SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CONTROLAR LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO EN EL PROCESO DE TOSTION DE CAFÉ EN UNA MÁQUINA DE LABORATORIO

OTTO LEONARDO CHAVES ARGOTE JORGE ARMANDO JARAMILLO PONCE

UNIVERSIDAD DE NARIÑO FACULTAD DE INGENIERIA ROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA SAN JUAN DE PASTO 2014

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CONTROLAR LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO EN EL PROCESO DE TOSTION DE CAFÉ EN UNA MÁQUINA DE LABORATORIO

OTTO LEONARDO CHAVES ARGOTE JORGE ARMANDO JARAMILLO PONCE

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electrónico

DIRECTOR
M.SC. JAIME ORLANDO RUIZ
INGENIERO ELECTRÓNICO

CODIRECTOR
CAMILO LAGOS
INGENIERO MECANICO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO FACULTAD DE INGENIERIA ROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA SAN JUAN DE PASTO 2014

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en este Trabajo de Grado son Responsabilidad de los autores.

Artículo 1 del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

	Nota de aceptación
_	
_	
	Presidente de Tesis
	Jurado 1
	Jurado 2

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus especiales agradecimientos a:

Ramiro Jaramillo, Mecánico y electricista, por todo su conocimiento, orientación, colaboración y disponibilidad.

Grupo de Investigación MORASURCO de la universidad de Nariño, por el apoyo en la realización de esta investigación.

M.Sc. Jaime Orlando Ruiz, Ingeniero Electrónico, Director del grupo de investigación MORASURCO de la Universidad de Nariño, por su orientación, confianza y apoyo.

Camilo Arturo Lagos Mora, Ingeniero Mecánico, perteneciente al grupo de investigación MORASURCO de la Universidad de Nariño, por su orientación confianza y apoyo.

Evelio Lasso, catador profesional de café, por la evaluación de desempeño del sistema final.

Álvaro José Cerbelion Bastidas, Ingeniero Electrónico, Encargado del Laboratorio de Electrónica de la Universidad de Nariño, por su colaboración y disponibilidad.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedicamos con mucho cariño a nuestros padres y a todos quienes aportaron positivamente a lo largo de nuestra formación académica dándonos el apoyo e incentivación que necesitamos para trabajar día con día ya que son los testigos del trabajo perseverante para lograr un nuevo éxito en nuestras vidas profesionales.

Por eso y por mucho más les dedicamos este proceso de formación que constituirá el cimiento fundamental en nuestra vida profesional y a través del cual forjaremos un nuevo presente en las labores que desempeñemos todos los días.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	19
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 EL PROCESO DE TOSTIÓN DEL CAFÉ	21
2.1.1 Fases de la tostión.	22
2.1.2 Variables importantes del proceso de tostión	24
2.1.3 Comportamiento de las variables en el proceso de tostión	26
2.1.4 Máquina para tostión de café con sistema tambor y aire caliente	28
2.2 LÓGICA DIFUSA	30
2.2.1 Conjuntos difusos.	31
2.2.2 Funciones de pertenencia	33
2.2.3 Operaciones entre conjuntos difusos	35
2.2.4 Fusificación.	36
2.2.5 Base de conocimiento	37
2.2.6 Inferencia difusa	38
2.2.7 Defusificación	39
2.3 SISTEMAS DE CONTROL	41
2.4 VENTAJAS DEL CONTROL DIFUSO Vs EL CONTROL CLÁSICO	45
3. METODOLOGIA	47
4. DESARROLLO DEL PROYECTO	49
4.1 ETAPA I: INVESTIGACION PRELIMINAR SOBRE EL PROCE	ESO DE
TOSTION	49
4.2 ETAPA II: ESTABLECIMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS TEC	NICAS Y
OPERATIVAS PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA Y TIEMPO	DE LA
MACHINA PARA TOSTIÓN DE CAFÉ	10

4.2.1 Requerimientos operativos49
4.2.2 Requerimientos técnicos
4.3 ETAPA III: DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA Y TIEMPO EN LA
MAQUINA PARA TOSTION DE CAFÉ50
4.3.1 Fase 1: Diseño del Circuito Electrónico para la Configuración de Medida y
Acondicionamiento de la señal del sensor52
4.3.2 Fase 2: Módulo de control, Adquisición de señal e Interfaz de comunicación
63
4.3.3 Fase 3: Servoválvulas73
4.3.4 Fase 4: Circuitos de potencia para el control de encendido del compresor de
aire e intercambiador de calor77
4.3.5 Fase 5: Diseño e implementación del método de control por medio de lógica
difusa79
4.4 ETAPA IV: IMPLEMENTACION Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA91
4.4.1 implementación del módulo de Control92
4.4.2 Implementación de los componentes externos del sistema (Máquina de
tostión)97
4.4.3 Calibración del sistema100
5. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS104
5.1 PRESENTACIÓN FINAL DEL SISTEMA EN OPERACIÓN104
5.2 RESPUESTA A UN ESCALÓN104
5.3 RESPUESTA A UNA RAMPA105
5.4 PERFILES DE TOSTIÓN108
6. CONCLUSIONES112
RECOMENDACIONES113
BIBLIOGRAFIA114
ANEXOS116

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perfil de tostión de la muestra N°1	27
Figura 2. Perfil de tostión N°2	27
Figura 3. Diseño preliminar, máquina de tostion de café por medio de aire	y GLP29
Figura 4. Implementación intercambiador de calor y tolva de tostión	30
Figura 5. Lógica difusa vs lógica clásica	32
Figura 6. Conjuntos difusos para la variable estatura	33
Figura 7. Funciones típicas de membresía	34
Figura 8. Valores difusos	36
Figura 9. Funciones de pertenencia para BAJO, MEDIO y ALTO	37
Figura 10. Máquina de inferencia difusa	38
Figura 11. Método Max	39
Figura 12. Método de centroide	40
Figura 13. Media de máximos	41
Figura 14. Lazo cerrado	42
Figura 15. Lazo cerrado con controlador	42
Figura 16. Controlador difuso	43
Figura 17. Esquema en diagrama de bloques para el control de la tempe	eratura en
una máquina de tostión basada en un diseño hibrido entre tostión por le	cho fluido
y convección	51
Figura 18. Diagrama de adquisición y tratamiento señal sensor de temper	atura53
Figura 19. Gráfica resistencia vs temperatura para sensor RTD-PT100, o	=0.00385
	54
Figura 20. Puente de Wheatstone	55
Figura 21. Configuración a 3 hilos del sensor PT-100 con puente de Whe	atstone y
medida del voltaje diferencial proporcional al cambio de resistencia en el s	sensor 56

Figura 22. Diagrama de diferenciación y amplificación de señal de sensor RTD-
PT10059
Figura 23. Señal de voltaje etapa acondicionamiento: arriba en azul señal a la
salida del A.O. AD620 y abajo en rojo señal a la salida filtro séptimo orden60
Figura 24. Esquemático del filtro pasabajas de séptimo orden con topología sallen
Key, respuesta Butterworth y frecuencia de corte de 2Hz61
Figura 25. Esquemático de fuente dual diseñado en el software de pcbs Eagle, con
cuatro niveles de voltaje fijos62
Figura 26. Diagrama de flujo módulo de control, adquisición de señal e interfaz de
comunicación64
Figura 27. Control PWM para servomotores67
Figura 28. Diseño de reinicio para el módulo de control70
Figura 29. Parámetros de diseño para el funcionamiento del microcontrolador pio
18F445570
Figura 30. Salidas de control para los actuadores71
Figura 31. Conexión LCD display y microcontrolador pic71
Figura 32. Conexión USB con microcontrolador pic72
Figura 33. Conversor análogo digital utilizando el pin A0 del microcontrolador pio
18f445572
Figura 34. Esquemático módulo de control73
Figura 35. Válvulas de paso de fluido: A la izquierda válvula tipo compuerta, a la
derecha válvula tipo bola74
Figura 36. Servomotor75
Figura 37. Diseño fuente regulada 5V76
Figura 38. Diseño modulo control encendido compresor de aire77
Figura 39. Diagrama de control encendido eléctrico de intercambiador de calor78
Figura 40. Diseño control activación de chispa eléctrica intercambiador de calor .79
Figura 41. Compromiso de diseño80
Figura 42. Control difuso directo sin optimización de tipo proporcional derivativo .81
Figura 43. Funciones de pertenencia del error82

Figura 44. Funciones de pertenencia del cambio de error	.83
Figura 45. Funciones de pertenencia para la apertura de la llave de aire caliente	84
Figura 46. Método Max-min	.86
Figura 47. Base de reglas control difuso	.87
Figura 48. Superficie de control para la apertura de la llave de aire caliente	.88
Figura 49. Superficie de control para la apertura de la llave de aire frio	.89
Figura 50. Interfaz de usuario	.91
Figura 51. Proceso de elaboración de circuitos impresos con método de la plane	cha
	.92
Figura 52. Pcb circuito adquisición y acondicionamiento señal RTD-PT100	.93
Figura 53. Circuito impreso fuente dual regulada y filtrada	.93
Figura 54. Pcb modulo control, adquisición de señal e interfaz de comunicación	.94
Figura 55. Pcb circuito control de potencia para intercambiador de calor	.94
Figura 56. Pcb circuito control de potencia para compresor de aire	.95
Figura 57. Pcb fuente DC 5V	.95
Figura 58. Pcb conector USB para el módulo de control	.96
Figura 59. Módulo de control implementado	.96
Figura 60. Proceso construcción servoválvulas	.98
Figura 61. Proceso implementación chispa eléctrica para el intercambiador	de
calor	.99
Figura 62. Acople de intercambiador de calor con tolva de tostión y las o	dos
servoválvulas de control (Máquina de tostión)	100
Figura 63. Sistema de control final en operación	101
Figura 64. Respuesta del sistema frente una referencia de temperatura fijada	en
180°C	101
Figura 65. Respuesta del sistema frente a una referencia fijada en 172°C	103
Figura 66. Sistema de control en operación	104
Figura 67. Respuesta del sistema ante una entrada de escalón	105
Figura 68. Respuesta del sistema de control ante una entrada de rampa	106

Figura 69. Acercamiento primeros segundos de la respuesta del sistema de control
ante una rampa107
Figura 70. Acercamiento últimos segundos de la respuesta del sistema de control
ante una rampa108
Figura 71. Respuesta del sistema de control ante una Curva de tostión109
Figura 72. Tostión de Granos de café en la maquina implementada110
Figura 73. Segundo perfil de tostión realizado por el sistema de control110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Proceso de tostión del café	23
Tabla 2. Condiciones iniciales tostión	26
Tabla 3. Características servomotor Towerpro mg996r	74
Tabla 4. Conjuntos difusos del error	82
Tabla 5. Conjuntos difusos del cambio de error	83
Tabla 6. Conjuntos difusos de la variable de salida "apertura de la llave"	84
Tabla 7. Base de reglas para el control difuso tipo proporcional derivativo	85
Tabla 8. Principales variables de respuesta para el sistema de control ante u	ına
entrada de escalón	105
Tabla 9. Ficha técnica tostión N°2 producto tostado	111

LISTA DE ANEXOS

Pá	g.
ANEXO A. TIPOS DE CONTROL ELECTRÓNICO11	7
ANEXO B. SENSORES DE TEMPERATURA TERMOPAR12	:8
Anexos del C al D se encuentran Dentro del CD-ROM.	
ANEXO C: Circuitos en pdf de las unidades desarrolladas listos para su impresión	١.
ANEXO D: Código fuente de la aplicación de control.	
ANEXO E: Código fuente del firmware.	
ANEXO F: Sistemas de tueste.	
ANEXO G: Manual de usuario.	

GLOSARIO

QUENCHING: Proceso de enfriamiento sobre los granos de café por aspersión de agua.

TORREFACCION: Proceso en el que se somete cierta cantidad de café verde a condiciones de temperatura y tiempo para producir cambios en la estructura y composición del grano desarrollando el sabor y aroma característico del café tostado.

TOLVA DE TOSTIÓN: Recipiente en donde se lleva a cabo la tostión de los granos de café.

DESECACIÓN: Fenómeno por el cual en el café se desprende vapor de agua y comienza la volatización desarrollando además un olor a pan tostado.

PIROLISIS: Descomposición de grandes estructuras químicas por medio de calor.

DISGREGACIÓN: Desunión de las partes de un todo que era compacto.

CREPITACIÓN: Producción de humo y la aparición del aroma del café.

DESHIDRATACIÓN: Fenómeno por el cual el café presenta una pérdida de peso y agua mientras se lleva a cabo el proceso de tostión del grano.

PIROGENACIÓN: Reacción química que se obtiene sometiendo los cuerpos a temperaturas elevadas.

PROPIEDADES ORGANOLÉPTICAS DEL CAFÉ: Se refieren a la acidez, el amargo, el cuerpo, el dulzor y el sabor del café percibidas por el consumidor al probar la taza de café.

TOSTIÓN DE CAFÉ MEDIANTE EL MÉTODO DE LECHO FLUIDO: Método de tostión por convección en el cual el grano de café verde es tostado por medio de una corriente de aire caliente que mantiene suspendidos los granos en el aire con el fin de lograr un tueste homogéneo y de calidad.

DISCAF: Marca reconocida de equipos profesionales para la tostión de café.

ETIQUETA: Dentro de la lógica difusa se define como el nombre descriptivo usado para identificar un conjunto difuso.

VARIABLE LINGÜÍSTICA: Es aquella variable que puede tomar por valor términos del lenguaje natural, como mucho, poco, positivo, negativo entre otros,

que son los calificativos que desempeñan el papel de etiquetas en un conjunto borroso.

UNIVERSO DE DISCURSO: Rango de todos los valores posibles aplicados a una variable lingüística.

HIERRO FUNDIDO: Más conocido como fundición gris es un tipo de aleación conocida como fundición, cuyo tipo más común es el conocido como hierro fundido gris.

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN: Es un dispositivo creado a partir de amplificadores operacionales. Está diseñado para tener una alta impedancia de entrada y un alto rechazo al modo común (CMRR). Se puede construir a base de componentes discretos o se puede encontrar encapsulado.

FILTRO DE SALLEN KEY: Es un tipo de filtro electrónico activo particularmente valioso por su simplicidad. El circuito produce un filtro pasa bajo o pasa alto de dos polos usando dos resistencias, dos condensadores y un amplificador. Para obtener un filtro de orden mayor se pueden poner en cascada varias etapas.

FILTRO DE BUTTERWORTH: Es uno de los filtros electrónicos más básicos, diseñado para producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte.

SERVOVÁLVULA: Es un accionamiento de tipo mecánico hidráulico o neumático a diferencia con las válvulas convencionales se puede decir que la servoválvula controla o varia el caudal o la presión de salida, mientras que las válvulas convencionales entregan todo o nada.

RED SNUBBER: Circuito RC de protección para evitar que un triac se active inesperadamente.

RESUMEN

La presente investigación muestra un desarrollo tecnológico para controlar la temperatura en el proceso de tostión del café, lo cual es determinante en la calidad del producto.

La primera etapa corresponde a un análisis preliminar sobre la tostión del grano en la cual se concluye que es un proceso complejo en el que intervienen reacciones químicas y físicas que aportan las características de sabor, olor, aroma y cuerpo; con lo cual se obtiene diferentes tipos de café según la variación de la temperatura.

En la segunda etapa se establecieron las características técnicas y operativas del sistema de control teniendo como base el diseño de un prototipo para una máquina que tuesta el café por medio de aire caliente.

El sistema está compuesto por un módulo de hardware, que desarrolla las fases de acondicionamiento de la señal de temperatura, el control de potencia y un software de control basado en lógica difusa.

El prototipo controla de manera óptima la temperatura y el tiempo del proceso, siguiendo fielmente una referencia variable, logrando potenciar la calidad del café hasta la obtención de cafés especiales, alcanzando así, un impacto positivo en el desarrollo de la región, tanto en el ámbito económico como social al ser una alternativa replicable en el sector agrario.

ABSTRACT

This research shows a technological development to control the temperature of the coffee roasting process, which is determinant in product quality.

The first stage is a preliminary analysis of the roasting of the grain, it was concluded that it is a complex process involving chemical and physical reactions that provide the characteristics of taste, smell, aroma and body; whereupon different types of coffee are obtained by varying the temperature.

In the second stage, the technical and operational characteristics of the control system are established on the basis of a prototype design for a machine that roasts coffee by hot air.

The system is composed of a hardware module which develops the phases of packaging of the temperature signal, the power control and control software based on fuzzy logic.

The prototype controls the temperature and time optimally, this system follows a variable reference for enhance the quality of special coffees for the develop of the Region, in the economic and social dimension, thank your cheap cost, and your relation with the community.

INTRODUCCION

La región nariñense ofrece un café con características particulares que lo sitúan como uno de los mejores del mundo. Dentro de la línea de producción del café hay varias etapas que le dan valor agregado, siendo el proceso de tostión uno de los más importantes y el que menos está desarrollado en la región. En este proceso se inducen los cambios en el café verde produciendo los compuestos que originan el aroma característico, sabor, olor y cuerpo del café, los cuales serán diferentes entre uno y otro tipo de café dependiendo principalmente de la variación de la temperatura a lo largo del tiempo, lo cual se refleja en la calidad del producto final.

Con el objetivo de realizar un proceso de tostión de calidad, se presenta en este documento el diseño e implementación de un sistema de control para una máquina que funciona a base de aire caliente; desarrollada simultáneamente en el grupo de investigación MORASURCO de la Universidad de Nariño, para la cual se desarrolla una investigación preliminar sobre el proceso de tostión de café y de esa forma tener una idea clara de las variables que intervienen en dicho proceso. Luego se establece los parámetros operativos y técnicos del prototipo que permiten el diseño tanto de módulos físicos como software que conforman el sistema.

Dentro del diseño e implementación del sistema se desarrollan cinco fases principales que comprenden la obtención y acondicionamiento de la señal de temperatura, diseño de un módulo físico que realiza las funciones de control de los dispositivos actuadores, digitalización de la señal de temperatura e interfaz de comunicación con la aplicación de control por computador. Igualmente se diseña circuitos de potencia para el control de encendido del intercambiador de calor y el compresor de aire los cuales conforman la máquina de tostión. Por último se diseña e implementa una aplicación de control basado en lógica difusa con una interfaz gráfica de usuario que proporciona la manipulación y visualización de las variables de control.

Como resultado de la investigación se obtiene un sistema que permite realizar un proceso de tostión adecuado al controlar la temperatura en el dominio del tiempo, de esta forma se logra diferentes tipos de tueste de café con propiedades organolépticas especiales que incrementan la calidad del producto.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema automatizado para controlar la temperatura y el tiempo en el proceso de tostión de café.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Establecer las características técnicas y operativas de un sistema electrónico para el control automático de la temperatura y el tiempo en el proceso de tostión de café.
- ✓ Diseñar el sistema electrónico para el control automático de la temperatura y el tiempo en el proceso de tostión de café.
- ✓ Implementar el sistema electrónico para el control de las variables involucradas en el proceso de tostión de café.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 EL PROCESO DE TOSTIÓN DEL CAFÉ

La tostión del café es un proceso en el cual intervienen mecanismos de transferencia de calor y de masa simultáneamente. Depende del tiempo y la temperatura, donde se inducen los cambios en el café verde produciendo los compuestos que originan el aroma característico, sabor, olor y cuerpo del café. Existen grandes diferencias entre el café tostado y el café verde o crudo, porque al sufrir este proceso, la composición del café se modifica en su estructura; estas modificaciones pueden ser tanto físicas (volumen, densidad, color, dureza), como también cambios de tipo químico que dan origen a las cualidades organolépticas del café. La tostión del café se realiza a nivel de laboratorio bajo las siguientes condiciones: Antes de tostar el café es necesario trillar y limpiar el grano, retirando impurezas o materiales extraños y eliminar los granos defectuosos. Se utiliza un café verde perfectamente seco entre 10% y 12% de humedad y distribución granulométrica centrada (tamaño de partícula uniforme). La torrefacción se realiza frecuentemente en un recipiente cerrado (con un orificio, para depositar el café), que está en continuo movimiento para evitar que los granos se quemen y así puedan afectar las propiedades organolépticas. El tiempo de tostión y el grado de color varían según la temperatura, el diseño del tostador, la forma de transferir el calor y el tipo de café. La tostión se obtiene a diferentes temperaturas que varían entre 180°C y 230°C y donde el café sufre una pérdida de peso que varía entre 15% y 20%. Debe procurarse un calor uniforme y gradual. En la tostación hay un aumento de volumen a causa del dióxido de carbono interior, por lo tanto el tostador no debe llenarse para facilitar el movimiento del café, ya que el volumen se puede incrementar entre 1,8 a 2,0 veces el volumen del grano verde.

"El café tostado puede conservar las propiedades adquiridas en el proceso por varios días en recipientes cerrados, limpios y perfectamente secos. Si se deja al aire libre pierde su frescura y aroma. Al final de la tostión, el café se deja enfriar utilizando un corriente de aire frío que pasa a través de una malla o por Quenching (apagado), término utilizado cuando se aplica agua por aspersión"¹.

En cuanto a lo que se refiere a máquinas de tostar café existe una gran variedad de estas en el mercado, donde cada uno de sus fabricantes describe las bondades de ellas.

21

¹ LAGOS, Camilo; PORTILLA, Daniel y RUIZ, Jaime. Informe diseño y fabricación de una máquina para tostión para la microempresa "ALIANZA CAFÉ VIDA". Pasto: s.n. 2012. p.13

- **Sistemas de tueste:** Hay dos grandes divisiones: Tostadoras de café por cargas y tostadoras en continuo, según se encadenen procesos de tueste uno tras otro, o sea un único proceso continuamente alimentado.
- **a. Tostadoras por cargas**: Es el sistema más extendido y utilizado por la mayoría de Tostadores. Existe una gran diversidad de máquinas con capacidades de tueste que oscilan entre los 150 gramos hasta los 300 kg. El funcionamiento interno para el tostado del café más generalizado se rige por el sistema de tostado en tambor.
- **b. Tostadoras para torrefacto:** El torrefacto utiliza un sistema de tueste esencialmente igual al tostado del café natural, pero con alguna variante obligada por la necesidad del añadido del azúcar o producto equivalente en la mitad del proceso. Existen en el proceso tres pasos diferenciados:
- ✓ Entra el café en el bombo y es llevado hasta una temperatura 20/30 grados por debajo de la de tueste.
- ✓ Se introduce el azúcar, sacarosa o jarabe de glucosa para ser mezclado y fundido alrededor de los granos de café. Este paso dura unos 4 minutos, durante el cual el aire circula por el exterior del bombo para no arrastrar el azúcar al decantador de cascarilla.
- ✓ Último paso que se inicia con la caramelización del azúcar alrededor de cada grano. Aquí el aire caliente circula mayoritariamente por el interior del bombo y en menor cantidad por el exterior, por contacto. En este paso puede introducirse agua para enfriar el producto. Finalizado el proceso, se descarga en una parrilla enfriadora, de las mismas características de los usadas en el tueste natural, pero con un diseño especial el cual hace que mediante un sistema de palas desgranadoras y removedoras separa grano a grano y deja el café completamente suelto y sin que quede pegajoso.

