

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UN
SECADOR DE FRUTAS SOLAR-ELECTRICO USANDO LOGICA
DIFUSA**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECATRÓNICO**

JESÚS SOLDEVILLA URETA

PROMOCION 2010-II

LIMA-PERU

2 014

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mi madre Herminia Ureta, quien me ha formado y enseñado a ser una buena persona, a mi hermana Gloria Soldevilla quien ha velado por mi desde que era muy pequeño, a mi novia quien día a día me alienta y acompaña en mi lucha por la vida y a todos mis hermanos y familiares que me han apoyado cuando más los necesité.

Agradecimientos

A mi profesor de primaria, Lic. Albino Fuentes quien desde que era muy pequeño me alentó a ser perseverante y a luchar por mis sueños.

A mis hermanos mayores, quienes siempre me dan su apoyo incondicional como guías, en cada proyecto que me propongo a realizar.

A mi asesor, Ing. Rodríguez Bustinza, quien ha sido un ejemplo de ser humano y profesional intachable.

ÍNDICE

Prologo.....	1
CAPÍTULO I	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivo general	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Alcances	5
1.5 Descripción del producto final.....	5
1.6 Limitaciones	6
CAPÍTULO II	7
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA EN SECADORES DE FRUTAS.....	7
2.1 Presentación del modelo.....	8
2.1.1 Descripción general del secador solar.....	8
2.2 Principio de funcionamiento y diagrama esquemático.....	10
CAPÍTULO III.....	15
IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO	15
3.1 Identificación del problema.....	15
3.1.1 Estado situacional encontrado	16
3.1.2 Estado futuro deseado.....	17
3.2 Planteamiento de la hipótesis de trabajo	18
CAPÍTULO IV	20
MARCO TEORICO.....	20
4.1 Secadores solares.....	20
4.1.1 Tipos de secadores de frutas	22
4.1.2 Características físicas del secador solar a usar	26
4.2 Deshidratación de frutas	27

b.	Pre-tratamiento de frutas	28
c.	Tratamiento post-deshidratación de frutas.....	29
4.3	Fundamentos de la lógica difusa.....	30
4.3.1	Conjuntos difusos	32
4.3.2	Funciones de pertenencia.....	35
4.3.3	Operaciones entre conjuntos difusos.	38
4.3.4	Fusificación	39
4.3.5	Base de conocimiento	41
4.3.6	Inferencia difusa	43
4.3.7	Motor de inferencia	45
4.3.8	Defusificación	47
4.4	Sistemas de control.....	49
4.4.1	Control difuso.....	51
4.5	Transductores	54
4.5.1	Termopar	56
4.6	Resistencias eléctricas	59
CAPÍTULO V		67
DISEÑO DEL CONTROL DIFUSO		67
5.1	Modelamiento matemático del secador	68
	Modelo matemático de la cámara de secado.....	69
5.2	Diseño del sistema.....	71
5.2.1	Módulo de disparo.....	73
5.2.2	Diseño del Controlador.....	79
5.2.3	Determinación de entradas y salidas.....	92
5.2.4	Modelamiento del sistema integrado	93
5.2.5	Evaluación final.....	97
5.2.6	Costos.....	104
CONCLUSIONES		105
Bibliografía		107
ANEXOS.....		108

Índice de figuras

<i>Figura 2.1: Esquema general del horno acumulador de energía.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.2. Diagrama esquemático del sistema.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3.1: Diagrama de la temperatura vs tiempo.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4.1: Secador solar tipo carpa.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4.2: Secador solar tipo armario.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4.3: Secador solar tipo túnel.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4.4: Lógica difusa vs lógica clásica.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.5: Conjuntos difusos para la variable estatura.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.6: Funciones típicas de membresía.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.7: Variable lingüística.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.8: Variable fusificada.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.9. Proceso de Inferencia difusa.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.10: Máquina de inferencia difusa.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.11. Máquina de inferencia difusa simplificada.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.12: Método Max.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.13: Método Centroide.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.14: Media de máximos</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.15: Lazo cerrado.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.16: Lazo cerrado con controlador.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.17: Controlador difuso.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.18: Diagrama termopar</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.19 : FEM vs Temperatura.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.1: Modelo del secador en 3D </i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.2: Diagrama esquemático del horno </i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.3: Diagrama de bloques del horno.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.4: Detector de cruce por cero.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.5: Ondas de salida.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.6:Diagrama de flujo.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.7:Conexión del Atmega43A-PU </i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.8:Circuito de potencia.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.9: Controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo </i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.10: Funciones de pertenencia del error.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.11: Funciones de pertenencia de la variable del error.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.12: Funciones de pertenencia de la salida </i>	<i>87</i>
<i>Figura 5.13: Método Max-min.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.14: Editor de base de reglas.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5.15: Superficie de control.</i>	<i>91</i>

<i>Figura 5.16: Sistema de control implementado.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5.17: Diagrama general del sistema</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.18: Subsistema Controlador.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.19: Representación del Microcontrolador Atmega</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.20: Representación del amplificador de potencia.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.21: Representación del horno</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.22: Respuesta a escalón 60⁰C</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.23: Respuesta escalón 40⁰C</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.24: Respuesta escalón 70⁰C</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5.25: Respuesta a una rampa descendente de 1.5⁰C/min</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.26: Respuesta a una rampa descendente de 3⁰C/min</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5.27: Respuesta a una rampa ascendente de 6⁰C/min</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.28: Respuesta a un escalón de 60⁰C y temperatura de ambiente variable.</i>	<i>103</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 4-1: Matriz de base de datos y base de reglas.</i>	43
<i>Tabla 4-3: Tipos de termopares</i>	58
<i>Tabla 4-4: Resistividad eléctrica de las aleaciones Ni-Cr</i>	64
<i>Tabla 5-1: Rango del error.</i>	84
<i>Tabla 5-2: Rango de la derivada del error.</i>	85
<i>Tabla 5-3: Rango de la salida</i>	86
<i>Tabla 5-4: FAM del controlador difuso de temperatura.</i>	88
<i>Tabla 5-5: Señales del sistema de control.</i>:	92
<i>Tabla 5-6: Tabla de costos</i>	104

Prologo

Debido al incremento de la demanda de muchas de nuestras frutas nacionales en todo el mundo, y en muchos casos requeridas deshidratados, este proyecto ha sido desarrollado con intención de contar con un equipo capaz de procesar un producto de alta calidad y al más mínimo costo, tanto en su fabricación y funcionamiento.

