resistive-inductive branch; It is compensated by a capacitor for a resonant load. The switching frequency is 50 Hz. You can have voltage control using various investors and adding the output voltages of individual investors. It is conceivable that a complete single phase bridge inverter (figure 14). [10]

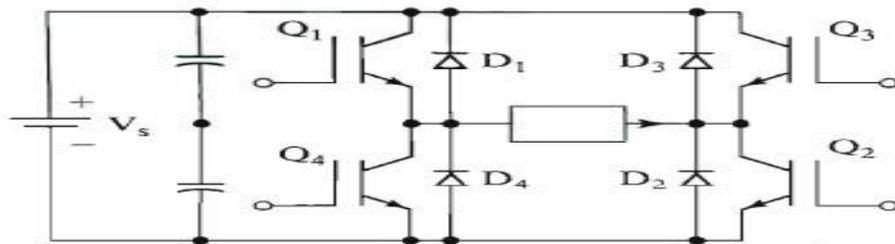


Figure 14. Single-phase full-bridge inverter.

Matlab Simulink se utiliza para simular el circuito. En la Figura 15 se presenta el esquema. Las entradas del sistema con nombres como Exterior, Medium e Interior son temperaturas detectadas.

Matlab Simulink is used to simulate the circuit. Figure 15 presents the scheme. System entries with names like Exterior, Medium and Interior are detected temperatures.

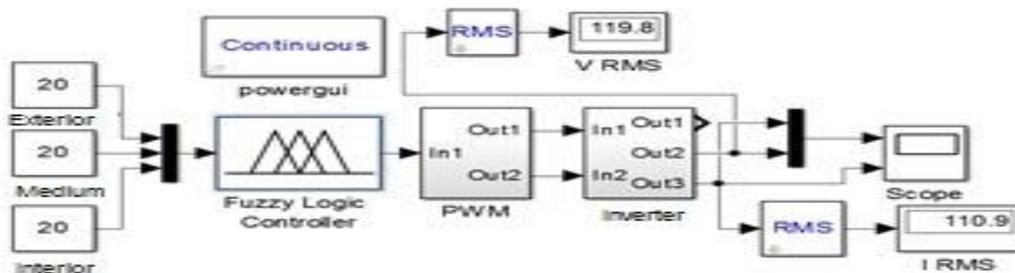


Figure 15. Simulated circuit.

Algunos casos se estimularon para verificar el funcionamiento del control de aproximación teórica. Las entradas de temperatura son variadas de acuerdo a la evolución de calentamiento dentro de la barra de aluminio. En la tabla 4 se muestra el primer caso.

Some cases were stimulated to verify the operation of the theoretical approach control. The temperature inputs are varied according to the evolution of heating within the aluminum bar. Table 4 shows the first case.

	Exterior Temp.	Medium Temp.	Interior Temp.
Case 1	20°	20°	20°

Table 4. First case.

En este primer caso, el inicio del proceso de calentamiento se simula, donde las temperaturas de entrada son iguales, suponiendo que éstos corresponden a temperaturas ambiente.

In this first case, the start of the heating process is simulated, where the input temperatures are equal, assuming they are at ambient temperatures.

De acuerdo con el conjunto de reglas difusas, la transmisión de energía debe ser el máximo. En la Fig. 16 se muestra la tensión de carga que tiene una anchura de pulso máximo, como se esperaba, la Figura 17 muestra el PWM. La corriente rms es 110,7 amperios.

According to the set of fuzzy rules, power transmission should be the maximum. Fig. 16 shows the charging voltage has a maximum width pulse, as expected, Figure 17 shows the PWM. The rms current is 110.7 amperes.