2.1.1 Fases de la tostión. En la tostión hay cinco fases principales que son:

Desecación, crecimiento, disgregación, tostado completo y enfriamiento. Los primeros cambios se presentan a 50°C en las capas superficiales, a los 100°C el color verde del café comienza a cambiar a amarillo, en éste momento empieza la desecación donde se desprende vapor de agua y comienza la volatilización desarrollando además un olor a pan tostado. Alrededor de los 120°C a 130°C, el grano adquiere una coloración castaña que varía poco a poco a coloraciones pardas, acompañado de un aumento en el volumen y su olor todavía no es característico. Alrededor de los 180°C el olor comienza a ser característico y a causa de la pirolisis (descomposición de grandes estructuras químicas por medio de calor) aparecen productos gaseosos como vapor de agua, CO2, CO, compuestos volátiles por la descomposición de los carbohidratos, proteínas y grasas que son los causantes del aumento del volumen en el grano, el cual

comienza a tomar una coloración marrón y se caramelizan los azúcares. En este momento se inicia una fase de descomposición caracterizada por el rompimiento de la estructura celular de los granos debido a sobrepresiones internas (crepitación), producción de humo y la aparición del aroma del café, en éste instante las reacciones endotérmicas alcanzan su punto máximo.

Posteriormente comienzan las reacciones exotérmicas debido al calor de reacción dentro del grano, que hacen que éste alcance temperaturas hasta 200°C aproximadamente. Después de alcanzada la óptima caramelización de azúcares se obtiene la tostación completa en donde desciende el contenido de agua a valores entre 1.5% y el 3.5% en peso. La zona de tostión se encuentra entre los 180°C a 250°C siendo la temperatura óptima, la comprendida entre los 210°C y 230°C, por encima de ésta ocurre la sobretostión en donde se acentúan, el desprendimiento de humos, los granos se ennegrecen, el volumen ya no aumenta y en el peor de los casos se carbonizan, se hacen más quebradizos y el aroma desaparece. Para detener el proceso de tostión del café es necesario generar un enfriamiento rápido e inmediato de los granos, ya sea por medio de una corriente de aire o por apagado con aspersión de agua. La temperatura de tostión es muy importante va que tiene una fuerte influencia sobre las cualidades del café. La duración de la tostión es aproximadamente de 5 a 12 minutos (bajo condiciones dadas). Éste tiempo varía según el equipo que se utilice y la cantidad de almendra de café adicionada. En la tabla 1 se puede resumir el proceso de tostión².

Tabla 1. Proceso de tostión del café

Temperatura del grano (°C)	Color	Volumen	Proceso	
100	Amarillo	No se modifica	Desecación y pérdida de agua.	
120-130	Castaño	No se modifica	Reacciones de reducción de azúcares y aminoácidos.	
130-180	Marrón	Aumenta	Caramelización de azúcares.	
180-200	Marrón	Aumenta	Producción de CO2 por pirogenación de carbohidratos, proteínas y grasas.	

23

² PRIETO, Yenni. Caracterización física de café semitostado. Bogotá: Tesis ingeniería química, Universidad América, 2002. p.17

200-230	Marrón	Aumenta	Agrietamiento del grano	
			(crepitación) y afloramiento del	
			aceite en la superficie.	
250	Negro sin	Deja de	Sobretostión, se	
	brillo	aumentar	Carboniza y el aroma	
			desaparece.	

Fuente: LOPEZ, E.M. Extracción de aceite esencial a partir de café brocado. Manizales. Universidad Nacional de Colombia, 1997. Citado por: PRIETO, Yenni. Caracterización física de café semitostado. Bogotá: Tesis ingeniería química, Universidad América, 2002.

2.1.2 Variables importantes del proceso de tostión. Con el fin de identificar las variables más importantes que intervienen en el proceso de tostión es necesario considerar las principales características y las condiciones que determinan la calidad del café tostado.

El café es el producto de mayor complejidad entre el grupo de los alimentos y bebidas. Su constitución involucra entre 700 a 850 compuestos constituyentes del aroma y el sabor. La formación de estos compuestos depende de la variedad, el clima, el suelo, la nutrición y las prácticas culturales de producción. Estos compuestos no se pueden apreciar en el café verde. Se desarrollan durante la tostión.

Existen tres sistemas de transferencia de calor hacia los granos de café:

- **Conducción**: Transmisión de calor por contacto. Es un método de difícil control de la tostación. Es imposible obtener una calidad consistente utilizando este método.
- **Convección**: Es el método más eficiente y el más efectivo. El grano de café flota en una corriente de aire caliente. Las tostaciones son rápidas. Se logra un mayor hinchamiento del grano. Por su homogeneidad produce más bebida.
- **Por Radiación**: Se realiza mediante la radiación infra-roja, ésta generalmente, produce un sobrecalentamiento en la superficie del grano y como el café es un mal conductor del calor, se quema en la superficie externa e impide la transmisión del calor a las capas internas dejándolos crudos.

En el proceso de tostión del café se presentan una serie de cambios físicos importantes:

- Evidente reducción de peso, por la pérdida de agua, volatilización de compuestos y desprendimiento de cisco.
- Cambio de color de verde a marrón hasta negro.

- Aumento en el volumen y en la densidad.
- Cambio en la Textura.

La tostión de café en una máquina comprende tres etapas: deshidratación, tostión y enfriamiento.

- **Deshidratación**: Al elevarse la temperatura interna del grano a cerca de 100 °C el agua que contienen sus tejidos se vaporiza. Por tal razón, la evaporación del agua genera una pérdida de peso, la reducción de los carbohidratos y eliminación de la película plateada. La pérdida de agua representa entre 13 y 20 % del peso del café.
- La tostión: Se producen reacciones complejas pirolíticas. Se transforman los precursores en los 700 a 850 componentes que dan el aroma y sabor. Hay un hinchamiento celular (las paredes celulares pueden resistir hasta 25 bar de presión de gas). Producción de CO2 (5 a 12 lb./Kg. de café). Durante la tostión se producen las siguientes reacciones químicas:
 - ✓ Descomposición de aminoácidos y pérdida de proteínas (que participan en la formación del aroma, sabor amargo y compuestos metal-quelatados del café).
 - ✓ Caramelización: reacción de oscurecimiento de los azúcares calentados por encima de su punto de fusión en ausencia de proteínas o aminoácidos. Tiene lugar la isomerización y deshidratación de carbohidratos, produciendo: furanos, furanonas, lactonas, pironas, aldehídos, cetonas, ácidos, ésteres y pirazinas de bajo peso molecular o de dobles enlaces conjugados, que absorben luz y dan color.
 - ✓ Reacciones de Maillard (concentración del azúcar con aminoácidos libres, transposición de estos productos, reacción de productos de transposición, polimerización y formación de sustancias coloreadas) cambia no solo el olor y el color del café sino que al cambiar la estructura de la proteína cambia sus propiedades también.
- El enfriamiento: Al lograr el grado de tostación deseado, se debe parar inmediatamente el proceso de tostación. El enfriamiento con aire se hace con 400 m3/100 kg durante 5 min.
- Factores a tener en cuenta al tostar un Café Especial:
 - ✓ Características organolépticas.
 - √ % de humedad original (9 al 12%).

- ✓ Densidad del grano de café.
- ✓ Temperatura de la cámara de tostión durante el proceso.
- ✓ Medición precisa del punto de tostación (el color).
- ✓ Velocidad del aire en la cámara de tostación.³

2.1.3 Comportamiento de las variables en el proceso de tostión.

• Las Curvas De Tostión. El comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso de tostión se ve reflejado en las curvas o perfiles de tostión, algunas de ellas fueron obtenidos de manera experimental por el grupo de investigación MORASURCO de la Universidad De Nariño y fueron realizadas en el laboratorio de Asprounión utilizando la Tostadora de Laboratorio Quantick TC-150G, cuyo sistema de control se basa en un indicador de temperatura Autonics TZN4S y una termocupla.⁴

A continuación se muestran dos de los perfiles obtenidos:

Tabla 2. Condiciones iniciales tostión.

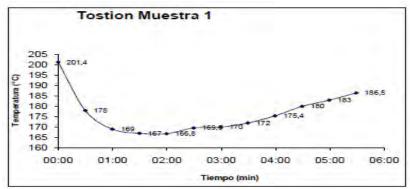
N° Muestra	Temperatura inicial (°C)	% Flujo de aire.	Masa inicial (g)	% Pérdida de Peso
1	201.4	0	100	15.2
2	201.6	100	100	15.3

Fuente: LAGOS, Camilo; PORTILLA, Daniel y RUIZ, Jaime. Informe diseño y fabricación de una máquina para tostion para la microempresa "ALIANZA CAFÉ VIDA". Pasto: s.n. 2012.

³ DIAZ, Mario. Estudio de factibilidad para producir y exportar café gourmet a Alemania, en Marcala, Honduras. Zamorano: Tesis ingeniería Agronómica, U. Zamorano, 2001.p. 23

⁴ LAGOS, Camilo; PORTILLA, Daniel y RUIZ, Jaime. Informe diseño y fabricación de una máquina para tostión para la microempresa "ALIANZA CAFÉ VIDA". Pasto: s.n. 2012. p. 23

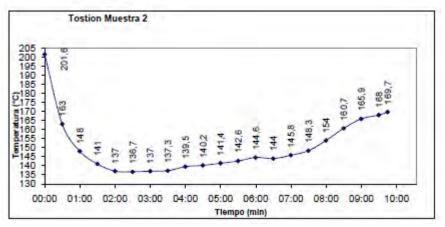
Figura 1. Perfil de tostión de la muestra N°1



Fuente: LAGOS, Camilo; PORTILLA, Daniel y RUIZ, Jaime. Informe diseño y fabricación de una máquina para tostión para la microempresa "ALIANZA CAFÉ VIDA". Pasto: s.n. 2012.

En la figura 1 se muestra un perfil de tostión en el cual se observa la variación de temperatura durante el proceso de tostión. En los primeros dos minutos la temperatura pasa de un valor de 201.4°C hasta 167°C aproximadamente, en este periodo el café cumple la fase de desecación. Después hasta el minuto 4 el café se encuentra en la etapa de crecimiento en la cual el volumen del grano aumenta, posteriormente pasa a la fase de disgregación hasta el minuto 5, desarrollando las propiedades organolépticas de este tueste y en el último minuto se realiza el tostado completo del café.

Figura 2. Perfil de tostión N°2



Fuente: LAGOS, Camilo; PORTILLA, Daniel y RUIZ, Jaime. Informe diseño y fabricación de una máquina para tostion para la microempresa "ALIANZA CAFÉ VIDA". Pasto: s.n. 2009.

En la figura 2 se muestra una tostión para la cual se tuvo como condición inicial la entrada de aire de la maquina al 100% (muestra N° 2), como consecuencia se obtuvo una tostión más prolongada en el tiempo, dando como resultado una muestra de café con características organolépticas distintas a la primera muestra tostada.

De las anteriores tostiones se infiere que al manipular las variables de temperatura, tiempo e ingreso de aire se pueden obtener diferentes muestras de café con aroma, sabor, etc. particulares.

2.1.4 Máquina para tostión de café con sistema tambor y aire caliente. En esta sección se presenta el diseño de una máquina de tostión hibrida que reúne las ventajas de los métodos por lecho fluido y el método de convección, máquina utilizada para el desarrollo del presente proyecto, que es el resultado de la investigación "DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA TOSTIÓN PARA LA MICROEMPRESA "ALIANZA CAFÉ VIDA" investigación hecha dentro del grupo de investigación MORASURCO de La Universidad de Nariño.

El modelo hibrido presentado trata de aprovechar las características más sobresalientes de los dos métodos, llegando a un sistema compuesto por un intercambiador de calor, que proporciona aire caliente por medio del cual se tuesta el café, y una tolva de tostión que integra un tambor giratorio encargado de mantener el café en el aire el mayor tiempo posible y permitir que el aire caliente actué homogéneamente sobre todos los granos, el diseño preliminar se muestra en la figura 3.

El sistema tiene las siguientes características:

- Consumo menor de energía, al no tener que generar potencia en aire para mantener los granos de café suspendidos el mayor tiempo posible en el aire.
- Menos problemas de contaminación del grano tostado por granos quemados pues el sistema se encarga de eliminar estos gases.
- No existe problemas de contaminación de los granos por gases de combustión.

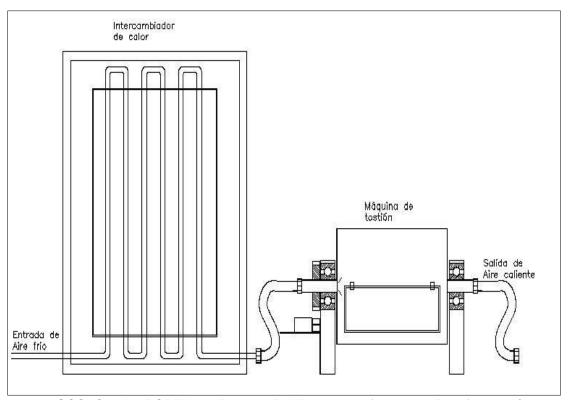
La cantidad de aire caliente se mantiene constante o varía según las características de la tostadora, escalonando su temperatura durante todo el proceso. Este aire es relativamente seco, con un contenido de agua de los gases de escape de 18 g por m³. Con este sistema se consigue una gran uniformidad del tueste del grano, tanto en el núcleo como en la superficie, debido al reparto uniforme del aire caliente en toda la masa de café que está girando dentro del bombo. Este sistema es óptimo para tostar cafés de diferentes características y permite realizar tuestes oscuros.

⁵ LAGOS; PORTILLA y RUIZ, Op. Cit., p.85.

El sistema resultante está constituido por las siguientes partes mecánicas:

- Intercambiador de calor: Este elemento está conformado por un serpentín en hierro fundido, el cual permite calentar el aire que circula en su interior a una temperatura máxima de 250°C además consta de quemadores de GLP encargados de quemar el gas para generar calor y una carcasa en hierro fundido cuya función es proveer el aislamiento al intercambiador. El diseño se presenta en la Figura 3 y su implementación en la figura 4 (lado derecho).
- Tolva de tostión: Recipiente en el cual se lleva a cabo la tostión del grano, mostrado en la figura 4 (lado izquierdo).

Figura 3. Diseño preliminar, maquina de tostion de café por medio de aire y GLP



Fuente: LAGOS, Camilo; PORTILLA, Daniel y RUIZ, Jaime. Informe diseño y fabricación de una máquina para tostion para la microempresa "ALIANZA CAFÉ VIDA". Bogotá: s.n. 2000.

Figura 4. Implementación intercambiador de calor y tolva de tostión



Fuente: Esta investigación.

2.2 LÓGICA DIFUSA

En los años 60's fue el surgimiento de la teoría de la lógica difusa, debido a Lotfi Zadeh, quien enfatiza, en que el punto primordial de la lógica difusa es proveer un sistema formal, computacionalmente provisto de conceptos y técnicas para tratar con modos de razonamiento, los cuales son aproximados en lugar de exactos. En la lógica difusa se puede ver que todo está en términos de grado de pertenencia a un conjunto.

La lógica difusa se ha convertido en una de las disciplinas matemáticas con gran aplicación en la actualidad tales como: lavadoras de ropa, sistema de frenos en trenes, sistemas de aire acondicionado, procesado de imágenes, etc. Las principales razones son, la sencillez conceptual de los sistemas basados en lógica difusa, su facilidad para adaptarse a casos particulares, su habilidad para combinar en forma unificada expresiones lingüísticas con datos numéricos, y el no requerir de algoritmos muy sofisticados para su implementación.

La lógica difusa se basa en la relatividad de lo observado. Proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de una información de entrada ambigua. Se adapta mejor al mundo real en el que vivimos, e incluso puede funcionar con nuestras expresiones, del tipo "hace mucho calor", "no es muy alto", "el ritmo del corazón está un poco acelerado", etc. La clave de esta

adaptación al lenguaje se basa en comprender los cuantificadores de nuestro lenguaje, por ejemplo, "mucho", "medio", "bajo" y "muy bajo". La lógica difusa puede entenderse como la posibilidad de asignar más valores de verdad o falsedad a los resultados de "falso" "verdadero". El objetivo de todo sistema manejador de una lógica difusa es describir los grados de los enunciados de salida en términos de los de entrada.⁶

2.2.1 Conjuntos difusos. Una buena estrategia para representar la teoría de conjuntos difusos, consiste en recordar algunos aspectos de la teoría de conjuntos clásicos, y a partir de allí hacer una extensión a los conjuntos difusos.

Un conjunto clásico se define como una colección de elementos que existen dentro de un universo, cada uno de los elementos del universo pertenece o no a un determinado conjunto. "Por lo tanto, cada conjunto puede definirse completamente por una función de pertenencia, que opera sobre los elementos del universo, y que le asigna un valor de 1 si el elemento pertenece al conjunto y de 0 si no pertenece".⁷

Ahora bien, un conjunto difuso se define de forma similar, con una diferencia conceptual importante: un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto. De esta forma, un conjunto difuso que existe dentro del universo, se define como todos aquellos elementos que pueden ser calificados mediante un grado de pertenecía. Este se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso: para cada valor que puede tomar la variable x la función característica $\mu_A(x)$ proporciona el grado de pertenencia de ese valor x al conjunto difuso A, definido como:

$$A = \{x, \mu A (x) | x \in U\}$$
 (1)

Donde U es el universo de discurso continuo (por ejemplo, todos los números reales: U=R).⁸

Las primeras diferencias que se hacen evidentes entre los conjuntos clásicos y los conjuntos difusos son las siguientes:

⁶ MARTÍNEZ DEL BRÍO, Bonifacio y SANZ MOLINA, Alfredo. Redes Neuronales y Sistemas Borrosos. Buenos Aires: Alfaomega, 2007. p. 60.

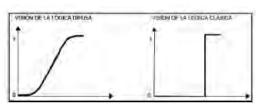
⁷ PINEDA CANDO, Marco Antonio y VIVAS PASPUEL, Atal Kumar. Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos. [Tesis para optar al título de Ingeniero electrónico]. Quito: Escuela Politécnica Nacional de Quito. 2008. p. 30.

⁸ ORTIZ, Rodríguez. Modelado y control PD-difuso en tiempo real para el sistema barra-esfera, CINVESTAV. Bogotá: s.n. 2004.

- La función de pertenencia asociada a los conjuntos clásicos sólo pueden tener dos valores: 0 ó 1, mientras que en los conjuntos difusos pueden tener cualquier valor entre 0 y 1.
- Un elemento puede pertenecer (parcialmente) a un conjunto difuso y simultáneamente pertenecer (parcialmente) al complemento de dicho conjunto. Lo anterior no es posible en los conjuntos clásicos, ya que constituiría una violación al principio del tercer excluido.

Visto desde esta perspectiva se puede considerar que la lógica clásica es un caso límite de la lógica difusa. Así pues los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos, como se representa conceptualmente en la Figura 5.

Figura 5. Lógica difusa vs lógica clásica



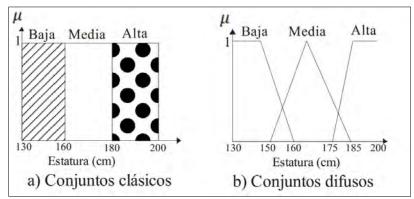
Fuente: PINEDA CANDO, Marco Antonio y VIVAS PASPUEL, Atal Kumar. Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos. [Tesis para optar al título de Ingeniero electrónico]. Quito: Escuela Politécnica Nacional de Quito, 2008.

Esta lógica permite tratar información imprecisa, como estatura alta, media o baja de una persona. Así, por ejemplo (Figura 6), un individuo es bajo si se tiene una estatura inferior a 1.60 metros, un individuo es mediano, si tiene una estatura superior a 1.60 metros e inferior a 1.80 metros y un individuo es alto, si tiene una estatura superior o igual a 1.80 metros, con lo que se lograría una clasificación en conjuntos clásicos. "Sin embargo, qué tan grande es la diferencia que existe entre dos individuos, uno con estatura de 1.79 metros y otro de 1.80 metros; este centímetro de diferencia quizás no represente en la práctica algo significativo, y a pesar de eso los dos individuos han quedado rotulados con etiquetas distintas: uno es mediano y el otro es alto. Si se optase por efectuar la misma clasificación con conjuntos difusos estos cambios abruptos se evitarían, debido a que las fronteras entre los conjuntos permitirían cambios graduales en la clasificación."

_

⁹ PINEDA CANDO y VIVAS PASPUEL, Op. Cit., p.30.

Figura 6. Conjuntos difusos para la variable estatura



Fuente: PINEDA CANDO, Marco Antonio y VIVAS PASPUEL, Atal Kumar. Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos. [Tesis para optar al título de Ingeniero electrónico]. Quito: Escuela Politécnica Nacional de Quito, 2008.

A continuación describiremos algunos conceptos importantes:

- "Etiqueta: Nombre descriptivo usado para identificar un conjunto difuso.
- Variable lingüística: Es aquélla que puede tomar por valor términos del lenguaje natural, como, mucho, poco, positivo, negativo, etc., que son los calificativos que desempeñan el papel de etiquetas en un conjunto borroso"¹⁰.
- Universo de discurso: Rango de todos los valores posibles aplicados a una variable lingüística.

2.2.2 Funciones de pertenencia. Como ya se mencionó anteriormente la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto. Este grado de pertenencia se define mediante una función característica asociada al conjunto difuso, llamada función de membresía o pertenencia. Así, si se define un conjunto difuso "A" con n elementos: la función de membresía quedaría definida por $\mu_A(x)$, donde para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada (x), la función de membresía $\mu_A(x)$ proporciona el grado de pertenecía de este valor de (x) al conjunto difuso A. La única condición que deben de cumplir es que $\mu_4(x) \in [0,1]^{11}$

Muchos conceptos de teoría clásica de conjuntos se pueden hacer extensivos a los conjuntos difusos, otros son exclusivos e inherentes a la teoría de conjuntos difusos. A continuación se muestran algunos de los más utilizados:

MARTÍNEZ DEL BRÍO, Op. Cit., p.55.
 PASSINO M, Kevin y YURKOVICH, Stephen. Fuzzy Control; Addison Wesley. EEUU: s.n. 1998.

• El soporte de un conjunto difuso A en el universo de discurso U es un conjunto "crisp" (numérico) que contiene todos los elementos de U que tienen un valor de pertenencia mayor a cero en A, esto es:

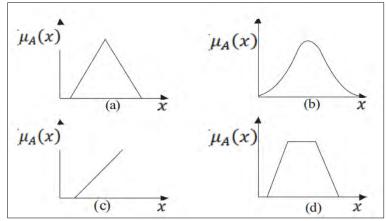
Sop
$$(x) = \{x \in U \mid \mu_A(x) > 0\}$$
 (2)

Si el soporte de un conjunto difuso no contiene ningún elemento, se tiene un conjunto difuso vacío. Si el soporte de un conjunto difuso es solo un punto, se tiene lo que se conoce como "singleton" difuso.

- El punto de cruce de un conjunto difuso, es el punto donde $\mu_A(x) = 0.5$.
- Dos conjuntos difusos A y B son iguales si y sólo si sus funciones de pertenencia μ_A (x) y μ_B (x) son iguales.

La forma de la función de membresía utilizada, depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y varía en la experiencia del usuario. Existen varios tipos de funciones de membresía como: singleton, triangular, trapezoidal, pi, monotónica, S, gama, gaussiana o forma de campana, y sigmoidal, pero las más utilizadas por su simplicidad matemática y operación son: triangular, forma de campana, monotónica y trapezoidal, como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Funciones típicas de membresía



Fuente: JIMÉNEZ, L. Algunas aplicaciones de la lógica difusa a teoría de control. Bogotá: Instituto Politécnico. s.f.