Para iniciar nuestro diseño se revisó una variedad de secadores solares y se determinó un modelo adecuado para nuestro objetivo. Este secador se modelo como un sistema en Matlab, sobre esto se planteó un controlador de lógica difusa del tipo mandani el cual podrá ser implementado ya sea en un microcontrolador y/o podrá ser comandado a través de un computador, el cual trabajará con entradas, del error (temperatura deseada menos temperatura real) y el cambio de error de la temperatura, y una salida de voltaje, el cual será amplificada a través de una circuito de potencia que controlara el suministro de calor hacia la cámara de secado mediante un resistencia eléctrica.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En esta nueva etapa de crecimiento económico continuo que está viviendo nuestro país se ha concebido la elaboración de este proyecto con el objetivo de permitir a muchos productores de frutas de nuestras 3 regiones, llegar no solo a vender sus productos como materia prima para la industrialización de estos, sino también como pequeños empresarios que puedan vender sus productos procesados a consumidores finales.

En este sentido se ha desarrollado este proyecto diseñando un sistema de control de temperatura de lógica difusa para el secado de frutas alimentado por energía solar y eléctrica basada en un modelo de un secador artesanal que permita ahorrar energía en lugares donde se pueda aprovechar la radiación solar para poder secar sus frutas.

El sistema se ha modelado con el software Matlab, el cual nos ha permitido apreciar el comportamiento del sistema expuesto a distintos tipos de condiciones ambientales y distintas demandas de funcionamiento de nuestro secador de frutas.

1.1 Antecedentes

Debido a la gran tendencia y la concientización de tener una buena alimentación en todo el mundo, con mayor intensidad y posibilidad de consumo en países desarrollados como Alemania, Japón, Austria, Estados Unidos entre otros, muchos de nuestros productos nacionales son exportados a estos países en diferentes presentaciones, siendo una de las requeridas las frutas deshidratadas, debido a que en este estado se pueden trasladar a grandes distancias y mantenerse comestibles por mucho más tiempo. Incluso muchos de nuestras frutas silvestres que hasta hace poco eran consumidos solo por ciertos sectores locales, ahora están siendo cultivadas en grandes cantidades como es el caso del aguaymanto, el membrillo, arandanos, la guayaba, el pepino, la guinda, el sauco, la tuna, entre otras, las cuales tienen una gran demanda tanto en el mercado nacional y extranjero, y por supuesto las frutas tradicionales como son la uva, el mango mandarina, plátanos, fresas, pasas, guindones, lúcuma, entre otros.

Según el Organismo Público Descentralizado Sierra Exportadora creado en 2006, y promperú nuestras exportaciones se han venido incrementando sustancialmente en estos

últimos años, así como también nuestro consumo interno en lo que se trata de frutas frescas, procesadas y secas (Ver anexo I).

1.2 Objetivo general

Diseñar un controlador de temperatura basado en lógica difusa para un secador de frutas solar-eléctrico tipo “armario”.

Objetivos específicos

Determinar los parámetros físicos de un horno secador solar y eléctrico.

Modelar el control de temperatura usando lógica difusa de un secador solar-eléctrico de frutas usando matlab.

Modelar el horno secador controlado por el controlador de lógica difusa.

1.3 Justificación

Debido al incremento del consumo de frutas secas en el mercado nacional e internacional y el elevado costo de los secadores industriales, lo cuales son muy difíciles de adquirir por los productores y pequeños empresarios (quiénes muchas veces los tienen

que secar por simple exposición al sol), es menester contar con un secador de frutas económico que le permita tener su producto listo en menor tiempo y con la óptima calidad.

1.4 Alcances

El proyecto consta del diseño de un controlador de temperatura usando lógica difusa en un secador tipo armario que podrá usar energía solar y eléctrica.

El sistema incluirá un sistema de suministro de energía solar-eléctrica, ventilación, sistemas de monitoreo con sensores de temperatura, humedad y velocidad de aire comandados por un controlador a través de un dispositivo de adquisición de datos, este último dará las condiciones necesarias para las cuales se lograra un secado óptimo de las frutas.

1.5 Descripción del producto final

Al finalizar proyecto se habrá conseguido modelar el control de temperatura en un secador de frutas solar-eléctrico, sin considerar la humedad relativa ni la velocidad de aire, a diferentes condiciones de temperaturas del ambiente, usando un control de temperatura basado en lógica difusa directo sin optimización proporcional derivativo.

1.6 Limitaciones

- ✓ Una de las limitaciones vendría a ser la poca energía disponible que podría tenerse en épocas de invierno en el cual el sol no es tan intenso.

- ✓ Otro de los problemas podría ser la implementación si es que no se cuenta con espacios suficientemente grandes para poder producir frutas secas en cantidades sustanciales

- ✓ Si es que se desea implementar un sistema scada, se tendría que hacer una mayor inversión, que incrementaría el costo final tanto del secador y de las frutas secas.

- ✓ El controlador que se está desarrollando está orientado a controlar la temperatura, mas no la velocidad de aire y la humedad relativa, que podrá formar parte de otro estudio.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA EN SECADORES DE FRUTAS

En el mercado es posible encontrar una variedad de secadores de frutas los cuales usan diferentes tipos de control, controladores del tipo on-off, controladores tipo P, PID, entre otros, los cuales han sido bastante usados en las últimas décadas. Pero también en estos últimos tiempos debido al gran incremento de los precios del combustible y al calentamiento global, se está recobrando el uso de sistemas de secado con energía renovable como es el caso de la energía solar, del cual existe una variedad de tipos, aunque no tienen un sistema de control de temperatura automatizada son bastante económicos y amigables con el medio ambiente, dentro de las cuales tenemos formas de secado directo, por estufas de aluminio con diseños especiales y otros que usan el efecto invernadero para calentar el aire y suministrar a un espacio donde se encuentra las frutas.

2.1 Presentación del modelo

El modelo de horno que se tomó en cuenta en el desarrollo de este proyecto consiste en una estructura de invernadero que cuenta con una lamina transparente que permite pasar los rayos del sol hacia una cámara acumuladora que tiene una placa negra en la parte inferior que retiene la energía incidente del sol, un apertura de ingreso de aire, una salida de aire caliente, el cual es trasladada naturalmente por diferencia de densidad hacia una cámara de secado donde se encuentran una serie de bandejas dispuestas de una manera que el aire caliente entre a toda la cámara de secado permitiendo que las frutas sequen de manera homogénea.

2.1.1 Descripción general del secador solar

El tipo de secador solar que se usara para el proyecto será el secador solar tipo “armario” que consta de 2 cámaras, una cámara como acumulador de energía por efecto invernadero y la otra como cámara de secado donde se encontraran las frutas.

El principio de funcionamiento se basa en que en el efecto invernadero; se tiene una cámara con una entrada de aire, una placa negra dentro de la cámara, una tapa transparente que permita pasar los rayos del sol y que incida en la placa negra y que

caliente el aire que se encuentre confinado dentro de esta cámara. Este aire caliente es trasladado naturalmente hacia el horno de secado, ya que la densidad del aire caliente es menor que en la cámara de secado, lo cual permitirá mantener un flujo de aire caliente por la cámara de acuerdo a la cantidad de energía acumulada en la cámara de invernadero.