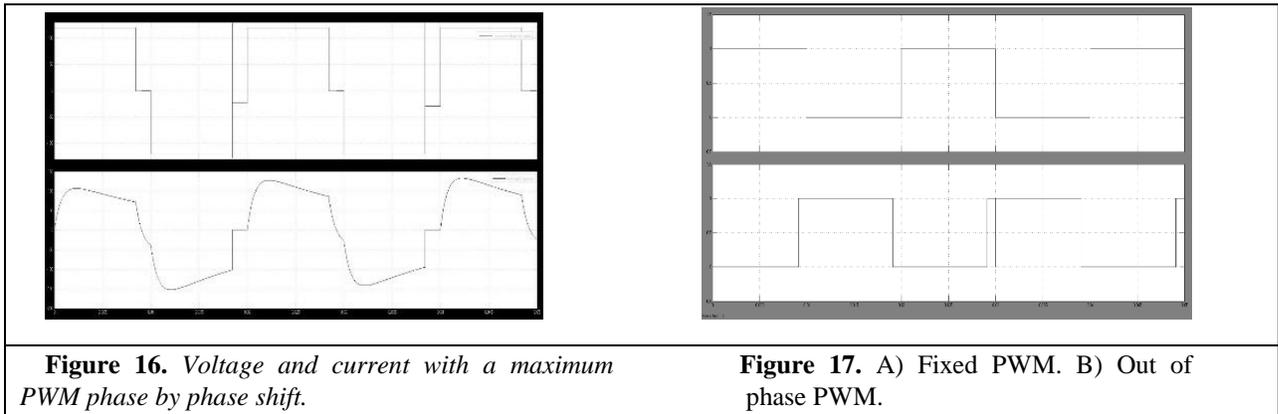


Figure 16. Voltage and current with a maximum PWM phase by phase shift.

Figure 17. A) Fixed PWM. B) Out of phase PWM.

La tabla 5 muestra el segundo caso. En este caso, la temperatura exterior se ha elevado a 300 °C, y poco a poco el centro de la barra es de 100 grados °C. Como se esperaba, la anchura del impulso de tensión se reduce aproximadamente 60 por ciento.

Table 5 shows the second case. In this case, the outside temperature was raised to 300 °C, and gradually the center of the bar is 100 °C. As expected, the pulse width voltage is reduced about 60 percent.

Table 5. Second case.

	Exterior Temp.	Medium Temp.	Interior Temp.
Case 2	300°	200°	100°

Por lo que se puede observar en las figuras el voltaje en la simulación por desfase de fase, tiene menos distorsión que el de PWM normal, aunque el del PWM normal tiene simetría en cuarto de onda, lo que el PWM en desplazamiento de fase no contiene.

As can be seen in the figures, the voltage on the simulation lag phase, has less distortion than normal PWM, although the normal PWM has symmetry quarter wave, which the PWM in phase shift not contains.

5. Conclusiones.

5. Conclusions.

La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos para los procesos y las definiciones altamente no lineales y el conocimiento no estrictamente definido (impreciso o subjetivo).

La transferencia de calor en la pieza de trabajo se lleva a cabo en la región de mayor temperatura a de menor.

Con el fin de hacer un calentamiento uniforme en la pieza de aluminio, con un horno de inducción. Se propone un sistema difuso Mamdani, debido a su buen desempeño. Un sistema difuso se simuló con una división de 3 áreas de la pieza de trabajo y una salida.

La temperatura en las 3 áreas que van desde 0 a 500 grados. Dependiendo del valor medio de la temperatura sensada en la pieza, el PWM varía del 4,3% al 90,8%, este PWM controla el inversor.

Los resultados de la simulación son los esperados.

Fuzzy logic is used when the complexity of the process involved is very high and there are no accurate mathematical models for processes and highly nonlinear definitions and knowledge not strictly defined (imprecise or subjective).

The Heat transfer in the workpiece is carried out in the region of higher temperature to the lower temperature.

In order to make a uniform piece of aluminum with an induction heating furnace. One Mamdani fuzzy system is proposed, due to its good performance. A fuzzy system was simulated with a division of 3 areas of the workpiece and an outlet.