"El número de funciones de membresía depende del diseñador. A mayor número de funciones tendremos mayor resolución, pero también mayor complejidad computacional, por lo que se recomienda un número impar, de 3 a 7, con un solapamiento del 20% al 50%"12.

2.2.3 Operaciones entre conjuntos difusos. Puede aplicarse determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos. Para los conjuntos difusos existen varias operaciones, pero sólo describiremos las más utilizadas que son: unión, intersección y complemento. Antes de introducir las operaciones de los conjuntos difusos, definiremos lo que es un subconjunto difuso.

Definición 1 (Subconjunto o contención): "Para dos conjuntos difusos A y B sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$, se dice que el conjunto difuso A está contenido en el conjunto difuso B, si y solamente si $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ Es decir;"¹³

$$A \subseteq B \iff \mu_A(x) \le \mu_B(x) \tag{3}$$

Definición 2 (Unión): Para dos conjuntos difusos A y B sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ se dice que el resultado de efectuar la operación de unión entre estos dos conjuntos (que en lógica binaria es el equivalente de una operación OR), es un nuevo conjunto difuso AUB definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $\mu_{AuB}(x)$, dada por:

$$\mu_{AuB}(x) = \max \{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$
 (4)

Definición 3 (Intersección): Para dos conjuntos difusos A y B definidos sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia $\mu_A(x), \mu_B(x)$, se dice que el resultado de efectuar la operación de intersección entre estos dos conjuntos (que en lógica binaria es el equivalente (AND), es un nuevo conjunto difuso A ∩ B definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $\mu_{A \cap B}(x)$, dada por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}$$
 (5)

Definición 4 (Complemento): "Para un conjunto difuso A definido sobre un universo de discurso **U**, y cuya función de pertenencia es $\mu_A(x)$, se dice que el resultado de efectuar la operación de complemento (que en lógica binaria es el

¹² MARTÍNEZ DEL BRÍO, Op. Cit., p. 33. ¹³ JIMÉNEZ, L. Op. Cit., p. 55.

equivalente de la operación NOT), es un nuevo conjunto difuso A', definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $\mu_A(x)$, dada por:"¹⁴

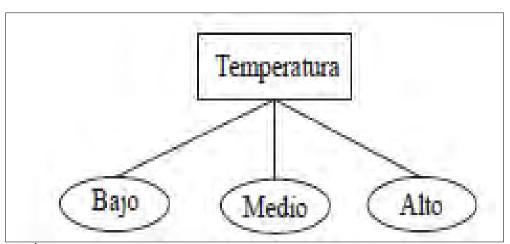
$$\mu_A(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{6}$$

2.2.4 Fusificación. En esta etapa se transforman los parámetros físicos de un sistema en variables difusas, donde a cada variable física se le asigna un grado de pertenencia en cada uno de los conjuntos difusos que se han considerado, mediante las funciones de membresía asociadas a estos conjuntos difusos.

El primer paso en la fusificación es dividir el universo de discurso, asignando etiquetas en cada variable difusa. Después, se establecen las funciones de membresía para dar significado numérico a cada etiqueta. En el proceso, las funciones de membresía definidas sobre las variables de entrada mapean a los datos presentes para determinar el grado de pertenencia.

"Por ejemplo, en la Figura 8, los valores difusos de la variable lingüística o variable difusa temperatura podrían ser BAJO, MEDIO y ALTO; estos argumentos se conocen como valores difusos, cada uno de ellos está modelado por su propia función de pertenencia (Figura 9)."15

Figura 8. Valores difusos



Fuente: JIMÉNEZ, L. Algunas aplicaciones de la lógica difusa a teoría de control. Bogotá: Instituto Politécnico. s.f.

PINEDA CANDO y VIVAS PASPUEL, Op. Cit., p. 55.
 JIMÉNEZ, L. Op. Cit., p. 55.

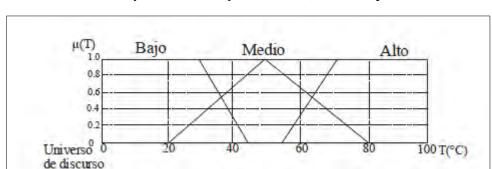


Figura 9. Funciones de pertenencia para BAJO, MEDIO y ALTO

Fuente: JIMÉNEZ, L. Algunas aplicaciones de la lógica difusa a teoría de control. Bogotá: Instituto Politécnico, s.f.

2.2.5 Base de conocimiento. Comprende un conocimiento del dominio de aplicación. La base del conocimiento de un sistema difuso consiste de dos componentes: una base de datos y una base de reglas del comportamiento del sistema. Las bases de datos contienen la definición lingüística de las variables tanto de entrada como de salida. Define la semántica de cada variable lingüística.

"Las bases de reglas combinan uno o más conjuntos difusos de entrada, llamados antecedentes o premisas, y les asocian un conjunto difuso de salida, llamado consecuente o consecuencia" 16.

If premisa (antecedente), THEN conclusión (consecuente)

Los conjuntos difusos de la premisa se asocian mediante conjuntivas lógicas como (AND) y (OR). Esto permite expresar el conocimiento del que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes mediante implicaciones difusas. Para expresar este conocimiento de forma completa, normalmente se precisa de varias reglas que se agrupan como una tabla de reglas o bien como una memoria asociativa difusa o FAM. Las FAM son matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para cada combinación de dos entradas.

Existen diversas formas de derivar las reglas, entre las que destacan las basadas en:

- La experiencia de expertos y el conocimiento de ingeniería de control. La base de reglas se determina a partir de observar y analizar la forma en que el operador maneja el sistema.
- La modelación del proceso, en el cual los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de datos de entrada y salida del proceso.

 $^{^{16}}$ TIMOTHY J, Ross. Fuzzy Logic with engineering applications. EEUU: John Wiley & Sons Ltda, 2004.

2.2.6 Inferencia difusa. La inferencia lógica se ocupa del razonamiento formal con proposiciones, pero a diferencia de la lógica clásica, los valores de las proposiciones pueden tomar valores intermedios entre verdadero y falso.

En lógica difusa el razonamiento no es preciso, sino aproximado, lo cual quiere decir que se puede inferir de una regla una conclusión, aunque el antecedente (premisa) no se cumpla plenamente. Existen dos métodos básicos de inferencia entre reglas o leyes de inferencia, modus ponens generalizado (GMP) y el modus tolens generalizado (GMT), que representan extensiones o generalizaciones del razonamiento clásico.

"Para llevar a cabo la inferencia, se utilizan dispositivos de inferencia difusa, estos interpretan las reglas de tipo If-then de una base de reglas, con el fin de obtener los valores de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema" 17.

• Motor de inferencia. Realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada difusas, mediante el uso de la inferencia difusa, apoyada en la base de conocimiento, entregando conjuntos difusos de salida (Figura 10). La secuencia de cálculos que realiza el motor de inferencia¹⁸ incluye:

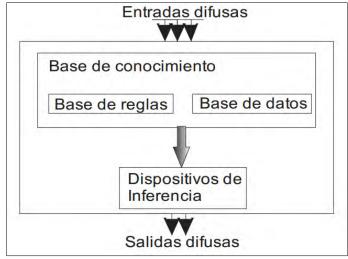


Figura 10. Máquina de inferencia difusa

Fuente: PASSINO M, Kevin y YURKOVICH, Stephen. Fuzzy Control; Addison Wesley. EEUU: s.n. 1998.

¹⁷ MARTÍNEZ DEL BRÍO, Op. Cit., p.55. ¹⁸ PASSINO y YURKOVICH, Op. Cit.

- Determina el grado de cumplimiento de cada regla a partir de los grados de pertenencia de las variables de entrada obtenidas en la fusificación.
- Utiliza un dispositivo de inferencia para interpretar la base de reglas y de datos.
- Genera una salida difusa, que es un conjunto difuso salida B', siendo éste la unión de los m conjuntos difusos mostrados en la ecuación 7.

$$\mu_{B'}(y) = \min \{ \mu_B^1(y) + \dots + \mu_B^m(y) \}$$
 (7)

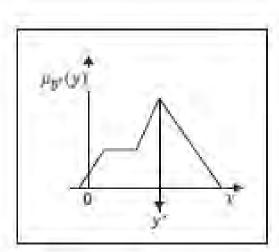
2.2.7 Defusificación. Es el bloque que a partir del conjunto difuso obtenido por la máquina de inferencia difusa, y mediante métodos matemáticos de defusificación lo transforma a un valor no difuso, definido como y^* . Para realizar esta tarea se utilizan diversos métodos.

Sea B' un conjunto difuso definido sobre un universo de discurso **U**, y cuya función de pertenencia del conjunto de salida B' es $\mu_{B_I}(y)$.

• "Defusificación por el método del máximo (CoM). Es el caso en donde la función característica del conjunto difuso tiene su máximo valor, tomando ese valor como salida, mostrado en la ecuación 8, véase Figura 11". 19

$$\mu_{B'}(y^*) = \mu_{B'}(y)$$
 (8)

Figura 11. Método Max



Fuente: TIMOTHY J, Ross. Fuzzy Logic with engineering applications. EEUU: John Wiley & Sons Ltda, 2004.

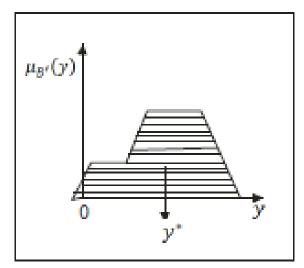
1

¹⁹ TIMOTHY, Op. Cit., p.85.

 Defusificación por el método del centroide o centro de área (CoG) (Ecuación 9). Se calcula el centro de gravedad del área limitada por la curva de la función de membresía véase Figura 12.

$$\frac{\int \mu_{B'}(y) y dy}{\int \mu_{B'}(y) dy} \tag{9}$$

Figura 12. Método de centroide



Fuente: TIMOTHY J, Ross. Fuzzy Logic with engineering applications. EEUU: John Wiley & Sons Ltda, 2004.

 "Media de máximos (MoM). La salida está definida por la ecuación 10, en donde y es el valor medio de los puntos de máximo grado de pertenencia de la función de membresía"²⁰.

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} \overline{y_i}}{n} \tag{10}$$

Por ejemplo, en la Figura 13 la salida defusificada sería $y^* = \frac{a+b}{2}$

²⁰ AHMAD M, Ibrahim. Fuzzy Logic for Embedded System Applications. EEUU: Newnes, 2004.

0.2

Figura 13. Media de máximos

Fuente: AHMAD M, Ibrahim. Fuzzy Logic for Embedded System Applications. EEUU: Newnes, 2004.

2.3 SISTEMAS DE CONTROL

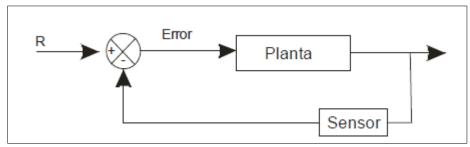
"Un sistema de control es un arreglo de componentes físicos diseñados, de tal manera que se pueda manipular, dirigir o regular a sí mismo o a otro sistema, a través de una acción de control". ²¹ La acción de control debe controlar al sistema; y para controlar se requiere medir el valor de la variable que se está midiendo del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medio a partir de un valor deseado.

Los sistemas son típicamente de dos tipos:

- Lazo abierto: Es aquel en el cual no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.
- Lazo cerrado o control realimentado: El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia (error) entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia (R) (Figura 14) y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.²²

 ²¹ TIMOTHY J, Op. Cit., p. 55.
 ²² KATSUHITO, Ogata. Ingeniería de control moderna. México: Prentice Hall, 1998.

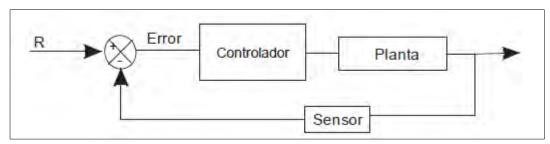
Figura 14. Lazo cerrado



Fuente: KATSUHITO, Ogata. Ingeniería de control moderna. México: Prentice Hall, 1998.

Utilizar un control realimentado en ocasiones no es suficiente para reducir el error, para ello se requiere un controlador, éste detecta la señal de error, que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y lo amplifica a un nivel lo suficientemente alto, para disminuir el error (Figura 15).²³

Figura 15. Lazo cerrado con controlador



Fuente: KATSUHITO, Ogata. Ingeniería de control moderna. México: Prentice Hall, 1998.

Los controladores industriales más difundidos se clasifican de acuerdo con sus acciones de control, como:

- De dos posiciones o de encendido apagado (on/off).
- Proporcionales.
- Integrales.
- Proporcionales-integrales (PI).
- Proporcionales-derivativos (PD).
- Proporcionales-integrales-derivativos (PID).
- ✓ **Control difuso.** El control de sistemas utilizando lógica difusa es una de las aplicaciones más interesantes de la teoría difusa, en el diseño de sistemas de control, a partir de unas entradas se deben generar unas salidas para actuar sobre determinados mecanismos.

²³ TIMOTHY J, Op. Cit., p. 55.

La lógica difusa comenzó a utilizarse en controladores por su simplicidad, ya que no requiere de operaciones matemáticas complejas, permitiendo cambiar el diseño mediante la descripción del funcionamiento con lenguaje natural.

Los controladores difusos simples por lo general se representan como se muestra en la Figura 16, en donde sus partes interactúan de la siguiente manera: el bloque de interfaz de fusificación se encarga de convertir las entradas R (referencia) y señal del sensor en conjuntos difusos, apoyado por el módulo de base de conocimiento, el cual contiene el conocimiento sobre las entradas y salidas difusas; las entradas fusificadas son entregadas al bloque de motor de inferencia, este bloque, apoyado en un conjunto de reglas de la forma **If...then...** almacenadas en la base de reglas, produce varios conjuntos difusos para que el bloque de interfaz de defusificación los tome y los convierta en salidas no difusas, aptas para la planta (A).²⁴

Controlador

Base de conocimiento

Base de reglas

Interfaz de fusificación

Motor de Inferencia

Sensor

Figura 16. Controlador difuso

Fuente: TIMOTHY J, Ross. Fuzzy Logic with engineering applications. EEUU: John Wiley & Sons Ltda, 2004.

Los controladores difusos se pueden clasificar basados en sus reglas de inferencia en dos tipos: Controlador tipo Takagi-Sugeno y Mamdani.

El controlador Mamdani sigue el siguiente formato de reglas que se muestra en la definición1: Sean A_1^l , A_n^l , B^l conjuntos difusos sobre un universo de discurso U, y x = $(x_1 ... x_n)^T \in U_1 x... x U_n$ son las entradas, mientras que R es la salida del sistema difuso. Si llamamos M al número de reglas If-THEN de la base, entonces:

If
$$x_1$$
 es A_1^l and x_2 es A_2^l and.... x_n es A_n^l THEN y es B^l (11)

En la definición 1, M = 1,2,...h, se dice que, sí un elemento x_1 presenta un grado de pertenecía mayor a cero para al conjunto A_1^l de la regla I, un elemento x_2 presenta un grado de pertenencia mayor a cero para el conjunto A_2^l

43

²⁴ Ibid.

así sucesivamente, entonces la salida es un elemento Y con un grado de pertenecía al conjunto B^l mayor a cero.

En los controladores de Takagi-Sugeno (definición 2) la función de salida es una combinación lineal de las variables de entrada, o en un caso más general, una función genérica de las variables de entrada.

If
$$x_1$$
 es A_1^l and x_2 es A_2^l and.... x_n es A_n^l THEN $y^l = f^l(x)$ (12)

Los sistemas difusos con n entradas y una sola salida, se conocen como MISO (*Multiple Input Single Output*), mientras que los que tienen varias salidas se conocen como MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

"La arquitectura del control a utilizar depende de la aplicación concreta. No resulta fácil realizar una clasificación genérica de todas las arquitecturas posibles de controladores basados en lógica difusa, no obstante, consideraremos los siguientes tres grandes grupos de controladores".²⁵

- Controladores difusos directos sin optimización. La estructura típica consiste en un pre-procesado de las variables de entrada y un post procesado de la salida del controlador, con el fin de adecuarla al proceso que se ha de controlar El tipo de pre-procesado de las entradas define la clase de controlador, en este sentido, los tipos más usuales de controlador son:
 - ✓ Controlador proporcional: X=f (e).
 - ✓ Controlador integral X=f(s).
 - ✓ Proporcional-derivativo: $X = f(e, \Delta e)$.
 - ✓ Proporcional-integral: X= f (e, s).
 - ✓ Con realimentación no lineal: X=f (R, S).

En las expresiones anteriores se denota con (e) el error, con (Δ e) su derivada y con S su integral. R representa las variables de control y S las salidas.

Estos controladores permiten realizar control de sistemas utilizando una descripción lingüística de las reglas de control. Estas reglas han de obtenerse del conocimiento que disponen los expertos sobre el control del sistema, o bien por procedimientos heurísticos.

• Controladores difusos directos con optimización. Éstos parten de la estructura de los controladores difusos directos sin optimización, añadiendo elementos que permiten ajustar sus parámetros internos con el fin de mejorar su eficiencia. Según el tipo de ajuste se distinguen diversos tipos de optimizaciones:

-

²⁵ MARTÍNEZ DEL BRÍO, Op. Cit., p. 33.

- ✓ Controladores difusos auto-organizados.
- ✓ Controladores difusos con auto-aprendizaje.
- ✓ Controladores basados en modelado difuso.
- Controladores difusos híbridos. Son aquellos controladores formados por dos controladores interconectados, de los cuales uno es convencional (como los PID) y el otro es difuso. El primero se encarga básicamente del control, garantizando un comportamiento estable, mientras que el controlador difuso actúa en paralelo, introduciendo el componente heurístico en el proceso. Este segundo controlador difuso, también puede emplearse para el ajuste de los parámetros del controlador convencional.

2.4 VENTAJAS DEL CONTROL DIFUSO Vs EL CONTROL CLÁSICO

El control clásico brinda poca información en comparación con la implementación de un control difuso, ya que el primero únicamente proporciona un enunciado o proposición que puede tomar un valor lógico por ejemplo; verdadero o falso, alto o bajo, prendido o apagado, cerrado o abierto, en fin un valor de 1 ó 0, y que si se traslada al ejemplo clásico de una puerta por ejemplo, nos diría que solo tiene dos posibilidades, que sería abierta (1) o cerrada (0) ahora, en el marco del control difuso, la puerta puede estar en diferentes estados como 0.1, 0.8, etc. no necesariamente en 1 o 0. Una gran ventaja de usar términos lingüísticos como a medias, bastante, casi poco, mucho, algo, etc., es que hace plantear el problema en los mínimos términos en los que lo haría una persona sumamente capacitada en el área.

Algunas de las ventajas del control difuso son:

- Evaluación de mayor cantidad de variables (variables lingüísticas, no numéricas, entre otras, simulando el conocimiento humano).
- Relaciona entradas y salidas sin tener que entender todas las variables permitiendo que un sistema pueda ser más confiable y estable que uno con un sistema de control clásico.
- Simplifica la asignación de soluciones previas a problemas sin resolver.
- Es posible obtener prototipos rápidamente ya que no requiere conocer todas las variables acerca del sistema antes de empezar a trabajar.
- Desarrollo más económico que el de sistemas de control clásico porque son más fáciles de designar.
- Simplifica la adquisición y representación del conocimiento y unas pocas reglas abarcan gran cantidad de complejidades.

- La utilización del control difuso es aconsejable para procesos muy complejos, cuando se carece de un modelo matemático simple o para procesos altamente no lineales.
- Un sistema de control difuso se basa más en la intuición del diseñador que en la precisión y el rigor matemático.
- Los controladores con lógica difusa pueden ser más sencillos, económicos y flexibles que los clásicos.
- Los algoritmos basados en lógica difusa para operaciones de control, tienen buena aceptación en comparación con los clásicos que no permiten enfrentarse con la complejidad y con la naturaleza mal definida de los sistemas a gran escala.
- El control difuso ofrece salidas de una forma veloz y precisa.
- Disminuye las transiciones de estados fundamentales en el entorno físico que controle.

Sin embargo el control difuso requiere mayor simulación y una excelente depuración y prueba antes de funcionar correctamente.

El control difuso permite representar el ser miembro de un conjunto como una distribución de posibilidades, pero el control clásico es solo de pertenecer o no pertenecer a un cierto conjunto. El control clásico ofrece una manipulación simbólica y el razonamiento se mira como razonamiento exacto, pero en contraparte el control difuso maneja una manipulación simbólica aunado a cálculos numéricos y su razonamiento es de índole aproximado. El control difuso ayuda con procesos que no se pueden describir con un modelado matemático o donde la naturaleza del desarrollo que se lleva a cabo es muy complejo.²⁶

٠,

²⁶ VAZQUEZ GARCIA, Luis Alberto. Algoritmos de control avanzado. [en línea] Disponible en Internet: http://royal2871.blogspot.com/ [citado abril de 2014]

3. METODOLOGIA

Esta investigación contempla cuatro etapas principales, que dan cumplimiento al desarrollo de un sistema automatizado para controlar la temperatura y el tiempo en el proceso de tostión de café en una máquina de laboratorio. En orden de ejecución fueron las siguientes: investigación preliminar sobre el proceso de tostión del café, establecimiento de las características técnicas y operativas para el control de temperatura y tiempo basadas en la máquina presentada anteriormente, diseño del módulo de control, y la implementación y calibración del sistema. En cada etapa se define las actividades necesarias para su cumplimiento además de su orden cronológico para obtener el resultado final deseado.

En la etapa I se realiza una investigación preliminar sobre el proceso de tostión de café, para tal fin se consulta diferentes fuentes de información como: artículos, revistas, libros e investigaciones además de consultoría a expertos del tema, de esta forma se obtiene el conocimiento suficiente de la manera como se realiza el proceso de tostión del grano y del método más adecuado para el control del proceso.

Después de ello, la etapa II tiene en cuenta el análisis preliminar realizado en la etapa I y procede a plantear los requerimientos técnicos y operativos necesarios para el control de la máquina que funciona a base de un flujo de aire caliente y GLP descrita anteriormente.

La etapa III desarrolla el diseño del control en 5 fases: en la primera se realiza el acondicionamiento de la señal de temperatura procedente del sensor, se diseña los circuitos electrónicos y componentes necesarios, el filtrado de señales, diseño de la fuente de alimentación por medio de software especializado como FilterPro, Proteus, entre otros; en la segunda fase se diseña el módulo de control, en primer lugar se adquiere la señal y se definen parámetros necesarios para obtener la interfaz de comunicación entre dicho módulo y el computador, por medio de los cuales se realiza la digitalización de la señal de temperatura, con esto se obtiene los datos necesarios para la realización del control de las servoválvulas, también el encendido o apagado del compresor e intercambiador de calor. Teniendo esto se procede a diseñar el hardware completo para el módulo de control; basados en las anteriores dos etapas se procede a diseñar las servoválvulas necesarias para controlar el caudal de aire frio y caliente, que hacen posible la tostión del café. Para que el sistema entre en operación es necesario realizar el diseño de una fuente de alimentación para las servoválvulas; en la fase 4 se diseña el accionamiento automático del intercambiador de calor y el compresor; por ultimo en la fase 5 se diseña e implementa la aplicación del control difuso utilizando para este fin, la aplicación Matlab, Toolbox de lógica difusa.