La figura 2.1 muestra el esquema general que de este tipo de secador solar.

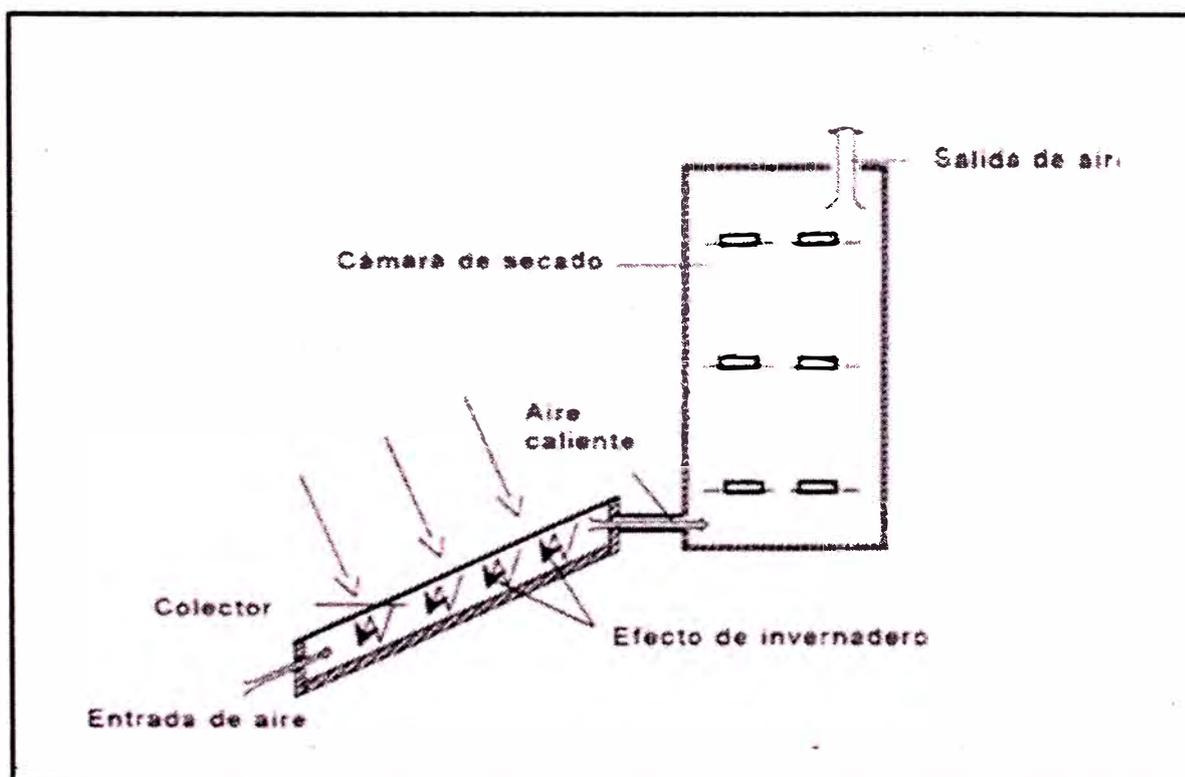
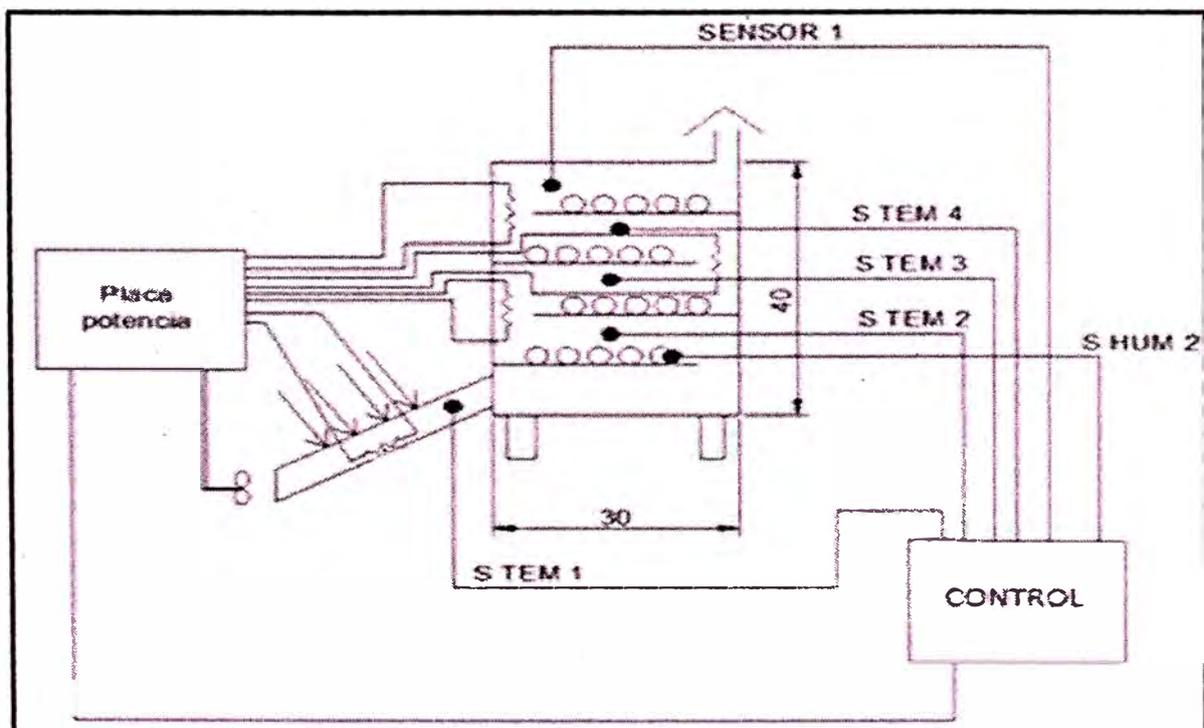


Figura 2.1: Esquema general del horno acumulador de energía.

2.2 Principio de funcionamiento y diagrama esquemático

Como se mencionó el sistema estará basado en un secador solar por efecto invernadero, al cual se le implementará una serie de fuentes de energía eléctrica adicional, lo que permitirá mantener la temperatura constante en la cámara de secado durante todo el proceso de secado, sin importar las variaciones de la temperatura del medio ambiente por cambios en el clima y las estaciones, así mismo el sistema tendrá un sistema de medición de la humedad dentro de la cámara y un monitoreo continuo del porcentaje de la deshidratación de la fruta.