The temperature in the three areas ranging from 0 to 500 degrees. Depending on the average value of the sensed temperature in the piece, the PWM varies from 4.3% to 90.8%, the PWM controls the inverter.

The simulation results are as expected.

6 Agradecimientos

El presente trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo brindado por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a al Instituto Tecnológico de Apizaco que brindo las facilidades para realizar los estudio de posgrado y a la Universidad Tecnológica de Tlaxcala que dio la facilidad de utilizar los equipos necesarios para realizar la investigación.

6 Acknowledgment

This research was made possible through the support provided by the National Council of Science and Technology (CONACYT), the Technological Insitute of Apizaco which provide the facilities for the study of the post-graduate studies and to the Technological University Tlaxcala who gave the ease of using the equipment necessary to conduct the research.

7 References

- [1] Power Loss Study of Inverter-fed Machine Drives using Discontinuous Pulse Width Modulation
- [2] Novák, V., Perfilieva, I. and Močkoř, J. (1999) Mathematical principles of fuzzy logic Dodrecht: Kluwer Academic. ISBN 0-7923-8595-0.
- [3] Pedrycz, Witold (1993). Fuzzy control and fuzzy systems (2 ed.). Research Studies Press Ltd
- [4] Hsueh-Ling Yu, Yih-Lang Li, Tzu-Yi Liao, Tianchen Wang, Yiyu Shi, Shu-Fei Tsai ; "Fast and Accurate Emissivity and Absolute Temperature Maps Measurement for Integrated Circuits", Proceedings of the 2014 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, Taiwan, 2014 IEEE, ISBN: 978-1-4799-6277-8
- [5] Ponce C., Perfecto Malaquías P. and Hernández J, Modelling of a Mamdani fuzzy inference system for the diagnosis of electric motors aging: International Journal of Innovation and Scientific Research ISSN 2351-8014.
- [6] Vichuzhanin, Vladimir (12 April 2012). "Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction". Central European Journal of Engineering 2 (3): 392–398. doi:10.2478/s13531-012-0003-7.
- [7] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Information and control, vol.8, pp 338-353, 1965.
- [8] Gonzalez, R.C., Woods, R.E. "Digital Image Processing". Addison-Wesley Publishing Company. 1992.
- [9] L. Enrique Sucar, "Visión Computacional", Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México.
- [10] Muhammad H. Rashid, "ELECTRÓNICA DE POTENCIA CIRCUITOS, DISPOSITIVOS Y APLICACIONES". Mexico Tercera edición, Prentice Hall, 2004
- [11] Alejandro Flores M., Ana Antígona M, "Detección estable de los bordes de la oreja en imágenes 2D", Computacion y sistemas Vol. 13 No. 2, 2009, pp 195-208 ISSN 1405-554



No. de Oficio:DPyDI/063/16

El Carmen Xalpatlahuaya, Huamantla, Tlaxcala a 22 de noviembre de 2016

AUTORES: ING.ORTIZ J. SAUL, M EN C HERNANDEZ J. LUIS, ING PONCE S. CARLOS DR.ORDOÑEZ RAFAEL

ARTICULO: DETERMINING THE EMISSIVITY OF ALUMINUM TO SIMULATE FUZZY SYSTEMS
TEMPERATURE CONTROL IN INDUCTION FURNACE

ARTICULO Núm. ISSN:2395-9843

Estimados autores

Con agrado les informamos que, con fecha de hoy, el artículo arriba citado ha sido revisado y aprobado para ser publicado en la revista RED-TES en el mes de diciembre del año en curso, siendo en el volumen no. 3, con registro ISSN: 2395-9843.

Saludos cordiales

M. en C. Ismael Nava Lumbreras
Director Ejecutivo de la Revista RED-TES



Carr. a El Carmen Xalpatlahuaya S/N, Huamantla Tlaxcala.
Tel: 01 247 47 25300 / 01 800 506 3294
www.uttlaxcala.edu.mx