En este orden de ideas se desarrolla la etapa IV correspondiente a la implementación y calibración del sistema, en esta etapa se construye los circuitos diseñados, para ello se utiliza el software Eagle que permite realizar diseños de PCBS, posteriormente se realiza el montaje de los componentes externos de la máquina de tostión y se realiza el acople de ellos al módulo de control, de esta manera se obtiene el sistema final implementado, por último se realiza la calibración para obtener un funcionamiento adecuado del sistema.

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

El desarrollo del proyecto se realiza a través de cuatro etapas:

4.1 ETAPA I: INVESTIGACION PRELIMINAR SOBRE EL PROCESO DE TOSTION DEL CAFÉ Y METODOS DE CONTROL ELECTRÓNICO

Con base en la investigación en fuentes secundarias, se obtiene un conocimiento claro de cómo se realiza el proceso de tostión del grano dentro del cual se establece sus variables principales (tiempo y la temperatura), esta información permite comprender que es un proceso complejo porque dependiendo de la variación de la temperatura en el tiempo, los granos presentan diferentes fenómenos químicos y físicos que dan las características al producto final por tanto al variar la temperatura siguiendo una trayectoria se obtiene una muestra de café tostado con características de aroma, textura, sabor y color particulares y que dependen de dicho perfil de tostión, posteriormente se analizan diferentes métodos de control teniendo en cuenta las características técnicas y operativas de funcionamiento de la máquina para tostión de café planteada.

4.2 ETAPA II: ESTABLECIMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS TECNICAS Y OPERATIVAS PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA Y TIEMPO DE LA MAQUINA PARA TOSTIÓN DE CAFÉ

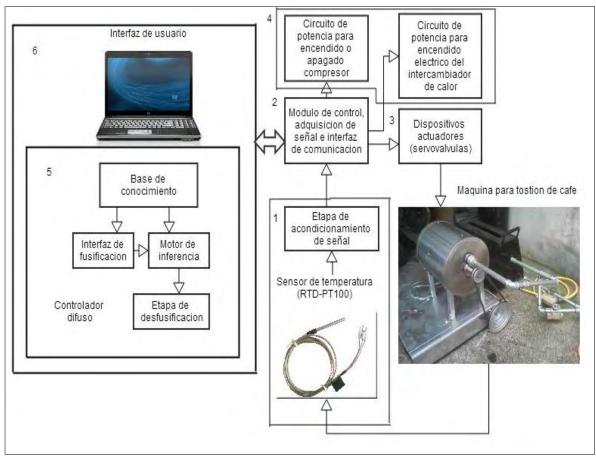
- **4.2.1 Requerimientos operativos.** De acuerdo al diseño preliminar se plantea los siguientes requerimientos que hacen posible la implementación del control de la temperatura y el tiempo en la máquina.
- Debido a que el diseño se plantea para construir una máquina de tostión de café por medio de aire caliente, es necesario la construcción de 2 dispositivos actuadores que permitan el control de caudal del aire que ingresa al intercambiador de calor para ser calentado y otro para el control del flujo de aire a temperatura ambiente que permita ser mezclado con el que sale del intercambiador y de esta mezcla obtener la temperatura deseada en la tolva de tostión.
- Implementación de una tubería de ½ "en hierro fundido para acoplar los dos dispositivos actuadores, el intercambiador de calor y la tolva de tostión.

- Es necesario diseñar un encendido eléctrico para el intercambiador de calor.
- Para el suministro del aire y correcta operación del sistema se ve la necesidad de incorporar un compresor capaz de impulsar el aire y hacerlo fluir a través del intercambiador de calor y la tubería que acopla los componentes de la máquina además de establecer la presión de aire mínima que garantice un flujo de aire óptimo en la tolva de tostión y con el cual el sistema de control de temperatura opere eficientemente, posteriormente se entregan las características para cambiar este dispositivo por un ventilador que sea capaz de impulsar el aire a la velocidad deseada.
- **4.2.2 Requerimientos técnicos.** Se Realiza un análisis del diseño de la máquina de tostión planteada y del estudio preliminar del proceso se establece los siguientes parámetros técnicos.
- El proceso de tostión del café se realiza siguiendo una trayectoria de temperatura en el tiempo por tanto el control a implementar debe seguir una referencia variable de temperatura en el dominio del tiempo.
- El dispositivo sensor de la temperatura debe ser capaz de medir esta variable en el rango de 0 a 230°C en el cual se lleva a cabo el proceso de tostión del café, además debe tener una rápida reacción frente a cambios de temperatura para evitar al máximo retrasos en el control del proceso.
- Velocidad del aire: Parámetro que junto a la temperatura de este permite determinar la cantidad de energía entregada al proceso de tostión.

4.3 ETAPA III: DISEÑO DEL CONTROL DE TEMPERATURA Y TIEMPO EN LA MAQUINA PARA TOSTION DE CAFÉ

En la figura 17 se muestra el diagrama en bloques del sistema de control propuesto, se indica las fases que lo componen que se desarrollan satisfactoriamente para lograr el objetivo de investigación.

Figura 17. Esquema en diagrama de bloques para el control de la temperatura en una máquina de tostión basada en un diseño hibrido entre tostión por lecho fluido y convección



Ésta etapa está contemplada en 5 fases:

Fase 1: Diseño del Circuito Electrónico para la Configuración de Medida y Acondicionamiento de la señal del sensor térmico

- ✓ Caracterización del sensor de temperatura RTD-PT100.
- ✓ Puente de Wheatstone en configuración siemens.
- ✓ Diferenciación y amplificación de señal.
- ✓ Filtrado de señal.
- ✓ Diseño de una fuente dual DC regulada y filtrada.

• Fase 2: Módulo de control, adquisición de señal e interfaz de comunicación

- ✓ Interfaz de comunicación USB entre Matlab y el microcontrolador.
- ✓ Digitalización de la señal de temperatura.
- ✓ Control de servoválvulas.
- ✓ Control para el encendido o apagado del compresor e intercambiador de calor.
- ✓ Diseño del hardware para el modulo.

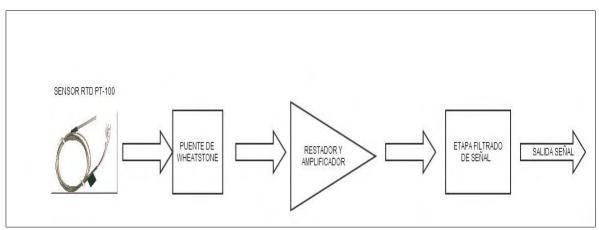
Fase 3: Servoválvulas:

- ✓ Diseño de servoválvulas.
- ✓ Diseño fuente DC 5v para alimentación de servoválvulas.

• Fase 4: Circuitos de potencia para el control de encendido del compresor de aire e intercambiador de calor:

- ✓ Control de encendido para compresor.
- ✓ Control de encendido para intercambiador de calor.
- Fase 5: Diseño e implementación del método de control: A partir de la señal de temperatura suministrada por el sensor RTD-PT100 (RTD: Resistance Temperature Detector, PT: Platino), se calcula el error y cambio de error de la temperatura, que son la entrada al bloque de control difuso tipo proporcional derivativo, el cual da como salida estados de apertura de las servoválvulas que controlan el paso de aire caliente y frio suministrado a la tolva de tostión para obtener la temperatura de referencia. Este control es implementado utilizando el Toolbox para lógica difusa de Matlab. Así mismo se construye una aplicación de control que incorpora una interfaz gráfica que permite al usuario realizar las curvas de tostión, visualizarlas, guardarlas y analizarlas.
- 4.3.1 Fase 1: Diseño del Circuito Electrónico para la Configuración de Medida y Acondicionamiento de la señal del sensor. El tratamiento de la señal se muestra en la figura 18.

Figura 18. Diagrama de adquisición y tratamiento señal sensor de temperatura

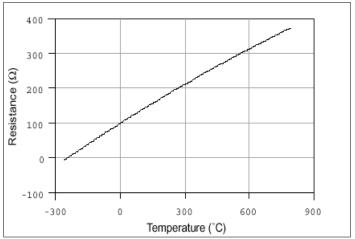


Para el caso del tueste del café se elige un sensor RTD del tipo PT-100, ya que éste da mejores prestaciones en linealidad, precisión y repetitividad de los datos en comparación con otro tipo de sensores como termocuplas o termistores; igualmente cuenta con un tiempo de respuesta de 0.5 segundos frente a cambios de temperatura y su rango de trabajo (-200 a 850) °C se ajusta al proceso a controlar.

El sensor RTD PT-100 que se utiliza en esta investigación consta de tres cables o tres hilos los cuales se conectan a un puente de Wheatstone alimentado por una fuente DC filtrada para obtener una medida diferencial de voltaje que corresponda a los cambios de resistencia en el sensor y por tanto a la temperatura. Se utiliza la configuración siemens o conexión a tres hilos, con el objetivo de eliminar la resistencia variable de los cables y de esa forma evitar errores en la medida de la señal, luego se amplifica y se filtra para posteriormente realizar su digitalización.

a. Caracterización del sensor de temperatura pt-100: Un Pt100 es un sensor de temperatura que consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohm y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Gráfica resistencia vs temperatura para sensor RTD-PT100, α =0.00385



Fuente: PT100, Su operación, instalación y tablas. Información. [en línea]. http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf

Como se observa en la figura 19 el incremento de la resistencia es lineal y creciente; característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde; cabe aclarar que el pt-100 es lineal de 0°C en adelante hasta aproximadamente los 850°C. Lo cual es adecuado para trabajar en el rango del proceso a controlar.

Los Pt-100 pueden fácilmente entregar precisiones de una décima de grado con la ventaja que la Pt100 no se descompone gradualmente en el tiempo entregando lecturas erróneas, al dañarse normalmente se abre, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falla del sensor y da aviso.

La Pt100 puede ser colocada a cierta distancia del medidor sin mayor problema (hasta unos 30 metros) utilizando cable de cobre convencional para hacer la extensión.

Para su normal funcionamiento y evitar el autocalentamiento del sensor, por éste debe atravesar una corriente no mayor a 2.4 mA. Para este cálculo se procede de la siguiente forma:

$$\Delta T = \frac{P_D}{\delta} = \frac{I^2 \cdot R}{\delta} \tag{13}$$

 δ = coeficiente de disipacion termica (mW/°K)

En donde
$$\delta = \frac{6mW}{{}^{\circ}k}$$

Para determinar que el error por autocalentamiento sea menor de 0.1°C, cuando está a 0°C, se opta por despejar la variable de corriente a la cual se la puede modificar cuando se hace el acondicionamiento de la señal del sensor.

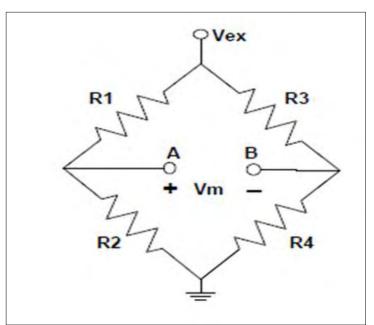
$$I = \sqrt{\frac{\Delta T * \delta}{R}} = \sqrt{\frac{0.1 * 6 * 10^{-3}}{100}} \tag{14}$$

I = 2.4mA

"Por lo tanto para obtener un error de por lo menos 0.1°C es necesario hacer pasar menos de 2.4mA por el sensor".²⁷

b. Puente de Wheatstone en configuración siemens: La pt-100 tiene diversas formas de conexión: a 2 hilos, a tres hilos y a 4 hilos; se elige la conexión a tres hilos ya que esta resuelve el error producido por el cambio de resistencia en los cables del sensor, debido a la medición de temperatura.

Figura 20. Puente de Wheatstone



Fuente: MORENO VELASCO, Ignacio. Sensores Resistivos y su Acondicionamiento, Área de Tecnología Electrónica. España: Universidad de Burgos, s.f.

De la figura 20, aplicamos divisor de tensión en los puntos A y B.

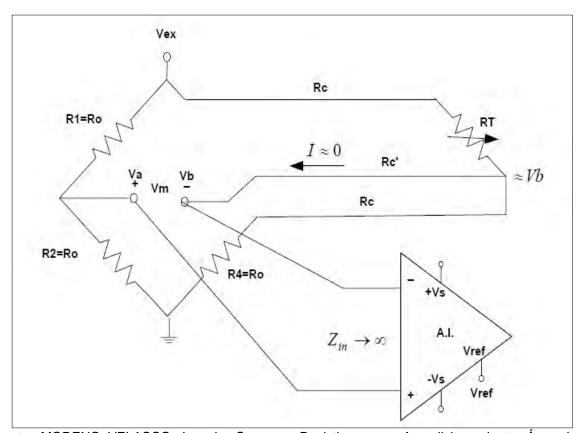
²⁷ MORENO VELASCO, Ignacio. Sensores Resistivos y su Acondicionamiento, Área de Tecnología Electrónica. España: Universidad de Burgos, s.f.

$$V_A = V_{ex} \left(\frac{R_2}{R_2 + R_1}\right)$$
 (1) y $V_B = V_{ex} \left(\frac{R_4}{R_4 + R_3}\right)$ (15)

$$V_m = V_{ex} \left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \tag{16}$$

Cuando VA = VB se dice que el puente se halla en equilibrio.

Figura 21. Configuración a 3 hilos del sensor PT-100 con puente de Wheatstone y medida del voltaje diferencial proporcional al cambio de resistencia en el sensor



Fuente: MORENO VELASCO, Ignacio. Sensores Resistivos y su Acondicionamiento, Área de Tecnología Electrónica. España: Universidad de Burgos, s.f.

Se detalla la expresión general para el puente:

$$Vm = \frac{Vex}{4} \frac{\Delta R3 - \Delta R4}{R_T} \tag{17}$$

Se tiene en cuenta que la impedancia de entrada del amplificador A.I. es de $10G\Omega$, para esta investigación se usa el A.O. AD620, entonces por el cable Rc' no circula corriente significativa y se establece:

$$R3 = R_T + Rc (18)$$

$$R4 = Ro + Rc \tag{19}$$

Como el cable sufre una variación de resistencia ΔRC debido al calor, se establece:

$$\Delta R_3 = \Delta R_T + R_c + \Delta R_c \tag{20}$$

$$\Delta R_4 = R_C + \Delta R_C \tag{21}$$

Se sustituye en la ecuación del puente:

$$V_m = \frac{Vex}{4} \frac{\Delta R_T + R_c + \Delta R_c - R_c - \Delta R_c}{R_T} \tag{22}$$

$$V_m = \frac{Vex}{4} \frac{\Delta R_T}{R_T} \tag{23}$$

Se consigue que la tensión medida no dependa del cable.

"Para conseguir una corriente menor de 2.4mA se calcula las resistencias del puente siguiendo este principio de equilibrio" 28.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \tag{24}$$

 R_3 es equivalente a la posición donde está el sensor, entonces se calibra el puente donde se utiliza como referencia 0°C en estado de equilibrio potencial en el cual el sensor mide 100Ω , para conservar la relación anterior.

$$R_1 = 100\Omega \quad y \qquad R_2 = R_4 \tag{25}$$

De tal manera que para determinar la corriente que pasa a través del puente se realiza la siguiente operación:

$$V_{ex} = 4.96 V$$
 (26)

$$R_{eqiz} = R_1 + R_2 \tag{27}$$

En estado de equilibrio:

²⁸ MORENO VELASCO, Op. Cit., p.10.

$$R_{eqiz} = R_{eqder} = R_3 + R_4 \tag{28}$$

Corriente por R_{eqiz}:

Se eligen resistencias de precisión de $3.09 \text{K}\Omega$ con una tolerancia del 1% para disminuir el error de la medida, y obtener una corriente a través del sensor menor de 2.4 mA y un potenciómetro de precisión calibrado a 100Ω . Por consiguiente se determina la corriente de paso a través del puente.

$$I_{eqiz} = \frac{V_{ex}}{R_{eqiz}} = \frac{4.96}{3190} \tag{29}$$

$$I_{eqiz} = 1.554 \, mA$$

Luego se determina el autocalentamiento por medio de la relación de la potencia disipada por el sensor con esta corriente a 0°C.

$$P_D = (I_{eaiz})^2 * 100 (30)$$

$$P_D = 240.25 \, \mu W$$

Para la temperatura máxima medida con el sistema (233°C) la potencia es:

$$Req = 188 + 3090 = 3278\Omega \tag{31}$$

$$I = \frac{4.96V}{32780} = 1.5mA \tag{32}$$

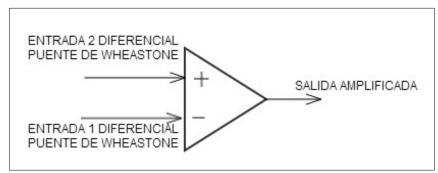
$$P_D = (1.5mA)^2 * 188 ag{33}$$

$$P_D = 423 \mu W$$

Debido a que el voltaje que se mide en el puente de Wheatstone se toma sin referencia a tierra, y sus cambios de voltaje son muy pequeños se selecciona el amplificador de instrumentación AD620 conectado en modo diferencial, además se amplifica la señal diferencial conectando la resistencia de ganancia que ofrece el AD620 y así obtener una escala de 0 a 5 Voltios que permite la digitalización de ésta a través de un microcontrolador pic.

c. Diferenciación y amplificación de la señal: En esta etapa se realiza la adecuación de la señal para que opere de (0 a 5) VDC, necesarios para que el ADC del microcontrolador funcione correctamente. En la figura 22 se muestra el diagrama del proceso.

Figura 22. Diagrama de diferenciación y amplificación de señal de sensor RTD-PT100



Se necesita de un amplificador operacional que sea capaz de realizar la resta de dos señales y luego amplificarla hasta el valor deseado; para este proceso se ajusta adecuadamente el amplificador de instrumentación AD620. Entonces se realiza los cálculos de amplificación de señal y se toma un valor máximo de temperatura de 233°C, que corresponde al valor máximo de temperatura en el proceso de tostión de café para esta máquina. Según la tabla de transformación del sensor dada por el fabricante corresponde a 187.91Ω por lo tanto.

$$R_{eqder} = R_{pt100} + R_4 = 187.91 + 3090 = 3277.91\Omega \tag{34}$$

Entonces:

$$I_{eqder} = \frac{V_{ex}}{R_{eqder}} = \frac{4.96}{3277.91} = 1.5 mA \tag{35}$$

Luego el voltaje en:

$$V_{R4} = I_{eader} * R_4 = 1.5 mA * 3090\Omega = 4.647 \text{Volts}$$
 (36)

$$V_{R2} = I_{eqiz} * R_2 = 1.554mA * 3090\Omega = 4.804 \text{Volts}$$
 (37)

Por lo tanto el voltaje diferencial Vm máximo será:

$$V_{mmax} = V_{R4} - V_{R2} = 4.804 - 4.647 = 157mV (38)$$

Luego la ganancia se determina por:

$$G = \frac{V_{ex}}{V_{mmax}} = \frac{4.96V}{157mV} = 31.6 \tag{39}$$

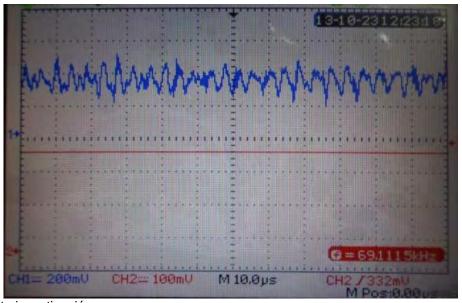
La relación para la ganancia del Amp. Operacional AD620 viene dada por:

$$R_G = \frac{49.4K\Omega}{G-1} = \frac{49.4K\Omega}{31.6-1} = 1614.37\Omega \tag{40}$$

En la implementación debido a pérdidas en la etapa de amplificación y filtrado se determina una resistencia de $1,33K\Omega$.

d. Filtrado de la señal a digitalizar: Se observa la señal de voltaje obtenida a la salida del amplificador AD620 por medio de un osciloscopio digital, disponible en los laboratorios de Ingeniería electrónica; ésta presenta un alto contenido de ruido. En la figura 23 se presenta en azul la señal a la salida del amplificador operacional y en rojo la señal después de la etapa de filtrado.

Figura 23. Señal de voltaje etapa acondicionamiento: arriba en azul señal a la salida del A.O. AD620 y abajo en rojo señal a la salida filtro séptimo orden



Fuente: Esta investigación.

Esta señal presenta ruido que al digitalizar produce un error de medida del orden de los 3 grados centígrados con lo cual se realiza un filtro para mejorar la señal DC que se desea obtener. Se desarrolla un filtro activo pasabajas de séptimo orden que obtiene una señal lista para su digitalización. El diseño del filtro se realiza con el software FILTERPRO. En la figura 24 se observa el diseño:

FilterPro Desktop - D:\jorge\TESISPROPIA\linealizar\filtropbb7o.fpd File Edit Help 2 2 6 2 0 BOM Comments Data Part: Ideal Opamp Order: Number Of Stages: 4 Gain: 1 V/V (0 dB) Allowable PassBand Ripple: 1 dB Passband Frequency: 2 Hz Corner Frequency Attenuation: -3 dB Component Tolerances - Resistors E24:5% ▼ Capacitors Exact: 0% 3,27uf 25,72uF R2 R2 R2 OpAmp OpAmp R1 OpAmp CI C1. / Actual Gain (dB) / Actual Group Delay (uSec) -120 Actual Phase (deg) (dB) Frequency (Hz) Frequency (Hz) v: 3.1.0.23446 Texas Instruments

Figura 24. Esquemático del filtro pasabajas de séptimo orden con topología sallen Key, respuesta Butterworth y frecuencia de corte de 2Hz

Características del filtro: Filtro pasabajas con células de sallen key de ganancia unitaria, y respuesta Butterworth con frecuencia de corte de 2Hz. Los valores de los componentes tienen una tolerancia del 5% para las resistencias y para los capacitores del 10%, además se utiliza el amplificador operacional TL084 con alimentación dual el cual presenta mejor desempeño que otros operacionales de gama baja como el LM324.

e. Diseño de una fuente dual DC regulada y filtrada: La fuente de alimentación es muy importante ya que con ésta se deriva la medida del sensor y el filtrado de ésta, por lo tanto es necesario que tenga una etapa de filtrado pasivo con una red RC después de su rectificación para eliminar los ruidos provenientes de la red

eléctrica. El valor de la resistencia y condensador se determina teniendo en cuenta una frecuencia de corte de 32Hz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi * 220\mu F * 22\Omega} = 32.88 \, Hz \tag{41}$$

Se determina una resistencia y un condensador de 22Ω y 220 uF respectivamente. Después del filtrado se utiliza los correspondientes reguladores de tensión: 7812, 7912, 7805 y 7905 que corresponden a 12V, -12V, 5V y -5V respectivamente; cada uno de estos está protegido contra inversiones de corriente con el diodo que se instala entre la salida y entrada del mismo. Y por último a la salida un banco de condensadores para mantener la señal estable y con ruido despreciable, ²⁹ cabe aclarar que se utiliza un condensador de tantalio a la salida para mejorar el filtrado. En la figura 25 se presenta el esquemático.