El sistema constara de una serie de componentes, los cuales tendrán una función específica que detallamos en la siguiente.

Una cámara acumuladora de energía solar

Esta cámara estará compuesta de una placa negra en la parte inferior interna, el cual permitirá retener la mayor cantidad de energía solar que incida en ella, también tendrá una lámina transparente que permita pasar los rayos del sol y al mismo tiempo impedir fuga de aire caliente, para luego calentar el aire de la cámara por convección y permitir que el aire caliente pase a la cámara de secado por efecto de densidad.

Resistores eléctricos

Se instalara una serie de resistencias eléctricas tanto en la cámara de invernadero y la cámara de secado, para poder mantener proporcionar la energía adicional cuando la energía solar sea insuficiente y/o mantener una temperatura homogénea en todo el horno.

Cámara de secado

Este espacio será el recinto para las bandejas de frutas que se tendrán que secar, esta deberá de mantener una temperatura, y humedad homogénea, para garantizar la calidad del producto final.

Placa de Potencia

Este componente será encargada de proporcionar la energía adicional necesaria para mantener una temperatura homogénea en toda la cámara.

Sensores de temperatura

Según sea las dimensiones del horno a desarrollar se instalara una serie de sensores de temperatura, que permitan retroalimentar nuestro sistema.

Sensores de humedad

El sistema tendrá que tener un sensor de humedad dentro del horno de secado, ya que este elemento es muy importante para asegurar que las frutas dependiendo de su tipo, tengan un secado óptimo, ya que cada fruta en particular se deshidrata diferente a distintas condiciones de humedad, pero que en nuestro proyecto no se considerará ya que únicamente está orientado a controlar la temperatura.

Ventilador

En caso que la temperatura dentro del horno se exceda de la temperatura deseada sin usar las resistencias eléctricas o modificar la humedad y sea necesario incrementar la velocidad de aire de circulación, se podría encender el y de este modo mantener una temperatura adecuada dentro del horno, pero que en nuestro proyecto no se considerará ya que únicamente está orientado a controlar la temperatura.

Controlador de lógica difusa

Este componente será el encargado de controlar que la temperatura dentro de la cámara de secado, manteniendo una temperatura constante y/o homogénea durante todo el proceso de secado, dependiendo de fase del secado.

Estará basado en un controlador de lógica difusa tipo mandani de 25 reglas que garantizaran un óptimo control de la temperatura en todo el horno.

CAPÍTULO III

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO

3.1 Identificación del problema

Para poder realizar este proyecto fue menester determinar e identificar las necesidades de aquellos productores de frutas en el Perú que desean vender sus productos con un valor agregado, dentro de esto se pudo identificar que los compradores de frutas peruanas en el extranjero demandan mucha cantidad de estos productos en estado deshidratado, por lo cual nuestros productores no son capaces de proveer esta inmensa demanda, teniendo que vender a empresarios industriales quienes las deshidratan en sus plantas de secado. En este sentido se ha desarrollado este proyecto que consiste primeramente en el diseño del control de temperatura para un secador artesanal tipo armario.

3.1.1 Estado situacional encontrado

Para orientar nuestro proyecto se hizo un estudio de las condiciones actuales de los procesos de producción y exportación de nuestros productos nacionales en el mercado tanto interno como externo.

a. Historia de la oferta vs demanda

Hace unos años ciertos productos peruanos como el aguaymanto, los arandanos, el kiwi eran productos no muy conocidos por el mercado común, pero últimamente están siendo incluso exportados a países europeos, pero en muy poca cantidad, a pesar de solicitudes de exportaciones mayores, lamentablemente los solicitan en condición deshidratada y en grandes volúmenes, lo cual los exportadores peruanos no pueden abastecer a esos mercados tan exigentes a falta de tecnología, y si la encuentran son muy caros lo cual hace muy difícil obtenerlos dejando únicamente este proceso de deshidratado a los empresarios de gran poder adquisitivo ya que estos pueden comprar secadores industriales, lo que conlleva al incremento del precio (Ver Anexo I).

b. Proyección de la demanda.

En vista de la creciente demanda de frutas de nuestro Perú, y muchas veces en condición deshidratada, se considera necesario realizar un sistema de secado, con un bajo costo de fabricación, mantención y fuente de energía abundante como la energía solar, para permitir de esta manera a cada agricultor y/o horticultor de estos productos procesar por su propia cuenta sus frutas y hortalizas y así poder venderlos ellos mismos directamente a las grandes cadenas de supermercados tanto nacionales e internacionales y así obtener los mejores beneficios de su trabajo. En vista de esto, es que se está desarrollando este proyecto ya que este secador permitirá funcionar en su mayoría con una fuente de energía inagotable como es la energía solar.

3.1.2 Estado futuro deseado.

Se desea que en unos 3 años la producción de frutas secas, se esté exportando hacia Europa, América del Norte y Asia, sea unas 30 toneladas por año.

3.2 Planteamiento de la hipótesis de trabajo

El producto que se plantea en desarrollar es completamente viable técnica y financieramente, sostenido en que la demanda de las frutas nacionales mantiene una tendencia creciente, y con este producto se permitirá una competencia excelente en el mercado, ya que tanto la implementación, el costo del material y la fuente de energía son muy cómodos.

Por recomendación de la UNESCO, la temperatura de secado óptima de las frutas varían entre 40°C y 70°C , y es para este rango de temperatura que desarrollaremos e nuestro diseño (Ver Anexo II).

En la Figura 3.1 esbozamos las condiciones de temperatura que se espera tener dentro de la cámara de secado para un óptimo secado, para un determinado tipo de fruta, considerando un supuesto caso que una fruta requiera ser secado a una temperatura de 60°C , hasta conseguir un porcentaje de humedad de 15%.

En la primera etapa del proceso de secado necesitamos mantener la cámara de secado lo más pronto posible a una temperatura de 60°C e incluso un poco más, pasados unos minutos nuestro controlador deberá de ser capaz de mantener la temperatura de 60°C por un lapso de 6 a 8 horas dependiente del tamaño de las frutas, la velocidad del aire, y el porcentaje de humedad del ambiente, para luego finalmente comenzar a disminuir la

temperatura gradualmente en una proporción de $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por minuto hasta alcanzar la temperatura del medio ambiente.

Este proceso permitirá garantizar un proceso de secado sin pérdidas de las propiedades vitamínicas ni de la textura de las frutas.