Figura 25. Esquemático de fuente dual diseñado en el software de pcbs Eagle, con cuatro niveles de voltaje fijos

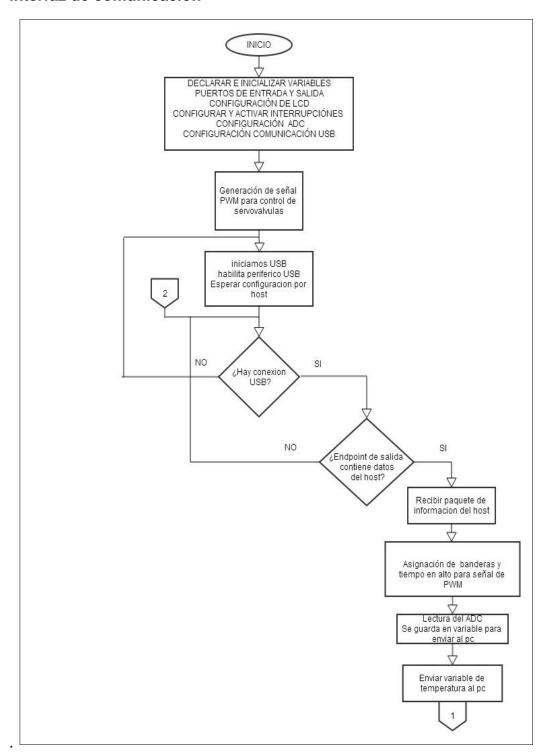
Fuente: Esta investigación.

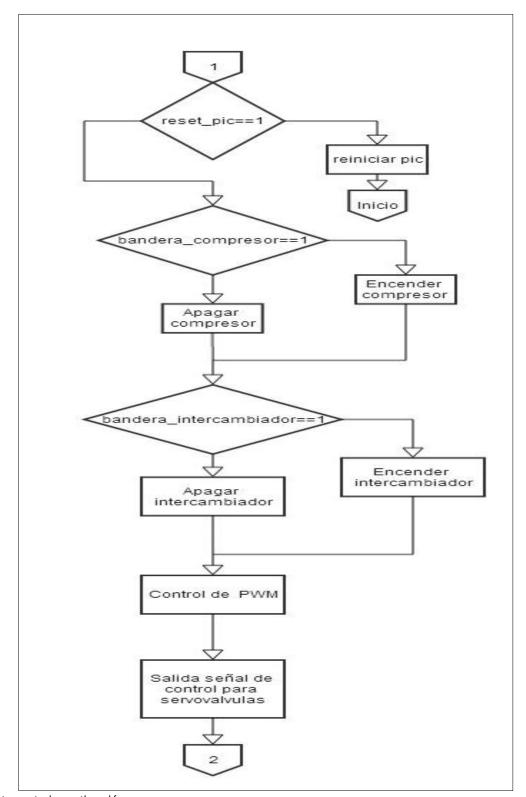
²⁹ SHARATRONICA. Como eliminar ruidos eléctricos en microcontroladores Pic. [en línea] Disponible en Internet: http://www.sharatronica.com/eliminar_ruidos_electricos.html [citado abril de 2014]

- **4.3.2** Fase 2: Módulo de control, Adquisición de señal e Interfaz de comunicación. Este módulo tiene como base un microcontrolador pic 18F4455 el cual tiene las siguientes características principales:
- Microcontrolador con modulo USB 2.0. Soporta Low speed 1.5 Mb/s y full speeds 12Mb/s.
- 1kB de memoria de doble acceso vía USB.
- 35 pines I/O disponibles.
- Velocidad de la CPU 12 MIPS.
- Oscilador externo de dos modos hasta 48 MHz.
- ADC de 10 bits y 13 canales.
- Voltaje de operación 4.2V a 5.5V.
- 4 Timer (desde Timer0 a Timer3). Uno de 8 bits y 3 de 16 bits.
- Función del pin MCLR opcional.
- Retención de datos mayor a 40 años.

En la figura 26 se muestra el diagrama de flujo del diseño planteado para el firmware, el cual se compila con la aplicación PIC-C.

Figura 26. Diagrama de flujo módulo de control, adquisición de señal e interfaz de comunicación





a. Interfaz de comunicación USB entre Matlab y el microcontrolador: Debido a que el algoritmo de control y la interfaz de usuario que permiten el control de la temperatura y el tiempo se realiza en Matlab, se establece una comunicación entre éstos para el intercambio de información.

El tipo de comunicación que se utiliza es USB en configuración de transferencia masiva de datos.

b. Digitalización señal de temperatura: Después de la etapa de acondicionamiento de la señal de temperatura se realiza la adquisición de la señal en el microcontrolador por medio del módulo de ADC, el cual se configura en una conversión de 10 bits, para medir la temperatura en el rango de 0 a 233 grados (°C), con esta configuración se obtiene una resolución de 0.2 °C por cada bit.

El muestreo de la señal a medir se realiza con un periodo aproximado de 50 microsegundos para posteriormente realimentar el algoritmo de control proporcional diferencial difuso en la aplicación de control.

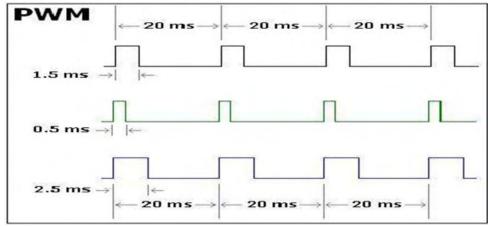
c. Control de las servoválvulas: Las servoválvulas realizan la función de regular el paso de aire frio y caliente que ingresa a la tolva de tostión para obtener la referencia de temperatura deseada en cada instante de tiempo, y de esa forma obtener los perfiles de tostión.

A continuación se describe el proceso para controlar los servomotores los cuales funcionan por medio de PWM (Modulación por Ancho de Pulso) y permiten accionar las llaves de paso.

Un Servomotor es un motor controlado por una electrónica que lee el PWM y que se encarga de mover al motor dependiendo de lo que ha leído, Para que el servomotor responda correctamente deben llegarle pulsos con una periodicidad, o frecuencia, constante, uno tras otro, separados 20 milisegundos cada uno del siguiente aproximadamente en casi la mayoría de servos del mercado. Es importante mencionar que la periodicidad del PWM puede oscilar en un rango entre 10 y 30mseg.

Para realizar estas señales de PWM se utiliza la interrupción del TIMERO del PIC, el cual funciona como reloj para obtener el periodo de 20ms, su configuración se realiza a través del conteo del timer, luego en el programa principal controla el tiempo en alto, y que varía de 0.5ms a 2.5 ms; para una rotación de 0 a 180 grados respectivamente del servomotor. El grado de apertura de las llaves dependerá de la salida del algoritmo de control difuso.

Figura 27. Control PWM para servomotores



Fuente: [en línea]. http://picmania.garcia-cuervo.net/picc2.php#SERVO1

La ecuación 44 relaciona la configuración del timer.

$$Periodo = 4 * \frac{1}{F.Oscilador} * (65536 - ValorTMR0) * Prescaler$$
 (42)

Dónde:

Periodo: tiempo que tarda la operación de interrupción.

F. Oscilador: frecuencia de oscilación con la que trabaja el microcontrolador.

ValorTMR0: valor modificable que puede variar entre 0 y 65536.

Prescaler: factor que permite dividir la frecuencia de conteo o aumentar el tiempo de conteo.

Los parámetros para configurar un periodo de 20ms:

F. Oscilador= 48MHz

ValorTMR0=0

Prescaler: 4

$$PERIODO = \frac{4}{48Mhz} * (65536) * 4$$

PERIODO = 20.971 mseg

De esta manera se obtiene un período aproximado a 20mseg, necesario para el funcionamiento de los servomotores.

La lógica que se utiliza para generar la señal PWM consiste en activar una bandera que configura el tiempo en alto de la señal. Esta lógica se usa para cada servomotor.

Se utiliza motores marca TOWERPRO, los valores de tiempo en alto para 0° y 180° son 0.61mseg y 2.39mseg respectivamente, se realiza una relación entre el rango de operación en milisegundos de los servos con el conteo del timer, para determinar los valores numéricos correspondientes a los tiempos anteriormente mencionados:

$$\frac{20.971mseg}{0.61mseg} = \frac{65536}{x1} \tag{43}$$

x1 = 1899

$$\frac{20.971mseg}{2.39mseg} = \frac{65536}{x2} \tag{44}$$

$$x2 = 7477$$

El rango de operación se establece de 1899 hasta 7477. Y para establecer el rango final se relaciona, el PWM correspondiente a los valores cuando la llave está totalmente abierta y totalmente cerrada:

PWM de 2457, en milisegundos 0.786, llave de paso está totalmente abierta.

PWM de 6919, en milisegundos 2.214, llave está totalmente cerrada.

En el diseño de la servoválvula la relación entre engranes fue de 1.6 entonces, para el movimiento del servomotor se desarrolla:

Rango total de operación:

$$x2 - x1 = rango operación$$
 (45)

$$7477 - 1899 = 5578$$

Luego se obtiene el valor en el que se mueve el servomotor al accionar la llave de paso.

$$180^{\circ}(rango\ total) - 144(rango\ al\ accionar\ la\ llave\ de\ paso) = 36^{\circ}$$
 (46)

Quedan 36 grados de libertad del servomotor para dividirlos y dejar un margen en cada extremo del rango de giro, esto con el fin de dar una protección al dispositivo y evitar daños ocasionales.

$$\frac{36^{\circ}}{2} = 18^{\circ}(grados\ angulares\ en\ cada\ extremo)$$

Posteriormente se obtiene el rango final de movimiento del servomotor.

$$\frac{180^{\circ}}{18^{\circ}} = \frac{5578}{x} \tag{47}$$

$$X = 557.8 \cong 558$$

Por lo tanto el rango de operación está entre:

1899 + 558 = 2457 (limite inferior, valvula totalmente abierta)

7477 - 558 = 6919 (limite superior, valvula totalmente cerrada)

- d. Control de encendido para el compresor e intercambiador de calor: Para encender el intercambiador de calor se utiliza un sistema de chispa eléctrica, el cual se activa a través de la orden enviada desde la interfaz de usuario, esta acción activa o desactiva la etapa de potencia del encendido del compresor.
- **e. Diseño de hardware para el modulo:** A continuación se detalla el diseño realizado utilizando como base el microcontrolador pic18f4455.

En el diseño de la placa pcb se tiene en cuenta dejar los pines que no se usan con conexión, pinheads; también se diseña un circuito para resetear el pic por medio de la Interfaz gráfica de usuario. Las salidas de control para los servos ubicadas en los pines 21y 22 del pic, siendo el pin 21 el control de aire caliente y el pin 22 el control de aire frio. En el puerto B se configura una pantalla LCD y los pines 19 y 20 para el control de encendido del compresor e intercambiador de calor.

El diseño del reset por medio de la interfaz gráfica, se activa por medio del pin 3, el circuito debe tener sujeción pullup en el MCLR, lo cual se logra conectando un transistor 2n2222 trabajando en saturación de la siguiente forma: en la base se conecta una resistencia de 220Ω , en el colector una resistencia de pullup de $10K\Omega$. Además se tiene la posibilidad de reiniciar el pic desde un switch mecánico.

ACTIVACION RESET POR SOFTWARE Y MANUAL

T1
2N2222

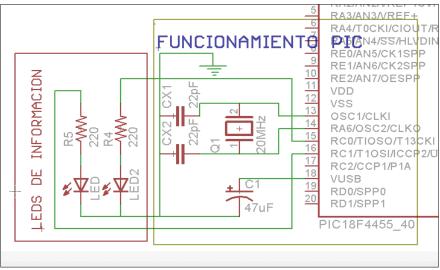
R1

WCLR/VPP/RE3
RA0/AN0
RA1/AN1
RA2/AN2/VREF-/CVREF
RA3/AN3/VREF+
RA4/T0CKI/CIOUT/RCV
RA5/AN4/SS/HLVDIN/C2
RE0/AN5/CK1SPP
RE1/AN6/CK2SPP
RE1/AN6/CK2SPP
VDD
VSS

Figura 28. Diseño de reinicio para el módulo de control

Para el funcionamiento del pic se utiliza un oscilador de 20Mhz y condensadores de 22pf. También un condensador electrolítico de 47uf para la comunicación USB dos diodos led que indican presencia de energía y conexión USB.

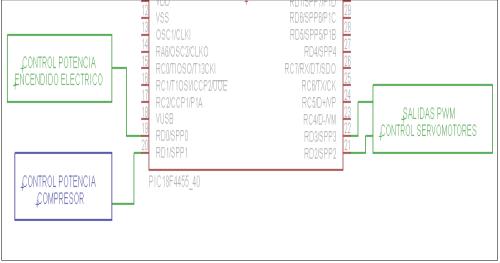
Figura 29. Parámetros de diseño para el funcionamiento del microcontrolador pic 18F4455



Fuente: Esta investigación.

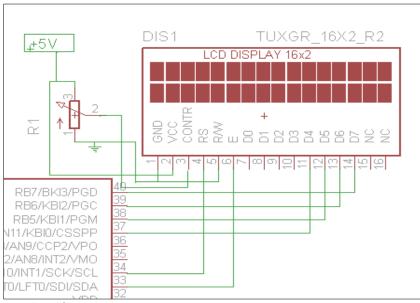
Se declara como salidas de control los pines D0, D1, D2, D3; los cuales controlan el encendido eléctrico del intercambiador, el encendido del compresor, control PWM servo1, control PWM servo2 respectivamente.

Figura 30. Salidas de control para los actuadores



Se integra una pantalla LCD para visualizar información. Ésta utiliza un potenciómetro que permite variar el contraste. La pantalla se conectó con un bus de 4bits configurando los pines como se indica en la figura 31.

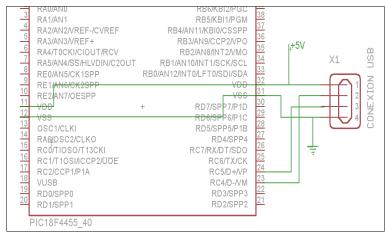
Figura 31. Conexión LCD display y microcontrolador pic



Fuente: Esta investigación.

El diseño del módulo permite alimentar desde el computador y por medio del cable USB la tarjeta que contiene al microcontrolador. En la figura 32 se muestra el diseño planteado.

Figura 32. Conexión USB con microcontrolador pic



Se configura una entrada del microcontrolador como Análoga para digitalizar la señal.

Figura 33. Conversor análogo digital utilizando el pin A0 del microcontrolador pic 18f4455.



Fuente: Esta investigación.

Por último se diseña el esquemático, teniendo en cuenta que los componentes se ubican dentro de una caja metálica de dimensiones 25X20X8 cm.

RESET *

WICC SENSOR

RECTAMPIPES | RETAINS |
READING RESET *

READING RES

Figura 34. Esquemático módulo de control

4.3.3 Fase 3: Servoválvulas. Debido a que la construcción del intercambiador de calor se realiza con tubos de ½" pulgada para el paso del aire, se diseña válvulas proporcionales con servomotores, los cuales van acoplados a válvulas de paso manuales existentes en el mercado como lo son las de bola y de compuerta, ya que las servoválvulas comerciales cuestan alrededor de \$1'800.000 pesos.

a. Diseño de Servoválvulas. "Una válvula de bola, conocida también como de "esfera", es un mecanismo de llave de paso que sirve para regular el flujo de un fluido canalizado y se caracteriza porque el mecanismo regulador situado en el interior tiene forma de esfera perforada;"³⁰ con la característica de que estas giran un cuarto de vuelta entre totalmente abierta y cerrada. La llave de compuerta es una válvula que abre mediante el levantamiento de una compuerta o cuchilla (la cuál puede ser redonda o rectangular) permitiendo así el paso del fluido".³¹ Y la característica principal de esta llave es que para abrir y cerrar esta compuerta la

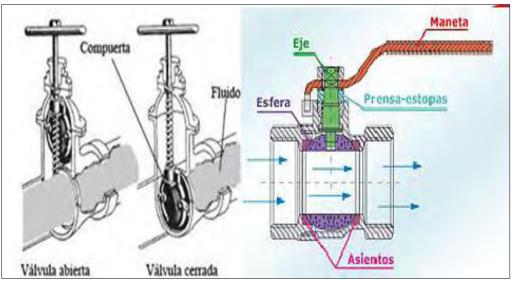
_

WIKIPEDIA. Válvula de bola. [en línea] Disponible Internet: en http://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula de bola [citado abril de 2014] WIKIPEDIA. Válvula de compuerta. ſen líneal Disponible Internet:

http://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_de_compuerta [citado abril de 2014]

hace por medio de un movimiento giratorio de una llave que da 4 vueltas completas entre totalmente cerrado y abierto.

Figura 35. Válvulas de paso de fluido: A la izquierda válvula tipo compuerta, a la derecha válvula tipo bola



Fuente: [en línea]. http://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_de_bola

Se analiza estos dos tipos de válvulas para el control del flujo de aire, y se opta por una llave de bola, con 90° de giro entre totalmente abierta y totalmente cerrada, a la cual se acoplo mediante una relación de engranes un servomotor con las siguientes especificaciones:

Tabla 3. Características servomotor Towerpro mg996r.

	A 4.8 V	A 6.0 V
TORQUE	130,5 oz-in (9,40 kg-cm)	152,8 oz-in (11.00 kg-cm)
VELOCIDAD	0.17 sec/60°	0.14 sec/60 °
ENGRANES	metálicos	metálicos
ROTACION/SOPORTE	Doble/Rodamiento	Doble/Rodamiento

Fuente: [en línea]. http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/mg996r

Figura 36. Servomotor



Fuente: [en línea]. http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/mg996r

Para el acoplamiento entre la válvula y el servomotor se utiliza un engrane de 96 dientes y 60 dientes respectivamente. La relación de juego de engranes es de 96/60= 1.6

$$mov. max. angular llave de paso = 90^{\circ}$$
 (48)

$$mov. max. angular servomotor = mov. max. angular llave * 1.6$$
 (49)

$$movimiento\ maximo\ servomotor = 144^{\circ}$$
 (50)

$$\frac{90^{\circ}}{X} = \frac{144^{\circ}}{1^{\circ}} \tag{51}$$

 $X = 0.625^{\circ}$

De tal manera que cuando el servomotor gira 1° la válvula gira 0.625° que corresponden al 0.69% de apertura de la válvula.

Para controlar la apertura y cierre de la válvula se desarrolla un firmware en el programa PIC-C, que se implementa en el microcontrolador pic 18f4455, éste

realiza una modulación de ancho de pulso determinada por el dato que un usuario le asigne a través de una interfaz de computadora.

b. Diseño de una fuente regulada de 5v para alimentación de los servomotores: Los servomotores operan en un rango de (4.8 a 6) VDC, de tal modo que se los alimenta con una fuente de 5V regulada, que le da capacidad al servomotor de entregar un torque 10kg-cm, suficiente para mover las llaves de paso. La fuente debe ser capaz de entregar hasta 1 Amperio de corriente.

Figura 37. Diseño fuente regulada 5V

Fuente: Esta investigación.

Es necesario un rectificador de 1A, un condensador de 3300uF para el filtrado de la señal rectificada, un condensador de 0.33uF a la entrada del regulador de voltaje 7805 y otro de 0.1uF a la salida del mismo. Los condensadores que acompañan al regulador están dados en la hoja de datos técnica de éste.

4.3.4 Fase 4: Circuitos de potencia para el control de encendido del compresor de aire e intercambiador de calor.

a. Control de encendido para compresor de aire: En esta etapa se necesita tener en cuenta que el compresor de aire funciona con voltaje alterno para este caso es un compresor de marca RANGER de 2Hp que funciona a 120VAC y 1500W de potencia en pleno trabajo. Se diseña un circuito capaz de soportar esta potencia con un relé que se activa con 12VDC en la bobina. Y soporta 20 A para 120VAC, por lo tanto la salida del microcontrolador activa un transistor y éste al relé, se utiliza un transistor 2n2222A, una resistencia a la base de 220 Ω . En paralelo a la bobina del relé se conecta un diodo de marcha libre con el fin de drenar las corrientes inversas. En la figura 38 se indica el diseño.

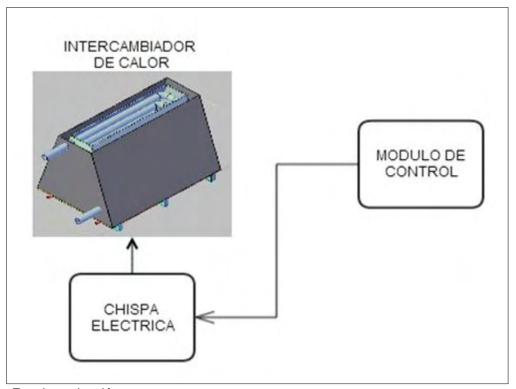
T2 K1 120VAC P1 220

Figura 38. Diseño modulo control encendido compresor de aire

Fuente: Esta investigación.

b. Control de encendido para intercambiador de calor: Se diseña un sistema de encendido para el intercambiador de calor, generando una chispa la cual se realiza con un dispositivo disponible en el mercado; la activación y desactivación de esta chispa se logra a través de un circuito capaz de controlarlo desde la interfaz de usuario.

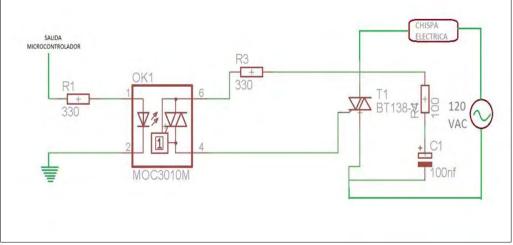
Figura 39. Diagrama de control encendido eléctrico de intercambiador de calor



Para el diseño de sistema de encendido se debe contar con un encendido eléctrico, este dispositivo se conecta a 120VAC. El circuito de control se realiza por medio de un optoacoplador y un Triac. Se utiliza un Moc3010 y un Triac Bta08-600b en modo switch, en la salida del microcontrolador se conecta una resistencia de 330 Ω que permite su correcto funcionamiento. Se añade una red Snubber para proteger de los altos voltajes que la carga inductiva genera, esta red consta de una resistencia de 100 Ω y un condensador de 100nF. ³² En la figura 40 se indica el diseño:

FOROS DE ELECTRONICA. Redes Snubber. [en línea] Disponible en Internet: http://www.forosdeelectronica.com/f23/redes-snubber-6613/ [citado mayo de 2014]

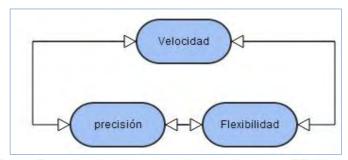
Figura 40. Diseño control activación de chispa eléctrica intercambiador de calor



4.3.5 Fase 5: Diseño e implementación del método de control por medio de lógica difusa. Después de realizar una revisión bibliográfica en fuentes secundarias como trabajos de grado entre otros, los cuales demuestran la viabilidad de un control difuso sobre controladores clásicos (PID) en el caso de sistemas complejos en los cuales el modelo matemático no representa acertadamente el comportamiento del sistema real. Por este motivo se optó por el diseño de un sistema de control basado en lógica difusa el cual se adapta a sistemas complejos y sistemas no lineales, además permite realizar el control bajo parámetros variables en el entorno, ya que facilita el control de esos sistemas por medio variables lingüísticas simples e intuitivas acelerando el desarrollo y la implementación de dichos sistemas. El diseño de un controlador basado en lógica difusa supone establecer un compromiso entre diversos criterios de diseño mostrados en la figura 41.