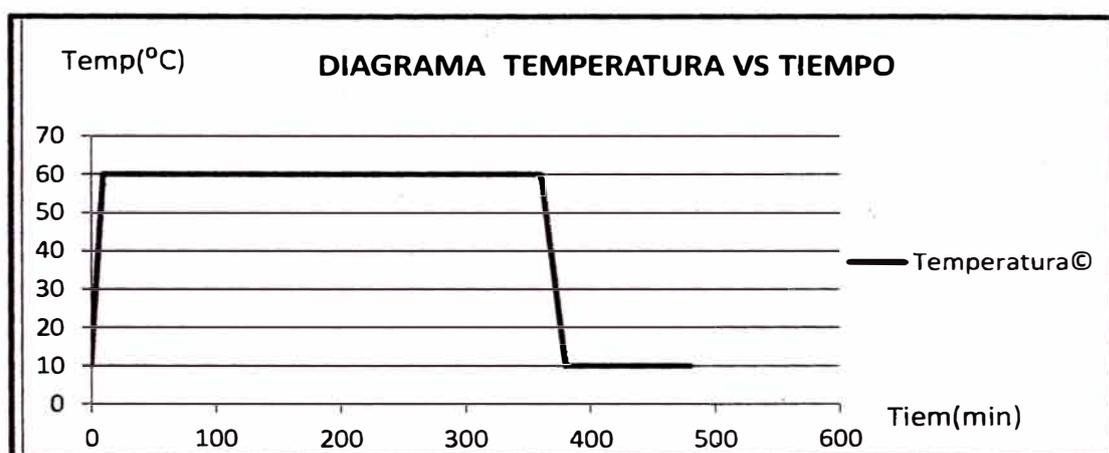


Figura 3.1: Diagrama de la temperatura vs tiempo

CAPÍTULO IV

MARCO TEORICO

Para llevar a cabo este proyecto se requiere tener conocimientos de algunos temas, tales como, tipos de secadores solares, el proceso de secado de frutas, los tipos de control de temperatura, los tipos y modelos de control de lógica difusa y amplificadores de potencia.

4.1 Secadores solares

Desde los tiempos antiguos el secado de plantas medicinales, granos, carnes, ha sido una práctica habitual de conservación en el campo para asegurar la disponibilidad de los productos alimenticios y medicinales durante todo el año. Ahora la deshidratación de los vegetales y carne no tiene solo la función de auto-abastecimiento como antes, sino que

ofrecen una alternativa productiva y comercial nacional e internacional. Ahora más que nunca existe una tendencia de comer sano por los habitantes de países desarrollados, teniendo una gran demanda por las frutas secas.

Para continuar nuestro proyecto es importante saber cuánta energía podríamos aprovechar de toda la radiación solar que el sol nos hace llegar. En primer lugar tenemos la "constante solar" que es la cantidad de radiación solar que llega a la parte alta de la atmosfera. Este dato se obtiene de calcular cuánto radia el sol en conjunto, y de este total, cual es la parte que llega a la tierra. Este dato también se mide desde hace tiempo (por medio de globos sonda y satélites artificiales), y en realidad no es "constante" pero varia tan poco que podemos considerar como si lo fuera. El valor de la constante solar es de 1366 w/m². En segundo lugar debemos saber que la radiación solar se difunde por la atmosfera terrestre, de forma que más o menos se absorbe la mitad por el aire. Las estimaciones de este efecto indican que, de la radiación total que llega a la parte alta de la atmosfera, solo la mitad consigue llegar al suelo. Es decir, tenemos unos 683 w/m² que llegan al suelo.

De estos 683 w/m², podemos confinarlo en ambientes especiales y elevar la temperatura de estos, de tal manera que podríamos aprovechar para poder secar diversos productos.

4.1.1 Tipos de secadores de frutas

Existe una variedad de formas de secar usando la energía inagotable del sol, desde los secados directos hasta módulos que permiten un mayor aprovechamiento de la energía solar, permitiendo un secado más rápido generando unas condiciones especiales dentro de las cámaras de secado que permitan un resultado mejor, con mejor textura, una buena apariencia, sin pérdidas de las propiedades de una fruta fresca, entre otras, las cuales detallamos.

a. Tipo ‘carpa’

Es una estructura de madera o metálica que en forma de una carpa triangular, cubierta de una gran lamina de plástico transparente resistente a los rayos ultravioletas, y una bandeja donde se puede colocar los productos a secar.

Tiene 2 aberturas cubiertas con una malla, que permiten ventilar la cámara de secado e impedir el ingreso de los insectos.

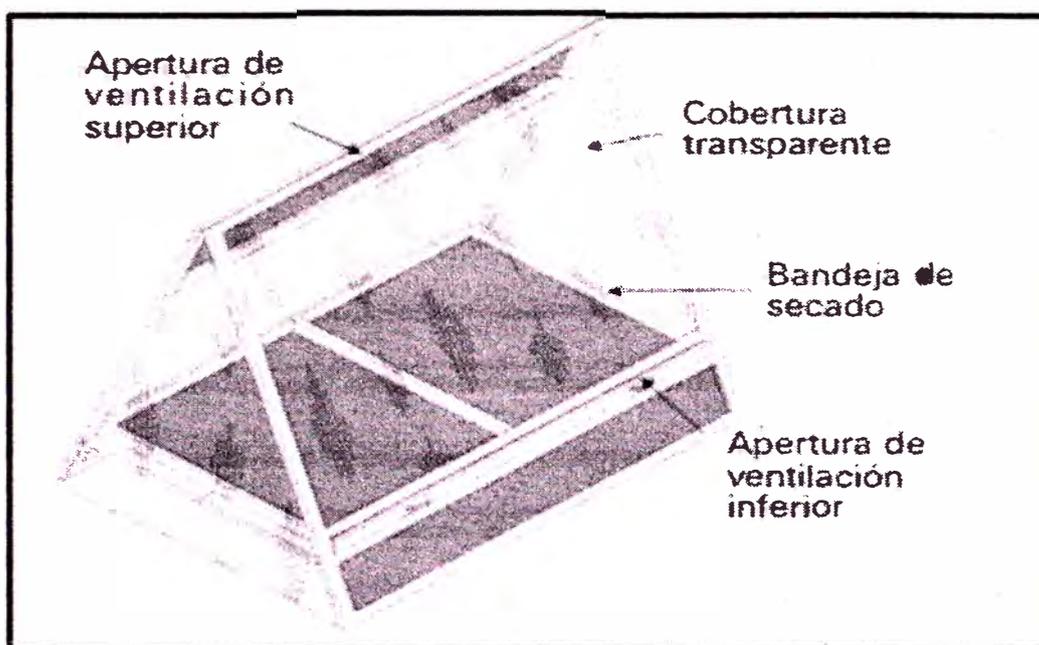


Figura 4.1: Secador solar tipo carpas.

b. Tipo 'armario'

Es un modelo que permite secar todo tipo de alimentos, especialmente aquellos que necesitan mantener un buen color, textura y las propiedades de la fruta seca.

Es una estructura que puede ser construida tanto en madera como metal, en forma de un armario, consiste en una cámara de secado y en un colector solar inclinado, unidos entre si en la parte inferior de la cámara de secado. En la cámara de secado se encuentra un conjunto de bandejas removibles, las cuales están protegidas por una puerta colocada en la parte posterior.

El colector está cubierta por un vidrio y tiene en su parte inferior una chapa de color negro doblada en zigzag, para incrementar su superficie de intercambio de calor con el aire. El aire del ambiente entra por la parte inferior del colector, que está cubierta por una malla que impida el ingreso de mosquitos, y se calienta hasta una temperatura de 30°C mayor a la temperatura del ambiente. Finalmente entra a la cámara ejerciendo su poder secador.

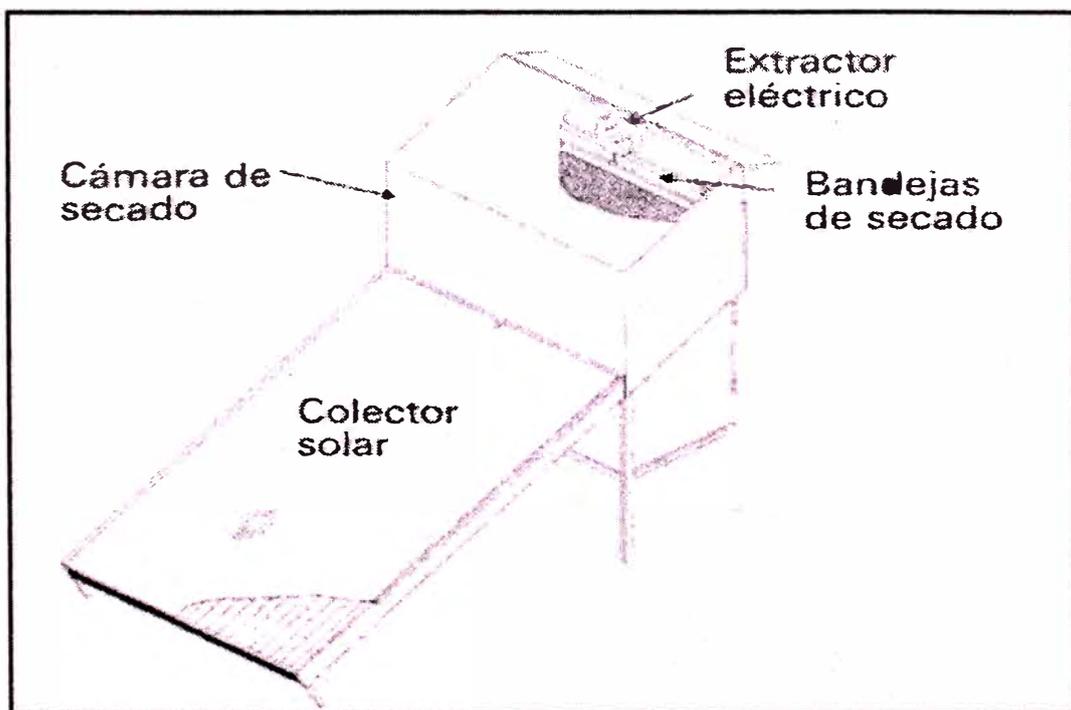


Figura 4.2: Secador solar tipo armario.

c. Tipo 'túnel'

Este modelo sirve para pequeños emprendimientos industriales. Consiste en un horizontal elevado con una base rígida de hierro y cobertura transparente de lámina de polietileno de larga duración, igual al modelo tipo carpa, el túnel está dividido en sectores alternantes de colector y secador.

El aire circula por todo el túnel a través de un ventilador eléctrico, los cajones son removibles y se pueden estirar lateralmente como los cajones de una cómoda, por la altura relativamente grande de las bandejas se pueden secar frutas relativamente grandes.

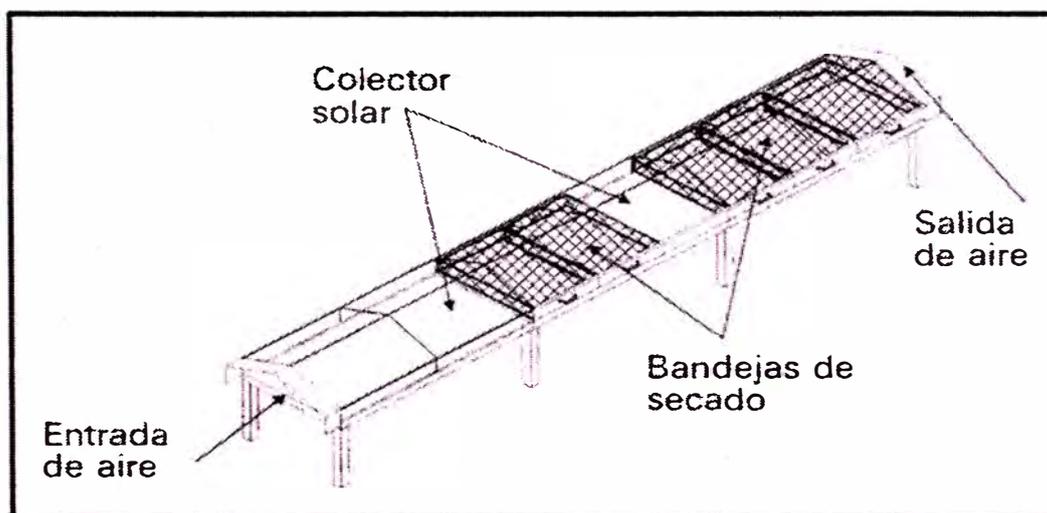


Figura 4.3: Secador solar tipo túnel.

4.1.2 Características físicas del secador solar a usar

Como el modelo de secador de frutas que usaremos es el del tipo ‘armario’, entonces el objeto de nuestro estudio en esta sección, se centrará en determinar las características de este secador tradicional, características tales como el material a usar en los diferentes componentes, la cantidad de energía que se puede acumular, entre otros.

a. Colector solar

La base y la parte lateral del acumulador será construido en madera ishpingo por ser un madera económicamente cómoda y bastante resistente a las inclemencias del tiempo y capaz de tener una resistencia suficiente de temperaturas inferiores a los 80⁰C sin presentar deformaciones, de dimensiones de 2mx1m y una profundidad de 0.2m, por donde circulara aire aproximadamente a 0.2m/s.

El absorbedor de energía será de hierro negro colocado en toda la superficie interna del colector solar en forma de zigzag, lo cual le permitirá tener una mayor superficie de intercambio de calor con el aire. Considerando que al menos se pueda aprovechar el 80% de los 1366w/m² que incidirá en la placa negra en un día con cielo

despejado entre las 10 a 16 horas, podríamos tener un poder calorífico de aproximadamente 2000w, para calentar el aire.