Para conseguir los resultados deseados debe plantearse la velocidad de respuesta del sistema de control, la cual vendrá limitada por otros factores, como el grado de precisión requerido o la flexibilidad del diseño. Si deseamos una alta precisión en el control necesitaremos una gran cantidad de conjuntos para cada variable y un alto número de reglas, lo que exigirá una elevada cantidad de cálculos, causando un aumento del tiempo de respuesta. Si además deseamos que el sistema de control tenga flexibilidad de adaptación a los cambios del sistema y aprender de los errores cometidos, serán necesarios muchos más cálculos adicionales.

Figura 41. Compromiso de diseño



Fuente: TIMOTHY J, Ross. Fuzzy Logic with engineering applications. EEUU: John Wiley & Sons Ltda, 2004.

Para el diseño del control difuso se tiene en cuenta los siguientes pasos:

- a. "Identificar las variables de entrada y salida del sistema.
- b. Un modelo lingüístico que puede ser creado con base en el conocimiento de un humano experto.
- c. Definir el universo de discurso de acuerdo a la variable lingüística y dividir el universo de discurso, asignando etiquetas a los valores difusos (conjuntos difusos).
- d. Asignar funciones de pertenencia para cada conjunto difuso.
- e. Asignar una relación entre las entradas y las salidas, formando una base de reglas.
- f. Determinar un método de defusificación"33.

De acuerdo a lo anterior se procede:

a. Variables de entrada y salida del sistema: Se analizan dos variables, la primera es el error de la temperatura que se refiere a la temperatura de referencia menos la temperatura actual del sistema expresada en la ecuación 52.

$$error = temperatura de referencia - temperatura actual$$
 (52)

El error de temperatura indica que tan lejos o cerca se encuentran la temperatura actual de la referencia.

La segunda variable es la diferencia del error expresada como muestra la ecuación 53.

$$\Delta error = error \ actual - error \ pasado$$
 (53)

-

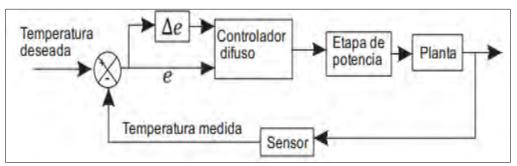
³³ TIMOTHY, Op. cit., p.55.

La diferencia del error indica la velocidad del cambio de temperatura en la tolva de tostión.

Como variables de salida se toma la apertura de las servoválvulas, las cuales varían de una posición totalmente cerrada en 0 grados a una posición totalmente abierta en 90 grados y permiten la inyección de aire caliente y frio a la tolva de tostión para obtener la referencia de temperatura deseada.

El controlador se indica en la figura 42. Clasificado como control difuso directo sin optimización de tipo proporcional derivativo.

Figura 42. Control difuso directo sin optimización de tipo proporcional derivativo



Fuente:[en línea] http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/11597.pdf

Para las siguientes etapas se utiliza el (TOOLBOX) de MATLAB en el que se definen las entradas, salidas, funciones de pertenecía, base de reglas, dispositivo de inferencia y método de defusificación. Toda esta información es guardada en un archivo para posteriormente cargarlo en la aplicación de control.

b. Fusificación y diseño de las funciones de membresía: Ya obtenidas las variables de entrada y salida del sistema se necesita fusificarlas caracterizando las funciones de membresía de la siguiente manera:

Se define el universo de discurso de cada variable y luego cada una se subdivide en rangos más pequeños caracterizados por funciones de membresía, así las variables de entrada y salida se denominan variables lingüísticas.

Para la variable error de temperatura se define el universo de discurso comprendido entre -180 a 180 grados, debido a que en condiciones iniciales la temperatura de la tolva de tostión se encuentra a temperatura ambiente, la cual varía alrededor de 20 grados. Las curvas de tostión comienzan en un valor aproximado de 200 grados lo cual genera el tope máximo de error de 180 grados aproximadamente, luego se definen las funciones de membresía cuando el error

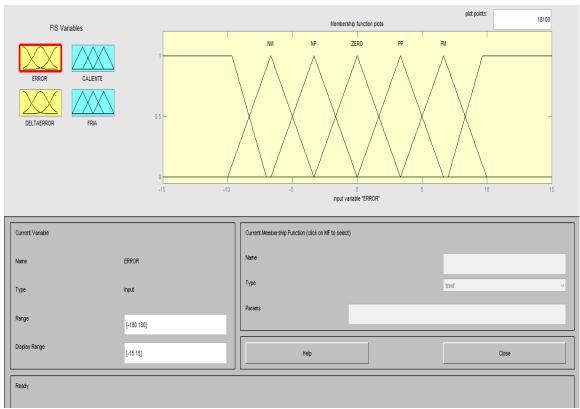
tiende a cero, en donde el control es más crítico, este proceso se indica en la tabla 4.

Tabla 4. Conjuntos difusos del error

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango (°C)		
NG	Error negativo grande	-180 a -7		
NM	Error negativo mediano	-10 a -3.333		
NP	Error negativo pequeño	-6.667 a 0		
С	Error cero	-3.334 a 3.334		
PP	Error positivo pequeño	0 a 6.667		
PM	Error positivo mediano	3.333 a 10		
PG	Error positivo grande	7 a 180		

Fuente: esta investigación.

Figura 43. Funciones de pertenencia del error



Fuente: Esta investigación.

Para la variable de entrada cambio de error " $\Delta error$ " se define como universo de discurso el rango comprendido entre -1 a 1, el cual se obtiene de la respuesta del

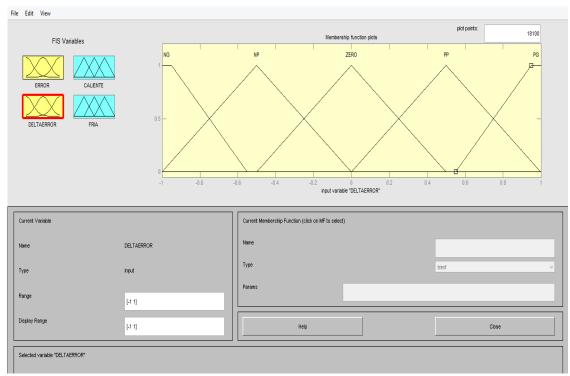
sistema al cambio de error de temperatura, luego se definen los conjuntos difusos comprendidos en 5 rangos como se indica en la tabla 5.

Tabla 5. Conjuntos difusos del cambio de error

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango	
NG	Cambio de error negativo grande	-1 a -0.55	
NP	Cambio de error negativo pequeño	-1 a 0	
С	Cambio de error cero	-0.5 a 0.5	
PP	PP Cambio de error positivo pequeño	0 a 1	
PG	Cambio de error positivo grande	0.55 a 1	

Fuente: Esta investigación.

Figura 44. Funciones de pertenencia del cambio de error



Fuente: Esta investigación.

Para las variables de salida denominadas "apertura de la llave" el universo de discurso está definido por el rango en que las llaves están en la posición de totalmente cerrada a totalmente abierta, que es de 0 a 90 grados; luego se divide

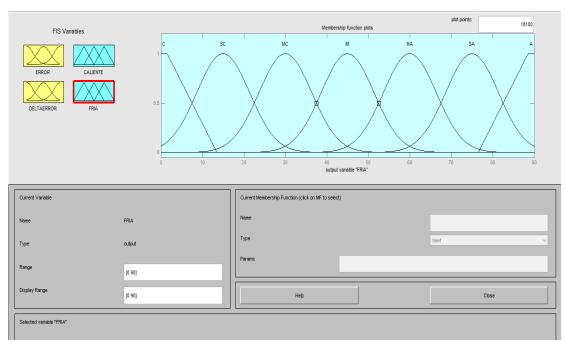
cada una en tramos más pequeños para formar las funciones de membresía que cubran todo el universo de discurso como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Conjuntos difusos de la variable de salida "apertura de la llave"

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango (grados "°")		
С	Cerrada	0 a15		
SC	Semi cerrada	1.5 a 28.5		
MC	Medio cerrada	16.5 a 43.5		
IM	Intermedia	31.5 a 58.5		
MA	Medio abierta	46.5 a 73.5		
SA	Semi abierta	61.5 a 88.5		
A	Abierta	76.5 hasta 90		

Fuente: Esta investigación.

Figura 45. Funciones de pertenencia para la apertura de la llave de aire caliente



Fuente: Esta investigación.

El mismo proceso es realizado para definir el universo de discurso y las funciones de membresía que actúan sobre las variables de salida definidas como "apertura de la llave de aire frio" y "apertura de la llave de aire caliente".

c. Creación de la base de reglas: La construcción de la base de reglas surge de la observación y análisis del sistema, a partir de ahí se realiza una inferencia difusa, asociando a cada una de las posibles combinaciones de las entradas los valores de salida. De esta forma se obtienen 35 reglas que relacionan las variables de entrada con un valor deseado en las variables de salida. En la tabla 7 se observa la relación de las variables de entrada y salida que conforman la base de reglas del control difuso proporcional derivativo.

Tabla 7. Base de reglas para el control difuso tipo proporcional derivativo

	ERROR														
		NG		NM		NP		0		PP		PM		PG	
모		AF	AC												
DELTA	NG	Α	С	SA	SC	MA	МС	MA	МС	МС	MA	SC	SA	С	Α
Þ.	NP	Α	С	SA	SC	MA	МС	IM	IM	SC	MA	O	SA	С	Α
ERROR	CERO	Α	С	SA	МС	IM	IM	МС	IM	SC	MA	С	SA	С	Α
X	PP	Α	С	SA	МС	MC	MC	IM	MA	C	MA	С	Α	С	Α
	PG	Α	С	SA	МС	МС	IM	МС	MA	С	MA	С	Α	С	Α

AF: Apertura para llave de aire frio.

AC: Apertura para llave de aire caliente.

Fuente: Esta investigación.

La base de reglas sigue el formato tipo Mamdani, donde en este caso el controlador se conforma de la siguiente manera, por ejemplo:

If error es NG y cambio de error es NG then apertura aire caliente es C y apertura aire frio es A.

El tipo de inferencia utilizado fue el de Max-Min el cual interpreta las reglas de tipo if then con el formato de reglas tipo mandani como sigue:

Sea A_1^k , A_2^k y A_3^k conjuntos difusos sobre un universo de discurso U y $x = (x_1 \dots x_n)^T \in U_1 X \dots X U_n$ que son las entradas, mientras que y es la salida del sistema difuso definido para K reglas como se indica en la ecuación 54.

$$\mu_{B^K}(Y) = max^k [\min [\mu_{A_1}^k(x_1), \min [\mu_{A_2}^k(x_2)]] \text{ k=1, 2,3....r}$$
 (54)

"La ecuación 54 toma el valor mínimo de pertenecía de dos conjuntos difusos en el conjunto consecuente de la regla asociada, después realiza una unión de los demás conjuntos consecuentes de acuerdo a cada regla"³⁴.

Regla 1 μ A_1^2 μ A_2^2 A_2^2 μ A_2^2 A_2^2

Figura 46. Método Max-min

Fuente: Timothy J., Ross. Fuzzy Logic with engineering applications, John Wiley & Sons Ltd 2004.

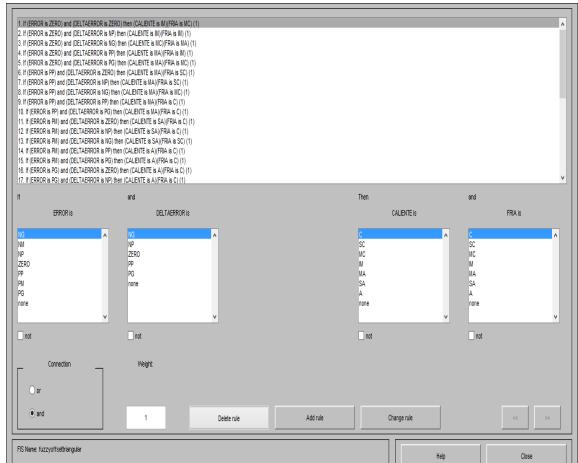
d. Método de defusificación: El objetivo de defusificar consiste en obtener un valor no difuso, en este caso son grados de apertura de cada servoválvula.

Para este controlador se utiliza el método del centroide, debido a que es el más usado en aplicaciones de control, obteniendo buenos resultados, en donde la salida final es el centro de gravedad del área total resultante del dispositivo de inferencia Max-min, el método del centroide no requiere gran capacidad computacional y la salida abarca mayores funciones de pertenencia, con respecto a otros métodos de defusificación.

La base de reglas, el dispositivo de inferencia y el método de defusificación se implementan en el (TOOLBOX) de lógica difusa de MATLAB como se muestra en la figura 47 en el cual además se simula el comportamiento del control difuso.

³⁴ Ibid.

Figura 47. Base de reglas control difuso



e. Características del control difuso:

• Superficie de control: La superficie de control es una gráfica tridimensional donde el dominio son las entradas, en este caso el error y el cambio de error de la temperatura y el rango corresponde al nivel de apertura de las llaves para aire caliente y aire frio, la superficie de control permite visualizar la relación, forma y comportamiento que sigue cada variable de salida.

En la figura 48 se observa la superficie de control para la apertura de la llave de aire caliente, en ésta se observa que la zona amarilla presenta un error muy grande y positivo lo que produce una salida de 90 grados, que se traduce en la apertura total de la llave, pero al aproximarse a un error de cero esta disminuye y varía en el rango de 30 a 60 grados dependiendo del cambio de error, es decir cuando hay un cambio de error grande y negativo la apertura será de 30 grados y si el cambio de error es grande y positivo la apertura será de 60 grados

aproximadamente. Cuando el error y el cambio de error se encuentran cerca de cero el nivel de apertura será de 45 grados aproximadamente, cuando el error crece negativamente el nivel de apertura de la llave se aproxima a cero independiente del cambio del error.

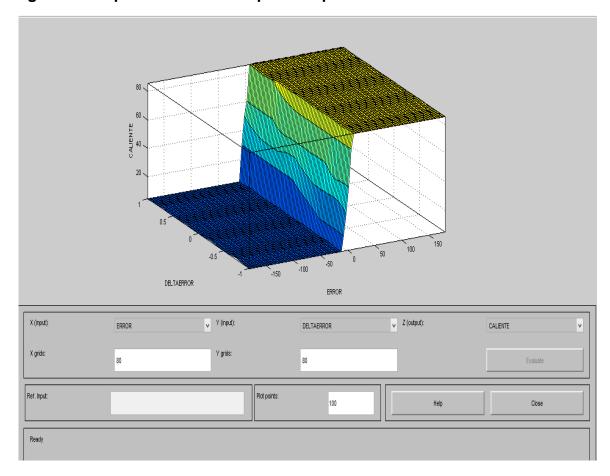


Figura 48. Superficie de control para la apertura de la llave de aire caliente

Fuente: Esta investigación.

De igual manera en la figura 49, se observa la superficie de control para el nivel de apertura de aire frio y a diferencia de la de aire caliente la superficie amarilla indica que cuando el error es negativo y grande, la apertura de la llave será aproximadamente de 90 grados, la superficie azul indica que cuando el error crece y se hace grande positivo la apertura de la llave tenderá al nivel cero, otra región se presenta cuando el error se aproxima a cero, en ese caso el nivel de apertura oscila entre 30 y 60 grados dependiendo del cambio de error; es decir si el cambio de error es grande y positivo el nivel de apertura será aproximadamente de 30 grados y en el caso contrario cuando el cambio de error es grande y negativo la apertura de la llave será de 60 grados aproximadamente.

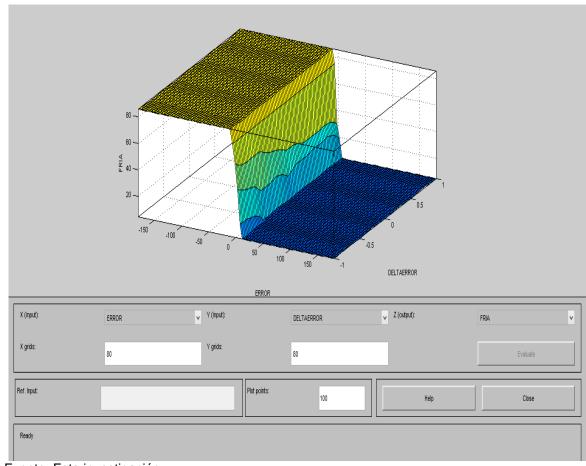


Figura 49. Superficie de control para la apertura de la llave de aire frio

• Aplicación de control: La aplicación se diseña e implementa utilizando el software Matlab, esta permite calcular las variables de entrada del bloque de control difuso que corresponden al error y cambio de error de la temperatura a partir de la señal proveniente del sensor RTD PT-100 y de la referencia suministrada por medio de una Interfaz gráfica de usuario, esta referencia corresponde a los perfiles de tostión. Para la realización de estas curvas de tostión se realiza una interpolación de datos con base en un vector de referencia de temperatura, luego el control difuso da como salida estados de apertura para cada servoválvula de tal forma que se puede obtener la temperatura de referencia en cada momento.

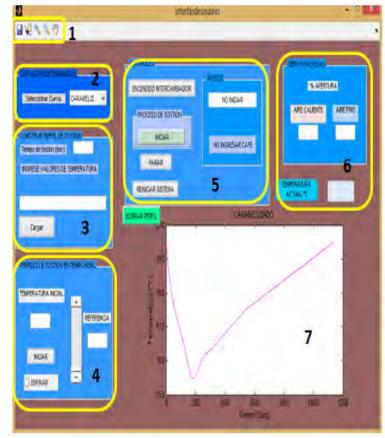
Si el usuario desea realizar los perfiles de tostión en tiempo real, la aplicación incorpora una sección para este propósito, la cual permite cambiar la referencia de temperatura continuamente dependiendo de los requerimientos deseados por el usuario.

A continuación se relacionan las funciones que incorpora la interfaz gráfica de usuario:

- ✓ Perfiles de tostión del café: Para este fin tiene dos opciones, las cuales pueden ser por curvas predefinidas o realizando un perfil en tiempo real.
- √ Visualización en tiempo real del proceso: Grafica la curva o perfil de tostión de referencia y la trayectoria de temperatura seguida por el control.
- ✓ Permite el control de encendido del compresor de aire y del intercambiador de calor: Estas acciones se realizan dentro del proceso para la realización de un perfil de tostión.
- ✓ Borrar perfil: Permite limpiar la ventana de gráficas para la realización de un nuevo perfil de tostión.
- ✓ Reinicio del sistema: Por medio del botón de reinicio se inicializa el sistema a sus valores iniciales.
- ✓ Parada: Permite detener el proceso.
- ✓ Guardar perfil: Guarda el perfil obtenido.
- ✓ Para el análisis de los perfiles se incorporó las herramientas de zoom, cursor y desplazamiento.
- ✓ Avisos: Gestiona avisos de advertencia, barras de progreso, visualización de la temperatura actual y porcentaje de apertura de servoválvulas.

En el manual de usuario que se encuentra en el Anexo G se hace una descripción detallada de la aplicación y las instrucciones para su correcto funcionamiento.

Figura 50. Interfaz de usuario



- 1. BARRA DE HERRAMIENTAS
- CURVAS PARA TOSTION DE CAFÉ PREDETERMINADAS
- 3. CONSTRUCCION DE PERFILES PARA TOSTION
- 4. CONSTRUCCION DE PERFILES EN TIEMPO REAL
- 5. PANEL DE CONTROLES
- 6. VISUALIZACION DE VARIABLES
- 7, VISUALIZACION PERFILES DE TOSTION

4.4 ETAPA IV: IMPLEMENTACION Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Etapa en la cual se construyen los circuitos diseñados previamente para el módulo de control, por medio de la plataforma de desarrollo de circuitos impresos Eagle 5.10, de igual manera se realiza el montaje de los componentes externos del sistema acoplados al anterior modulo por medio de un computador y se calibra el sistema de control final.

En la carpeta Anexo C del CD-ROM, se encuentran los documentos en PDF de los módulos diseñados listos para ser impresos.

Para la elaboración de los circuitos impresos se utiliza papel termotransferible para la impresión de cada uno de los circuitos diseñados en Eagle, luego se realiza el método de la plancha para transferir el diseño desde el papel a la placa de pertinax, entonces se procede a quemar los circuitos utilizando acido férrico y

agua, para la posterior fijación de sus componentes electrónicos, y por ultimo un baño de barniz para proteger el cobre de la corrosión.

En la figura 51 se ilustra el proceso de elaboración de los circuitos impresos.

Figura 51. Proceso de elaboración de circuitos impresos con método de la plancha



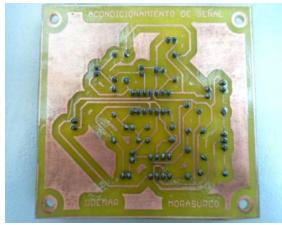
Fuente: Esta investigación.

4.4.1 implementación del módulo de Control. Se procede desde la elaboración de los siguientes circuitos impresos correspondientes a los diseños realizados anteriormente, hacia el acoplamiento de los mismos en un solo dispositivo de control.

a. Circuito electrónico para la configuración de medida y acondicionamiento de la señal del sensor: En el pcb de la figura 52 se implementa el circuito para el

puente de Wheatstone, al igual que el de diferenciación y amplificación de señal utilizando el amplificador de instrumentación AD620, por último el circuito de filtrado de la señal utilizando el integrado tl084 que consta de 4 amplificadores en un solo encapsulado.

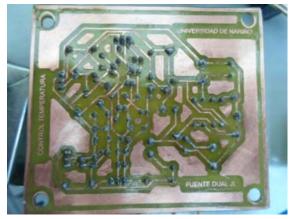
Figura 52. Pcb circuito adquisición y acondicionamiento señal RTD-PT100



Fuente: Esta investigación.

b. Fuente dual regulada y filtrada: En el pcb de la figura 53 se implementa la fuente DC que alimenta al circuito de adquisición y acondicionador de señal del sensor de temperatura, además alimenta la bobina de 12V del relé que activa el encendido del compresor.

Figura 53. Circuito impreso fuente dual regulada y filtrada

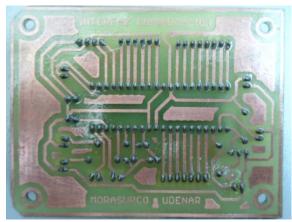


Fuente: Esta investigación.

b. Módulo de control, Adquisición de señal e Interfaz de comunicación: En la PCB de la figura 54 se implementa el microcontrolador pic18f4455, con el circuito

de reset físico y sus correspondientes conectores que le permiten la interacción con los demás circuitos y componentes del módulo de control.

Figura 54. Pcb modulo control, adquisición de señal e interfaz de comunicación



Fuente: Esta investigación.

d. Módulo de control de potencia para el encendido del intercambiador de calor: En la pcb de la figura 55 se implementa el circuito de potencia para el encendido de la chispa del intercambiador de calor que consta principalmente de un MOC3010, un TRIAC BTA08-600B y dos conectores que permiten la conexión con el módulo de chispa ubicado en la parte inferior del intercambiador.

Figura 55. Pcb circuito control de potencia para intercambiador de calor



Fuente: Esta investigación.

e. Módulo de control de potencia para el encendido del compresor de aire: En la pcb de la figura 56 se implementa el circuito que permite el control de encendido para el compresor de aire. Consta principalmente de un relé de potencia para 20 A, un transistor 2N2222 que activa la bobina del relé con 12VDC y dos conectores que sirven de conexión con el compresor de aire.