La cubierta podría ser de vidrio o de plástico, para nuestro estudio consideraremos una cubierta de polietileno LTD C/anti-uv, de 150 micrones.

b. Cámara de secado.

La cámara de secado será hecho también de madera ishpingo, con un ancho de 1m, alto 1m y de profundidad de 0.5 m. Tendrá una serie de canales donde irán las bandejas y una puerta en la parte trasera para poder ingresar las bandejas con frutas donde se estima que llegaran a temperaturas máximas de 70⁰C.

4.2 Deshidratación de frutas

La Buena deshidratación de las frutas depende de:

- El calor, la sequedad del aire y de su buena circulación.
- La selección correcta de frutas.
- El tratamiento previo para conservar el color de la fruta.

- Cuando las frutas están deshidratadas, se debe permitir que la fruta se condicione por cuatro a 10 días antes de empaquetarlas y almacenarlas.
- El almacenaje debe hacerse en envases firmemente sellados en un lugar fresco y seco.

a. Selección de frutas

Los criterios que se deben de seguirse a la hora de escoger la fruta que se va a deshidratar son los siguientes:

- Seleccionar frutas frescas y completamente maduras. Las frutas no maduras carecen de sabor y color; y las frutas muy maduras pueden volverse resistentes y fibrosas o muy suaves y pesadas.
- Lavar y limpiar las frutas para quitar la suciedad u otros residuos.
- Desechar cualquier fruta que demuestre pudrición, hongos, magulladuras o maltratada.

b. Pre-tratamiento de frutas

Las frutas se pueden secar con seguridad sin ningún tratamiento, pero los pre-tratamientos ayudan a que las frutas conserven color claro y brillante y prevén el oscurecimiento durante la deshidratación y almacenaje.

El pre-tratamiento consiste en sumergir básicamente en una solución de Ácido ascórbico, el cual previene el oscurecimiento u oxidación de las frutas.

c. Tratamiento post-deshidratación de frutas

Acondicionamiento

Cuando la deshidratación está completa, algunos pedazos estarán más secos que otros debido a la colocación durante el proceso. Es por eso importante la distribución uniforme de la humedad residual mínima a través de todos los pedazos de fruta. Esto reduce la producción de desperdicios, especialmente por hongos.

Acondicionamiento de la fruta deshidrata:

Colocar la fruta enfriada en bolsas de celofán.

Tapar y almacenar en un lugar tibio, seco y bien ventilado de 4 a diez días.

Si se forman partículas de la humedad adentro de las bolsas, la fruta se regresa a las bandejas de deshidratación para secado adicional.

La fruta se debe acondicionar por una semana antes de ser empaquetada.

Pasteurización

Este tratamiento permite quitar el exceso de humedad que se pudo haber reabsorbido durante el acondicionamiento.

Para llevar a cabo este procedimiento se recomienda recalentar las frutas a 65°C deshidratadas por 30 minutos. Luego sacar de la cámara de secado, enfriarlas rápidamente y empaquetarlas.

4.3 Fundamentos de la 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, procesamiento 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” y “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.

4.3.1 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.

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 una grado de pertenencia. Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso: para cada valor que puede tomar la variable x al función característica $\mu_{(A)}X$ proporciona el grado de pertenencia de ese valor x al conjunto difuso A , definido como:

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\} \dots \dots \dots (4.1)$$

Donde U es el universo de discurso continuo (por ejemplo, todos los números reales: $U = \mathbb{R}$).

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

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 4.4.

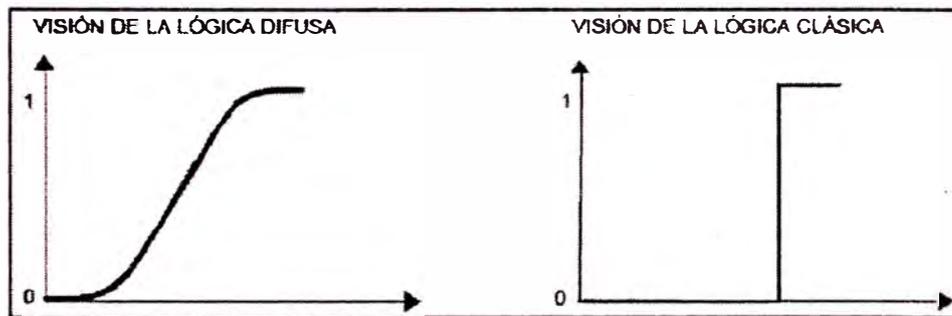


Figura 4.4: Lógica difusa vs lógica clásica.

Esta lógica permite tratar información imprecisa, como estatura alta, media o baja de una persona. Así, por ejemplo (Figura 4.5), 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, debidos a que las fronteras entre los conjuntos permitirían cambios graduales en la clasificación.

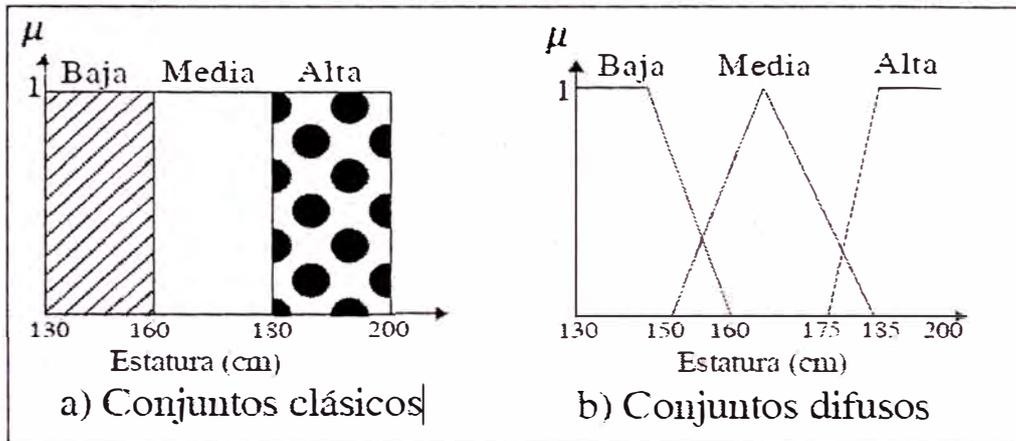


Figura 4.5: Conjuntos difusos para la variable estatura.

A continuación describiremos algunos conceptos importantes:

- ✓ Etiqueta. Nombre descriptivo usado para identificar un conjunto difuso.
- ✓ Variable lingüística. Es aquella 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.
- ✓ Universo de discurso. Rango de todos los valores posibles aplicados a una variable lingüística.

4.3.2 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 pertenencia de este valor de x al conjunto difuso A . La única condición que deben de cumplir es que $\mu_A(x) \in [0,1]$.