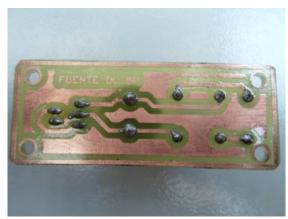
Figura 56. Pcb circuito control de potencia para compresor de aire



Fuente: Esta investigación.

f. Implementación fuente DC 5v para servomotores: En la pcb de la figura 57 se implementa una fuente DC de 5V regulada con el integrado LM7805 que es capaz de entregar hasta 1.5 Amperios de corriente.

Figura 57. Pcb fuente DC 5V



Fuente: Esta investigación.

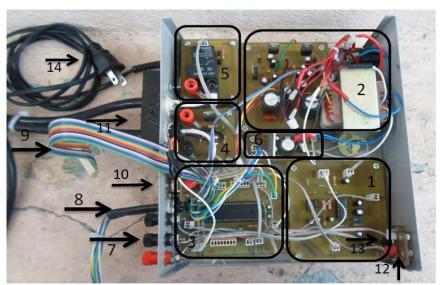
g. Implementación de circuito impreso para conexiones externas del módulo control: Fue necesario implementar diferentes conectores acoplados al módulo de control que permiten el correcto funcionamiento del sistema terminado. En la figura 59 se muestra un conector USB.

Figura 58. Pcb conector USB para el módulo de control



Una vez construidos cada uno de los circuitos se ensamblan en una caja metálica correspondiente al módulo de control, con dimensiones de 25 cm de largo, 20 cm de ancho y 8 cm de alto. En la figura 59 se presenta la implementación de dicho módulo.

Figura 59. Módulo de control implementado



Fuente: Esta investigación.

Descripción del módulo de control:

- 1. Acondicionamiento señal RTD-pt100.
- 2. Fuente de alimentación dual filtrada.
- 3. Módulo de control, adquisición de señal e interfaz de comunicación.
- 4. Módulo de control de potencia para el encendido del intercambiador de calor.
- 5. Módulo de control de potencia para el encendido del compresor de aire.
- 6. Fuente de alimentación 5VDC para alimentación de servomotores.

- 7. Terminales para conexión de sensor RTD-pt100.
- 8. Salida para conexión de servoválvulas.
- 9. Bus de conexión para LCD.
- 10. Salida conexión USB.
- 11. Salidas conexión intercambiador de calor y compresor.
- 12. Leds indicadores de información.
- 13. Botón de reset.
- 14. Cable alimentación 120 VAC.

4.4.2 Implementación de los componentes externos del sistema (Máquina de tostión).

- Implementación de Servoválvulas. Para su construcción se utiliza los siguientes materiales.
 - ✓ 2 servomotores marca TOWARD PRO de referencia MG945R.
 - ✓ 2 llaves de paso de tipo bola de ½" pulgada.
 - √ 4 Piñones: 2 de 96 dientes y 46mm de diámetro, 2 piñones de 60 dientes y 30mm de diámetro.
 - ✓ 2 Piezas de madera de 10cm x 8cm.
 - √ 4 abrazaderas metálicas.

La servoválvula consta de dos piñones, uno para el servomotor y otro para la llave de paso. El piñón que va acoplado al servomotor consta de 60 dientes, con un diámetro interno de 7mm y 30mm de diámetro externo. El piñón que va acoplado a la llave de paso consta de 96 dientes, con un diámetro interno de 10mm y 46mm de diámetro externo.

Debido a que solo se obtuvo un piñón de 60 y 96 dientes respectivamente, para mantener la misma relación en las dos llaves de control, fue necesario hacer fabricar el otro par de piñones en el taller de Metalmecánica del SENA.

Para la adaptación del piñón que va acoplado al servomotor se utiliza uno de los accesorios que vienen con el servomotor, ya que este tiene unas estrías que se acoplan al engrane de movimiento del servomotor y así ensambla este con el engrane de 60 dientes.

En el caso de la llave de paso (véase figura 35) para acoplar el engrane, primero se quita una tuerca que va acoplada al eje de la llave que permite el retiro de la maneta, después se retira la maneta la cual deja al descubierto este eje y así proporciona el lugar adecuado para ensamblar el engrane, así mismo este tiene un diámetro de 10mm donde encaja correctamente el diámetro interno del engrane; luego para asegurar que el engrane gire con el eje y proporcione el movimiento de la esfera se requiere hacer una muesca rectangular entre el eje y el

engrane para situar una cuña de seguridad. Posteriormente se acoplo la tuerca que posee el eje y por último se agregó sobre la tuerca un pegamento para mayor seguridad.

Como último paso se adapta la llave de paso con su respectivo servomotor y debido a que el servomotor y la llave de paso tienen diferentes alturas se utiliza un trozo de madera con un desnivel de 1cm para hacer coincidir el nivel de los engranes. La llave de paso tiene una altura de 4cm hasta el acople del engrane y el servomotor una altura de 5cm hasta el acople del piñón por lo tanto la llave de paso va sujetada al lado más alto de la base de madera con las abrazaderas metálicas y tornillos golosos y en tanto el servomotor va en la parte inferior de la base también sujeto con tornillos pero estos con rosca para tuerca.

Para la protección de las servoválvulas se construyen unas cajas metálicas de 10cm de ancho por 13cm de largo y 9cm de alto agregando un conector en una de las caras de las cajas para la conexión de los servomotores con el módulo de control.

En la figura 60 se observa el proceso para la construcción de las servoválvulas.



Figura 60. Proceso construcción servoválvulas

Fuente: Esta investigación.

• Implementación del sistema de encendido eléctrico para el intercambiador de calor. Para incorporar el encendido eléctrico al intercambiador de calor se utilizó un encendido eléctrico para estufa de 4 terminales a los cuales se acoplo dos bujías que permiten el salto de la chispa eléctrica, las cuales se ubicaron simétricamente entre los quemadores de tal forma que haga combustión el GLP cuando se acciona el encendido. El proceso de instalación se muestra en la figura 61.

Figura 61. Proceso implementación chispa eléctrica para el intercambiador de calor



Fuente: Esta investigación.

• Implementación de una tubería para acoplar los dispositivos actuadores, el intercambiador de calor y la tolva de tostión. Se utilizó tubería de ½" en hierro fundido para acoplar las servoválvulas, el intercambiador de calor y la tolva para tostión de café.

Para aprovechar al máximo la transferencia de calor desde el intercambiador hasta la tolva se conectó estos dos dispositivos lo más cerca posible. Luego se acoplo las dos servoválvulas teniendo en cuenta que no se afecte el sentido del aire hacia la tolva para tostión.

Figura 62. Acople de intercambiador de calor con tolva de tostión y las dos servoválvulas de control (Máquina de tostión)



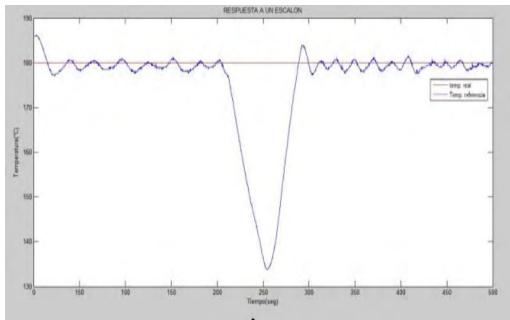
4.4.3 Calibración del sistema. El módulo de control se acopla a la máquina de tostión de café construida (figura 63) por medio de un computador, lo cual permite observar la respuesta del sistema frente a diferentes señales de entrada, con el fin de realizar los ajustes necesarios que permitan calibrar el sistema de tal manera que se pueda obtener el mayor desempeño posible.

Se analiza la respuesta del sistema introduciendo como señal de referencia un escalón de temperatura establecido en un valor promedio en donde se realizan las curvas de tostión del café. La respuesta obtenida se muestra en la figura 64, en la cual la respuesta se comporta de manera oscilante al llegar a la referencia, con un rango de 3°C de error, lo cual representa el 1.6% de error respecto a la referencia, después se introdujo una perturbación al sistema abriendo la tolva de tostión por un instante con lo cual se disminuyó rápidamente la temperatura, esto con el fin de observar la reacción del sistema de control frente a una perturbación, el cual actuó rápidamente y regreso al valor de referencia teniendo un sobrepaso de 3.9°C y luego se presentó el mismo rizado que antes de la perturbación. Para corregir la oscilación se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros como la velocidad del flujo de aire y la calibración del control difuso.



Figura 63. Sistema de control final en operación

Figura 64. Respuesta del sistema frente una referencia de temperatura fijada en 180°C



Fuente: Esta investigación.

a. Velocidad optima del flujo de aire que se inyecta al sistema: La velocidad del aire que pasa a través del intercambiador de calor es un parámetro que afecta la dinámica del sistema de control puesto que a mayor velocidad del flujo de aire, la energía térmica entregada al aire circulante por conducción y convección forzada será menor, de tal forma que al no fijar la velocidad apropiada, se presentan problemas como el rizado de la temperatura en estado estable.

Con el fin de calibrar la velocidad de flujo de aire para corregir la oscilación del sistema de control en estado estable y también minimizar la energía entregada al sistema, se obtiene la velocidad mínima del flujo de aire a la entrada del sistema que garantice un flujo a la entrada de la tolva de tostión y que además no afecte el movimiento de los granos de café para evitar que se choquen contra las paredes del recipiente deteriorando el tueste homogéneo o también que sean expulsados hacia el tambor exterior. Para la obtención de esta velocidad deseada se incrementó de forma gradual la presión en un compresor de aire hasta obtener una presión de 2 Kg/cm², con la cual se obtiene la velocidad deseada para el funcionamiento correcto del sistema.

b. Cambios en el diseño del controlador difuso: Los cambios realizados corresponden a redefinir los rangos para los conjuntos difusos correspondientes a las variables de entrada, definidas como error y cambio de error de temperatura. Al analizar la respuesta mostrada en la figura 64 se observó que en cada iteración realizada por el algoritmo de control la variable de entrada del controlador difuso definida como cambio de error no se representaba en todo el universo de discurso debido principalmente a la velocidad de iteración en el ciclo de control, por lo cual se decidió calcular el cambio de error cada 4 iteraciones para que de esta forma la distribución de su valor puede aparecer en cualquier conjunto borroso definido para esta variable.

Después de realizar los anteriores ajustes del sistema de control se procedió a realizar una nueva prueba en la cual se obtuvo la respuesta a una entrada de escalón mostrada en la figura 65.

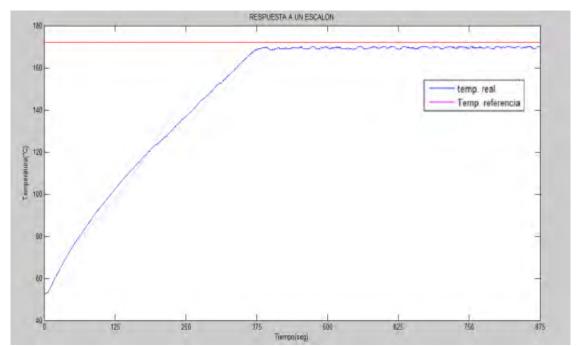


Figura 65. Respuesta del sistema frente a una referencia fijada en 172°C

Para la respuesta ilustrada en la figura 66 se observa el mejoramiento del control, el cual corrige tanto el sobrepaso como el rizado en estado estable, pero se estabiliza por debajo de la referencia lo cual indica que la base de reglas del controlador difuso no deben ser simétricas al realizar las acciones de control sobre las variables de salida (apertura de aire caliente y frio) por lo cual se debe ajustar la base de regla del control difuso de tal forma que se compense la relación aire caliente/aire frio; de tal forma que se logre establecer la temperatura real del sistema en la referencia.

Las reglas finales se presentan en la sección de la Fase 5 correspondiente a la Creación de la Base De Reglas.

De esta manera se obtiene un sistema de control final calibrado y listo para operar.

5. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 PRESENTACIÓN FINAL DEL SISTEMA EN OPERACIÓN

En la Figura 66 se muestra al sistema de control difuso en operación en el cual se presenta la respuesta frente a una entrada escalón, introducida y monitoreada en una PC a través de la interfaz de usuario que incorpora el sistema.

Total Total

Figura 66. Sistema de control en operación

Fuente: Esta investigación.

5.2 RESPUESTA A UN ESCALÓN

La primera función analizada fue un escalón de temperatura, cuyo valor se definió en 168°C que corresponden a un valor promedio de las curvas o perfiles de tostión de café, en la figura 67 se presenta la respuesta a esta entrada y en la tabla 8 se presentan las especificaciones de control para esta respuesta, de la que se puede concluir que el sistema de control se comporta de forma eficiente.

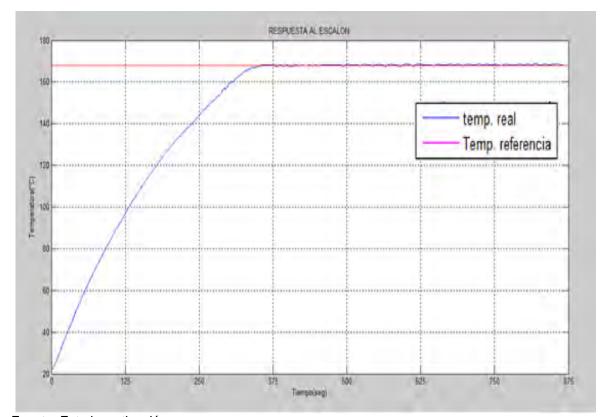


Figura 67. Respuesta del sistema ante una entrada de escalón

Tabla 8. Principales variables de respuesta para el sistema de control ante una entrada de escalón

Tiempo	Tiempo de	Tiempo	Máximo	Tiempo de
de	levantamiento(min)	pico	sobreimpulso(°C)	asentamiento(min)
retardo		(min)		
(min)				
1.65	5.91	5.95	168.2	6.1

Fuente: Esta investigación.

5.3 RESPUESTA A UNA RAMPA

Para observar el comportamiento gradual del cambio de temperatura se introdujo una función de rampa a través de la interfaz de usuario, en esta se introdujo una perturbación en el inicio que consistió en incrementar la temperatura de forma manual, abriendo el paso de aire caliente y cerrando la llave de paso de aire frio por un instante, en seguida se inició el control, el cual respondió rápidamente y se

estableció en la señal de referencia. En la figura 68 se observa la respuesta a esta entrada.

| Temp. referencia | Temp. refer

Figura 68. Respuesta del sistema de control ante una entrada de rampa

Fuente: Esta investigación.

Para un análisis más detallado de la respuesta a esta rampa se realiza un acercamiento al inicio de la rampa, la cual se observa en la figura 69, en esta se puede apreciar una perturbación introducida al sistema, en la cual se incrementa la temperatura hasta que llega a un punto máximo en donde se activa el control, después este reacciona exitosamente estableciéndose en la referencia, pasando de una temperatura de 115 a 106.6°C en un tiempo de establecimiento de 44.75 segundos sin presentar sobrepasos, con un error en estado estable de aproximadamente 0.2 gados centígrados.

Figura 69. Acercamiento primeros segundos de la respuesta del sistema de control ante una rampa

Un segundo acercamiento en la función rampa se realiza en el momento en el cual comienza a girar el tambor interno de la tolva de tostión en el cual se encuentra la muestra de café, por esta razón se incrementa un poco el error en estado estable debido a que el movimiento del tambor y los granos de café crean una turbulencia en el ambiente, en la figura 70 se aprecia el acercamiento realizado en el cual el error en estado estable incrementa a 0.6°C, sin embargo el control se comporta de una forma adecuada ya que en 160°C en donde se incrementa el error, este representa el 0.375 % del valor de referencia.

RESPLESTA A LINA RAMPA

175

165

1675

700

725

756

775

800

825

850

875

890

825

Figura 70. Acercamiento últimos segundos de la respuesta del sistema de control ante una rampa

5.4 PERFILES DE TOSTIÓN

Finalmente se realizaron diferentes perfiles de tostión de café, estos perfiles están en una base de datos y se los carga desde la interfaz de usuario. Para la construcción de estas trayectorias se realizó una interpolación cúbica con base en un vector de referencia que contiene diferentes valores de temperatura que corresponden a un tueste de café en especial, el tiempo para esta tostión se estableció en 19 minutos el cual se puede variar desde la interfaz de usuario dependiendo de las características de la muestra de café que se quiera obtener. A continuación se analiza la respuesta del control difuso para dos perfiles de tostión.

Tostión 1: En la figura 71 se muestra un perfil de tostión realizado en la maquina diseñada incorporando el sistema de control, la trayectoria descrita corresponde a un tueste típico y la cantidad de café de la muestra fue de 100g. Al analizar la respuesta del controlador se observa como al inicio del proceso se presenta una perturbación debida a la apertura de la compuerta para ingresar el café lo cual genera una caída en la temperatura, pero el control reacciona exitosamente y se establece en la trayectoria de referencia, al analizar el error en estado estable se observa que varía 0.6°C aproximadamente. También se presenta algunas perturbaciones propias del sistema como la turbulencia en el aire que ocasiona la no uniformidad de la temperatura en la tolva.

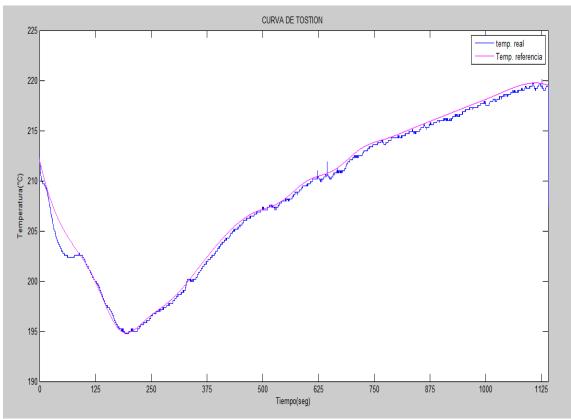


Figura 71. Respuesta del sistema de control ante una Curva de tostión

Fuente: Esta investigación.

La muestra de café obtenida se presenta en la figura 72, en donde se resalta la uniformidad de los granos respecto a su color café, como también la no presencia de residuos debidos a la tostión, los cuales son expulsados por el flujo de aire, estos parámetros además de las características de aroma sabor y acidez demuestran el éxito en el diseño del control implementado.

Figura 72. Tostión de Granos de café en la maquina implementada

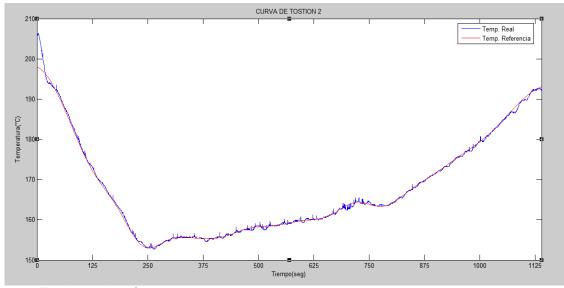


Fuente: Esta investigación.

Tostión 2: La figura 73 muestra un segundo perfil de tostión en el cual el sistema de control realiza el seguimiento de la referencia en toda la trayectoria, para corregir la caída de temperatura debida a la apertura de la compuerta para ingresar el café se decidió iniciar el control un poco más arriba del valor inicial de tal forma que compense la disminución de la temperatura, también se determinó el error en estado estable el cual es aproximadamente de 0.6°C.

El análisis que determina las propiedades organolépticas de la muestra se presenta en la tabla 9 realizada por el catador profesional Evelio Lasso, quien posee una acreditación como catador grado Q, categoría otorgada a los 700 mejores catadores en el mundo, en la ficha técnica se califica en una escala de 0 a 100. La muestra obtuvo una calificación de 84.5 que la clasifica como una muestra de café especial.

Figura 73. Segundo perfil de tostión realizado por el sistema de control



Fuente: Esta investigación.

Tabla 9. Ficha técnica tostión N°2 producto tostado

CURVA DE TOSTION #2 UDENAR

FICHA TÉCNICA DEL PRODUCTO TOSTADO

CODIGO: 002.

Fecha de Catación: 17/05/2014 **UDENAR** Laboratorio: **EVELIO LASSO** Fecha de muestreo: 16/05/2014 Catador: Presentación de muestra: **TOSTADO** Peso de la muestra (Gr): 250GR

N/A Origen

Variedad N/A **Tipo de Tostion:** MEDIA ALTA

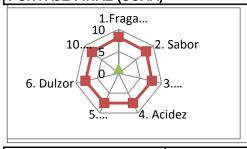
Rango de altitud: **Numero Agtron:** N/A N/A Época de cosecha N/A Molienda: Media

PERFIL DE TAZA	PERF	IL DE	TAZA
----------------	-------------	-------	-------------

PERFIL DE TAZA		
1.Fragancia/Aroma	8,25	CITRICO, FRUTOS ROJOS CARAMELO
2. Sabor	8,00	ACHOCOLATADO, NOTAS CITRICAS
3. Sabor residual	7,75	DULCE, CORTO
4. Acidez	7,50	MEDIA
5. Cuerpo	7,50	MEDIO
6. Dulzor	7,75	ACARAMELADO
7. Uniformidad	10,00	UNIFORME
8. Limpieza de la taza	10,00	LIMPIO
9. Balance	10,00	BALANCEADO
10. Global	7,75	CAFÉ MAS DESAROLLADO EN SU SABOR

PUNTAJE FINAL (SCAA)

84,50



CURVA DE TOSTION

OBSERVACIONES: CAFÉ MAS DESARROLLADO EN SU ESTRUCTURA DE SABOR, ACIDEZ MEDIA Y RECIDUAL UN POCO MAS PROLONGADO.

> **EVELIO AUDIAS LASSO B. Catador Q-GRADER**

Fuente: Esta investigación.

6. CONCLUSIONES

Se cumple satisfactoriamente los objetivos de la investigación al obtener un sistema óptimo de control de temperatura y tiempo en el proceso de tostión de café, este control permite la obtención de cafés especiales mediante la realización de diferentes perfiles de tostión a través de una interfaz gráfica de usuario, la cual cumple los principios de usabilidad, mostrando gráficas de temperatura real y su referencia, apertura de servoválvulas, una barra de herramientas para el análisis de las curvas construidas además integra la opción de guardado de los perfiles de tostión con el fin de estandarizar el proceso.

Se diseñó e implementó dos servoválvulas que permiten controlar de forma adecuada, el caudal de aire frio y caliente que es ingresado en la tolva de tostión lo cual es clave para el correcto funcionamiento del sistema. Además se pueden utilizar estas servoválvulas para controlar otro tipo de fluido como lo puede ser agua, GLP, etc.

Por la complejidad del sistema implementado en este proyecto y los factores externos que son difíciles de modelar, es viable un control basado en lógica difusa, ya que permite evaluar variables lingüísticas no numéricas, simulando la lógica humana, al relacionar entradas y salidas sin tener que entender todas las variables, permitiendo que el sistema de control pueda ser confiable y estable.

El principal aporte de este trabajo a la región es el desarrollo tecnológico que permite potenciar la calidad del café en el proceso de tostión, de esta forma se apoyar el sector agrario de Nariño al enfocarse en la tecnificación de las cadenas productivas, en el presente caso de uno de los productos más importantes de la oferta agraria nariñenses.

El desarrollo del trabajo de grado permitió mostrar la capacidad intelectual, humana y social fomentada dentro de la Universidad de Nariño comprometida con el desarrollo de la región, la cual a través del programa de ingeniería electrónica aporta significativamente a la apropiación de la tecnología en el sector agrario el cual es la base de la economía de Nariño. De esta manera se da cumplimiento a los fines misionales de la institución a través de una investigación con proyección social, orientada a dar respuesta a los problemas y necesidades del departamento.

RECOMENDACIONES

Para el correcto funcionamiento del sistema de control se recomienda leer el manual de usuario (ANEXO E).

Desarrollar un sistema que agilice el enfriamiento del café para evitar la sobretostion.

Se recomienda implementar un testeador en el cilindro de tostado para verificar el avance de la tostión y desarrollo del grano.

Para incrementar la eficiencia del sistema se recomienda realizar un trabajo de investigación que tenga como objetivo utilizar la energía térmica no aprovechada por el intercambiador de calor para inyectarla a un proceso de secado del grano. Se sugiere realizar métodos de control alternativos.

Se sugiere realizar un sistema embebido.

Se recomienda realizar investigaciones interdisciplinares que tengan como objetivo solucionar problemáticas que lleven a tecnificar los procesos tradicionales en la actividad económica de la región y permitan dar valor agregado a los productos o servicios, generando un desarrollo integral.

Mejorar el diseño del intercambiador de calor realizando un adecuado modelamiento matemático partiendo de las propiedades termofisicas.

BIBLIOGRAFIA

AHMAD M, Ibrahim. Fuzzy Logic for Embedded System Applications. EEUU: Newnes, 2004.

DIAZ, Mario. Estudio de factibilidad para producir y exportar café gourmet a Alemania, en Marcala, Honduras. Zamorano: Tesis ingeniería Agronómica, U. Zamorano, 2001.p. 58.

JIMÉNEZ, L. Algunas aplicaciones de la lógica difusa a teoría de control. Bogotá: Instituto Politécnico. s.f.

KATSUHITO, Ogata. Ingeniería de control moderna. México: Prentice Hall, 1998.

LAGOS, Camilo; PORTILLA, Daniel y RUIZ, Jaime. Informe diseño y fabricación de una máquina para tostion para la microempresa "ALIANZA CAFÉ VIDA". Bogotá: s.n. 2000. p.13.

MARTÍNEZ DEL BRÍO, Bonifacio y SANZ MOLINA, Alfredo. Redes Neuronales y Sistemas Borrosos. Buenos Aires: Alfaomega, 2007. p. 60.

MORENO VELASCO, Ignacio. Sensores Resistivos y su Acondicionamiento, Área de Tecnología Electrónica. España: Universidad de Burgos, s.f.

ORTIZ, Rodríguez. Modelado y control PD-difuso en tiempo real para el sistema barra-esfera, CINVESTAV. Bogotá: s.n. 2004.

PASSINO M, Kevin y YURKOVICH, Stephen. Fuzzy Control; Addison Wesley. EEUU: s.n. 1998.

PINEDA CANDO, Marco Antonio y VIVAS PASPUEL, Atal Kumar. Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos. [Tesis para optar al título de Ingeniero electrónico]. Quito: Escuela Politécnica Nacional de Quito, 2008. p. 30.

PRIETO, Yenni. Caracterización física de café semitostado. [Tesis para optar al título de Ingeniera Quimica]. Bogotá: Universidad América, 2002. p.176

TIMOTHY J, Ross. Fuzzy Logic with engineering applications. EEUU: John Wiley & Sons Ltda, 2004.

NETGRAFIA

FOROS DE ELECTRONICA. Redes Snubber. [en línea] Disponible en Internet: http://www.forosdeelectronica.com/f23/redes-snubber-6613/ [citado mayo de 2014]

SERVODATABASE. TowerPro MG996R – Servo estándar. [en línea] Disponible en Internet: http://www.servodatabase.com/servo/towerpro/mg996r [citado abril de 2014]

SHARATRONICA. Como eliminar ruidos eléctricos en microcontroladores Pic. [en línea] Disponible en Internet: http://www.sharatronica.com/eliminar_ruidos_electricos.html [citado abril de 2014]

SOLÁ, Albert. Tostado y Molido del Café. Pp. 3-4. [en línea] Disponible en Internet: http://www.forumdelcafe.com/pdf/F_07-Tostado_y_Molido.pdf [citado abril de 2014]

VAZQUEZ GARCIA, Luis Alberto. Algoritmos de control avanzado. [en línea] Disponible en Internet: http://royal2871.blogspot.com/ [citado abril de 2014]

ANEXOS

ANEXO A. TIPOS DE CONTROL ELECTRÓNICO

• Controlador proporcional

La señal de control a la salida del controlador está relacionada con la entrada del controlador mediante una constante proporcional. Es decir, la salida del controlador es directamente proporcional a su entrada. Sea e, la señal de error, entrada del controlador y u la salida del controlador, así se establece una relación proporcional entre u y e:

$$u(t) = Kp \cdot e(t)$$

Donde Kp se denomina ganancia proporcional. La función de transferencia de un control proporcional es simplemente Kp.

El control proporcional por lo tanto es un elemento con ganancia constante, si existe un error grande el controlador genera una gran salida y viceversa. La ganancia constante normalmente varía dentro de un rango de errores conocido como banda proporcional.

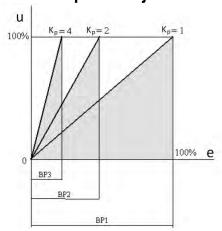
La banda proporcional es la modificación expresada en porcentaje de variación de entrada al controlador e, requerida para producir un cambio del 100% en la salida u.

En ocasiones la ganancia del controlador se expresa en forma de porcentaje de la posible salida total del controlador, por lo que para obtener un cambio en la salida del controlador desde el extremo inferior al superior de la banda proporcional se necesita:

Kp= 100/banda proporcional

Si se considera la salida y la entrada del controlador en porcentaje, "u" y "e' en %, se tendrá para algunos valores diferentes de Kp la siguiente gráfica:

Gráfica de la salida m del controlador, a su señal de entrada (e), como porcentaje.



Donde BP1, BP2 y BP3 indican las correspondientes bandas proporcionales correspondientes a las ganancias Kp (ALVAREZ s.f.)

El controlador proporcional es sencillo de aplicar, en esencia solo requiere una forma de amplificador, este podría ser incluso un amplificador operacional. El controlador por encontrarse en lazo directo del sistema afecta con un valor Kp a los polos del sistema en lazo cerrado.

La proporcional es una acción de control lineal importante. Como ventajas se pueden mencionar:

- La instantaneidad de aplicación
- La facilidad de comprobar los resultados

Como desventajas:

- La falta de inmunidad al ruido.
- La imposibilidad de corregir algunos errores en el régimen permanente.

El aumento de la ganancia proporcional en forma exagerada puede hacer que polos de la transferencia no modelados que para ganancias bajas no influyen, adquieran importancia y transformen al sistema en inestable.

Control Integral

En un controlador con acción de control integral, el valor de la salida del controlador u(t) se cambia a una razón proporcional a la señal de error e(t). Es decir,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t)$$

O bien,

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

En donde Ki es una constante ajustable. (OGATA 1998). La función de transferencia del controlador integral es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

Si se duplica el valor de e(t) el valor de u(t) varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor de u(t) permanece estacionario. En ocasiones, la acción de control integral se denomina control de reajuste (reset).

Ki se denomina ganancia integral. Cuando el error es constante, la salida del controlador se incrementa de manera regular con forme se incrementa el área bajo la curva. (ALVAREZ s.f.)

La salida del controlador en cualquier tiempo es proporcional a la acumulación de los efectos de los errores pasados. Este tipo de controlador tiene características muy convenientes que permiten mejorar el proceso de control sin embargo si se utiliza por sí solo tiene una desventaja y es la reducción de la estabilidad relativa del mismo.

Control Derivativo

La acción de control derivativa de un sistema de control, es proporcional a la razón de cambio del error. Por lo cual, la salida u(t) es proporcional a la primera derivada de la entrada al controlador, e(t).

$$u(t) = K_d \frac{d e(t)}{dt}$$

Donde Kd es la constante ajustable.

Así la función de transferencia será:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s$$

Donde Kd se conoce como ganancia derivativa, cuando existe un error constante no existe ninguna acción de control, en cambio si el error es variable por ejemplo una rampa, el controlador da una señal de corrección grande puesto que ésta es proporcional a la razón de cambio y no a su valor.

La acción de control derivativa va acompañada de alguna otra acción de control. En este tipo de controlador se tiene como ventaja que la acción derivativa es anticipativa, es decir adelanta la acción de control frente a la aparición de una tendencia de error (derivada), esto tiende a estabilizar el sistema puesto que los retardos en controlar lo tienden a inestabilizar.

Sin embargo, también se tienen desventajas importantes, la acción derivativa es prácticamente inaplicable ante la presencia de ruido, este hace que la variable de control tome valores contrapuestos y máximos cuando la pendiente del ruido entra como señal de error. Es necesario entonces filtrar la señal ruidosa. (ALVAREZ s.f.)

Control Proporcional Integral

La acción de control de un controlador proporcional-integral (PI) se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t)dt$$

o la función de transferencia del controlador es:

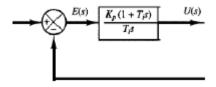
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

En donde **Kp**, es la ganancia proporcional y Ti se denomina tiempo integral. Tanto **Kp** como Ti son ajustables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de **Kp** afecta las partes integral y proporcional de la acción de control.

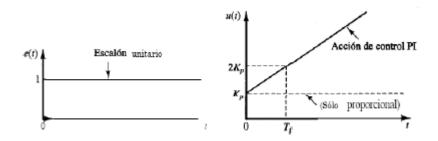
El inverso del tiempo integral Ti se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional

de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto. (OGATA 1998).

Diagrama de bloques de un controlador proporcional más integral.



Si la señal de error e(t) es una función escalón unitario, la salida del controlador u(t) se convierte en lo que se muestra en la figura siguiente:



Control Proporcional Derivativo

La acción de control de un controlador proporcional-derivativa (PD) se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

y la función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \, K_p(1 + T_d s)$$

En donde **Kp** es la ganancia proporcional y **Td** es una constante denominada tiempo derivativo. (OGATA 1998)

Tanto **Kp** como **Td** son ajustables. La acción de control derivativa, en ocasiones denominada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. El tiempo derivativo **Td** es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional.

Observe que la acción de control derivativa no se usa nunca sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios.

Aunque la acción de control derivativa tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador.

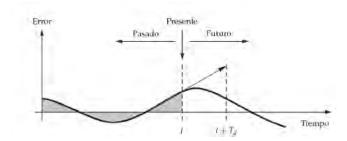
Control PID

El controlador PID posee un refinamiento adicional que consiste en dotar al controlador de una capacidad anticipativa utilizando una predicción de la salida basada en una extrapolación lineal. Ver Figura 1.3. Esto se puede expresar matemáticamente como:

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

La acción de control es así una suma de tres términos que representan el pasado por la acción integral del error (el término-I), el presente (el término-P) y el futuro por una extrapolación lineal del error (el término-D). El término e + Td de dt es una predicción lineal del error Td unidades de tiempo en el futuro. Los parámetros del controlador se llaman: ganancia proporcional K, tiempo integral Ti, y tiempo derivativo Td.

Un controlador PID calcula su acción de control basándose en los errores de control pasados, presentes, y futuros



Se ha comprobado empíricamente que el controlador PID es capaz de resolver un amplio espectro de problemas de control. Hay controladores más complejos que difieren del controlador PID porque utilizan métodos más sofisticados para la predicción. (Karl J. Astrom s.f.)

control predictivo

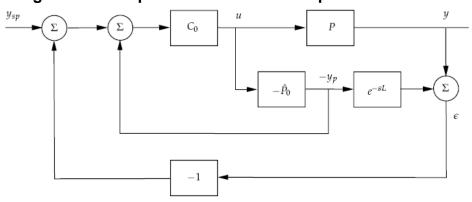
El control predictivo tiene como objetivo resolver de forma efectiva, problemas de control y automatización de procesos industriales que se caractericen por presentar un comportamiento dinámico complicado, multivariable, y/o inestable. La

estrategia de control en que se basa este tipo de control, utiliza el modelo matemático del proceso a controlar para predecir el comportamiento futuro de dicho sistema, y en base a este comportamiento futuro puede predecir la señal de control futura.

El control predictivo integra disciplinas como el control óptimo, control estocástico, control de procesos con retardo de tiempo, control multivariable, control con restricciones. (Díaz 2006)

Un controlador PI sólo considera datos presentes y pasados, y un controlador PID además predice el comportamiento futuro del proceso mediante extrapolación lineal. Han existido muchos intentos para encontrar otras formas de predecir el comportamiento futuro del proceso y tener esta predicción para generar las señales de control. Buenas predicciones pueden mejorar el rendimiento del controlador, particularmente cuando el sistema tiene tiempos de retardo, muy comunes en control de procesos. Los tiempos retardo pueden surgir de un mecanismo de un retardo puro causado por el transporte o por el tiempo consumido debido a computación o comunicación. Los retardos pueden ser también causados por medidas obtenidas en análisis fuera de línea. Pueden además aparecer cuando un sistema de alto orden o una ecuación en diferencias parciales se aproxima con un modelo de bajo orden, como en la conducción de calor. Un controlador que podría tratar los procesos con grandes retardos de tiempos fue propuesto por Smith en 1957. El controlador se conoce ahora como predictor de Smith y se puede ver como un nuevo tipo de controlador pero también se puede interpretar como una ampliación de un controlador PID. Existen muchos otros controladores con capacidades predictivas. El controlador predictivo basado en modelo es una gran clase de controladores que está llegando a ser cada vez más popular.

Diagrama de bloques de un sistema con predictor de Smith.



Este controlador puede dar mejoras significativas en la respuesta a cambios en el punto de consigna, pero puede ser también muy sensible a incertidumbres de modelado. El análisis además muestra que los conceptos de márgenes de ganancia y fase no son suficientes para caracterizar la robustez del sistema. La

razón es que el diagrama de Nyquist de la función de transferencia del lazo puede tener grandes bucles a frecuencias más altas que la frecuencia de cruce de ganancia.

También se pueden describir controladores basados en este concepto tales como el Controlador PPI que es un tipo especial de predictor de Smith, así como el Control Predictivo Basado en Modelo, que es una forma de predicción más general. (Karl J. Astrom s.f.). Entre las ventajas del control predictivo se pueden citar:

- Formulación en el dominio del tiempo, lo cual le permite ser una técnica flexible, abierta e intuitiva.
- Permite tratar con sistemas lineales y no lineales, monovariables y multivariables utilizando la misma formulación para los algoritmos del controlador.
- La ley de control responde a criterios de optimización.
- Permite la incorporación de restricciones en la síntesis o implementación del controlador.
- Brinda la posibilidad de incorporar restricciones en el cálculo de las actuaciones.

Entre las desventajas se pueden citar:

- Requiere el conocimiento de un modelo dinámico del sistema suficientemente preciso.
- Requiere un algoritmo de optimización, por lo que solo se podría implementarse por medio de una computadora.

Requiere un alto coste computacional, lo que hace difícil su aplicación a sistemas rápidos.

 Hasta hace relativamente poco, no se podía garantizar la estabilidad de los controladores, especialmente en el caso con restricciones. Esto hacía que el ajuste de estos controladores fuese heurístico y sin un conocimiento de cómo podían influir los parámetros en la estabilidad del sistema. (Díaz 2006)

Sintonía automática

La sintonía automática, o autosintonía, es un método donde el controlador se sintoniza automáticamente bajo demanda de un usuario. Tradicionalmente, el usuario pulsaba un botón o enviaba una orden al controlador. La sintonía automática de controladores PID se puede llevar a cabo mediante la combinación de los métodos de determinadas dinámicas de procesos con los métodos para el

cálculo de parámetros de controladores PID. Un procedimiento de sintonía automática consiste en tres pasos:

- Generación de la perturbación del proceso.
- Evaluación de la respuesta de la perturbación.
- Cálculo de los parámetros del controlador.

Este es el mismo procedimiento que utiliza un ingeniero experimentado cuando sintoniza un controlador manualmente. El proceso debe ser perturbado de alguna manera para determinar su dinámica. Esto se puede hacer de múltiples maneras, por ejemplo, aplicando escalones, pulsos o sinusoides a la entrada del proceso. La evaluación de la respuesta a la perturbación puede incluir una determinación del modelo del proceso o una simple caracterización de la respuesta. La experiencia industrial ha mostrado claramente que la sintonía automática es algo altamente útil y deseable. La sintonía automática se denomina algunas veces sintonía bajo demanda o sintonía de una vez. Los controladores PID comerciales con capacidades de sintonía automática están disponibles desde principios de los ochenta. La sintonía automática se pude incorporar en un controlador. Puede realizarse utilizando dispositivos externos conectados al lazo de control sólo durante la fase de sintonía, de tal manera que se muestran los parámetros del controlador cuando el experimento de sintonía ha finalizado. Debido a que los dispositivos de sintonía se supone que trabajan junto con los controladores de distintos fabricantes, éstos deben aportar suficiente información sobre el controlador para dar una sugerencia adecuada de cada parámetro. Incluso cuando se utilizan dispositivos de sintonía automática es importante poseer cierto conocimiento del proceso. La sintonía automática es sólo una manera de utilizar la técnica adaptativa.

Los enfoques de sintonía automática se pueden dividir en dos categorías, los enfoques basados en modelo y los enfoques basados en reglas. En los enfoques basados en modelo, se obtiene un modelo del proceso de manera explícita y la sintonía se basa en dicho modelo. En los enfoques basados en reglas, no se obtiene un modelo explícito del proceso. En lugar de eso, la sintonía se basa en reglas similares a aquellas que utiliza un operador experimentado cuando sintoniza el controlador de manera manual. También se encuentra la sintonización realimentada iterativa, que es un método iterativo para la sintonía de controladores. (Karl J. Astrom s.f.)

Técnicas adaptativas

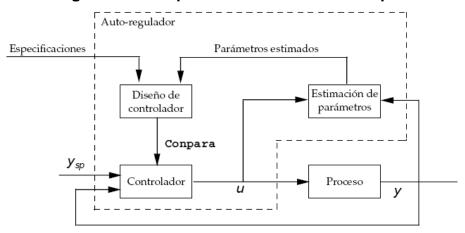
Las técnicas de sintonía automática surgieron de la investigación control adaptativo. La adaptación fue originalmente desarrollada para tratar con procesos con características que eran variables en el tiempo o con distintas condiciones de operación. Particularmente, todas las técnicas adaptativas se pueden utilizar para

sintonía automática. El controlador adaptativo es simplemente puesto en marcha hasta que los parámetros convergen y entonces los parámetros permanecen constantes. El inconveniente con este enfoque es que los controladores adaptativos pueden requerir información previa. Existen numerosas técnicas especiales que se pueden utilizar. La experiencia industrial ha mostrado que la sintonía automática es probablemente la aplicación más útil de las técnicas adaptativas. La planificación de ganancia es también una técnica muy efectiva para trabajar con procesos que cambian sus características con el punto de operación. En general, la frase técnicas adaptativas incluye auto sintonía, planificación de ganancia y adaptación.

Un controlador adaptativo ajusta sus parámetros continuamente para tener en cuenta los cambios en la dinámica del proceso y las perturbaciones. La adaptación se puede aplicar a los parámetros de control por realimentación y por prealimentación. Existen dos tipos de controladores adaptativos basados en métodos directos e indirectos. En un método directo, los parámetros del controlador se ajustan directamente a partir de los datos de operación en lazo cerrado. En los métodos indirectos, los parámetros de controlador se obtienen indirectamente primero mediante la actualización del modelo del proceso en línea y después determinando los parámetros del controlador mediante algún método de diseño de control. El sistema de modelo de referencia es un controlador adaptativo indirecto. El regulador auto sintonizado se puede implementar de ambas maneras, con control directo e indirecto. Existe un gran número de métodos disponibles para ambas formas directa e indirecta. Tales métodos se pueden describir en términos de los métodos utilizados para modelado y diseño de control.

En la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques de un controlador adaptativo indirecto. Hay un estimador de parámetros que determina los parámetros del modelo basándose en las observaciones de las entradas y salidas del proceso. (Karl J. Astrom s.f.).

Diagrama de bloques de un controlador adaptativo.



También existe un bloque de diseño que calcula los parámetros del controlador a partir de los parámetros del modelo. Si el sistema se opera como un sintonizador, el proceso se excita mediante una señal de entrada. Los parámetros se pueden estimar recursivamente o en modo por lotes. Entonces, se calculan los parámetros del controlador y se pone en marcha. Si el sistema se opera como un controlador adaptativo, se calculan los parámetros recursivamente y los parámetros del controlador se actualizan cuando se obtienen los nuevos valores. (Karl J. Astrom s.f.).

ANEXO B. SENSORES DE TEMPERATURA TERMOPAR

Un termopar (también llamado termocupla) es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los milivoltios) que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado «punto caliente» o «unión caliente» o de «medida» y el otro llamado «punto frío» o «unión fría» o de «referencia» (efecto Seebeck).

Normalmente las termocuplas industriales estan compuestas por una vaina, que no es más que un tubo de acero inoxidable u otro material. En un extremo de esa vaina está la unión, y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

En Instrumentación industrial, los termopares son usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación está en la exactitud, pues es fácil obtener errores del sistema cuando se trabaja con temperaturas inferiores a un grado Celsius.[cita requerida]

El grupo de termopares conectados en serie recibe el nombre de termopila. Tanto los termopares como las termopilas son muy usados en aplicaciones de calefacción a gas.

Termistor

Un termistor es un sensor resistivo de temperatura. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. El término termistor proviene de Thermally Sensitive Resistor. Existen dos tipos de termistor:

El funcionamiento se basa en la variación de la resistencia del semiconductor debido al cambio de la temperatura ambiente, creando una variación en la concentración de portadores. Para los termistores NTC, al aumentar la temperatura, aumentará también la concentración de portadores, por lo que la resistencia será menor, de ahí que el coeficiente sea negativo. Para los termistores PTC, en el caso de un semiconductor con un dopado muy intenso, éste adquirirá propiedades metálicas, tomando un coeficiente positivo en un margen de temperatura limitado. Usualmente, los termistores se fabrican a partir de óxidos semiconductores, tales como el óxido férrico, el óxido de níquel, o el óxido de cobalto.

Sin embargo, a diferencia de los sensores RTD, la variación de la resistencia con la temperatura no es lineal. Para un termistor NTC, la característica es hiperbólica. Para pequeños incrementos de temperatura, se darán grandes incrementos de

resistencia. Por ejemplo, el siguiente modelo caracteriza la relación entre la temperatura y la resistencia mediante dos parámetros:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$$

Con

$$A = R_0 \cdot e^{\frac{-B}{T_0}}$$

Dónde:

- R_T es la resistencia del termistor NTC a la temperatura T (K)
- R₀ es la resistencia del termistor NTC a la temperatura de referencia T_0 (K)
- B es la temperatura característica del material, entre 2000 K y 5000 K

Termostato

Un termostato es el componente de un sistema de control simple que abre o cierra un circuito eléctrico en función de la temperatura.

Su versión más simple consiste en una lámina metálica como la que utilizan los equipos de aire acondicionado para apagar o encender el compresor.

Otro ejemplo lo podemos encontrar en los motores de combustión interna, donde controlan el flujo del líquido refrigerante que regresa al radiador dependiendo de la temperatura del motor.

ANEXOS C - G. Cd ROM