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:

- 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:

$$sop(x) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \dots\dots\dots (4.2)$$

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 $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ 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 sigmoïdal, pero las más utilizadas por su simplicidad matemática y operación son: triangular, forma de campana, monotónica y trapezoidal, como se muestra en la Figura 4.6.

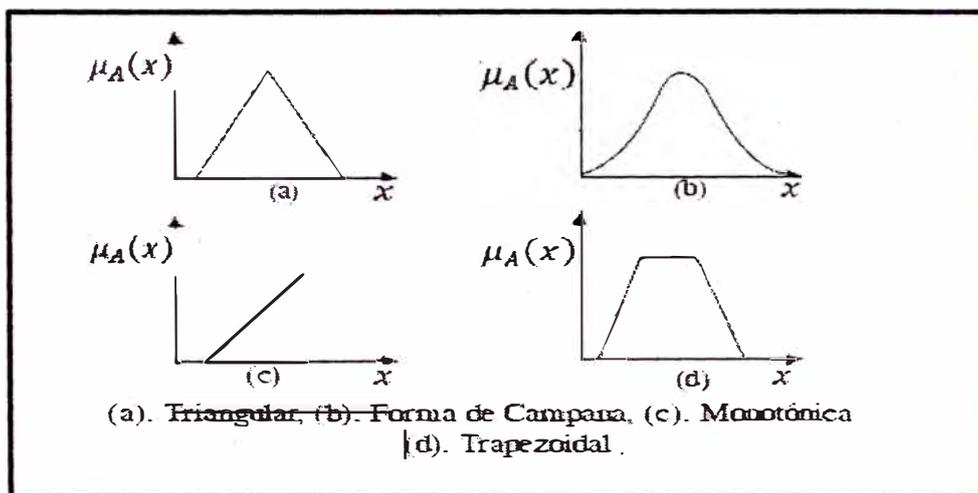


Figura 4.6: Funciones típicas de membresía.

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%.

4.3.3 Operaciones entre conjuntos difusos.

A los conjuntos difusos se les puede aplicar 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:

$$A \subset B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \dots \dots \dots (4.3)$$

Definición 2 (Unión): Para dos conjuntos difusos A y B sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$ 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 $A \cup B$ definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $\mu_{A \cup B}(x)$ dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \dots \dots \dots (4.4)$$

Definición 3 (Intersección): Para dos conjuntos difusos A y B definidos sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$, 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 $A \cap B$ definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia $\mu_{A \cap B}(x)$ dada por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \dots \dots \dots (4.5)$$

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 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:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \dots \dots \dots (4.6)$$

4.3.4 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 4.7, 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.

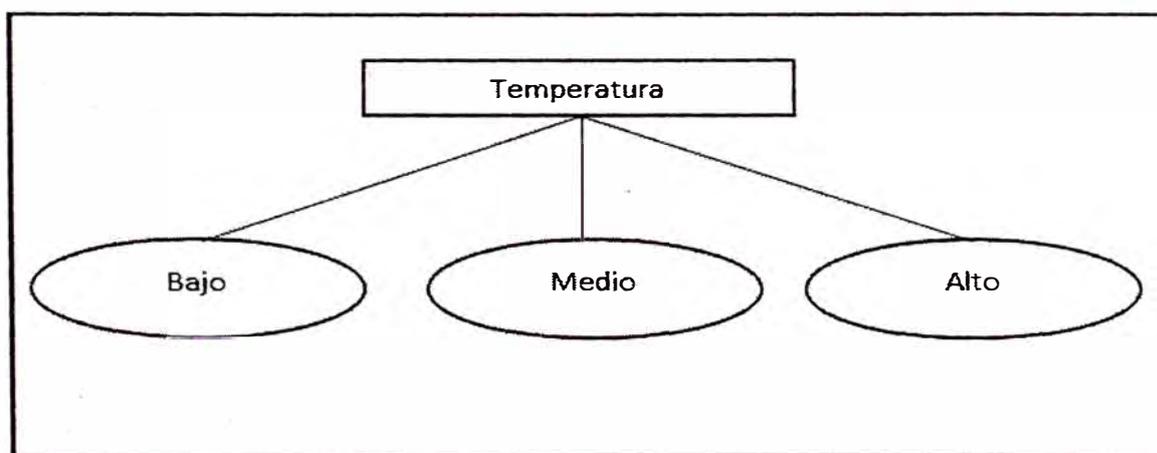


Figura 4.7: Variable lingüística

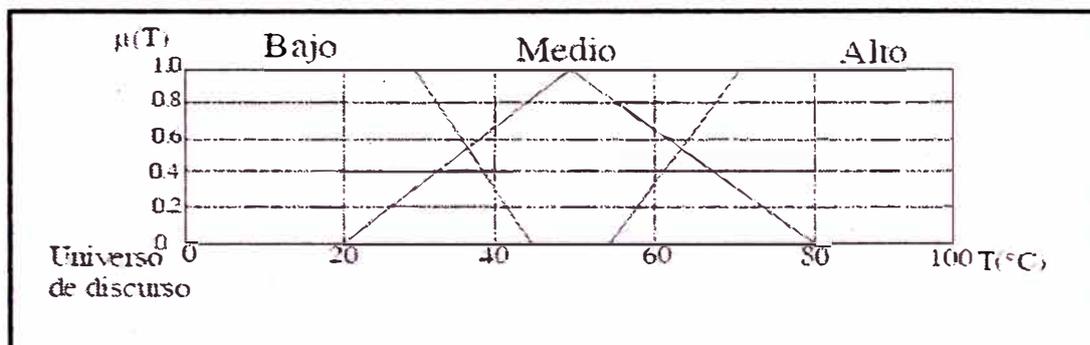


Figura 4.8: Variable fusificada

4.3.5 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.

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. Los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de datos de entrada y salida del proceso.

En los siguientes gráficos podemos apreciar las componentes de la base de conocimiento, los cuales son la base de datos y la base de reglas.

La base de datos podemos representar mediante una matriz, en el cual tendremos una apreciación clara de los variables lingüísticas de ingreso, lo cual nos permitirá crear la base de reglas para obtener nuestra salida.

En un sistema de control de temperatura podemos tener 2 entradas, una del error y otra la derivada del error con 3, 5, o más conjuntos difusos que se quieran usar, en el ejemplo se muestra una base de datos de 2 entradas y una salida con 3 conjuntos difusos cada 1.

Tabla 4-1: Matriz de base de datos y base de reglas.

T		Δe		
		P	C	N
e	P	A	A	A
	C	M	M	B
	N	B	B	B

Y por ejemplo con una base de reglas similar al que se detalla.

If e es P y Δe es N then voltaje es A.

4.3.6 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.

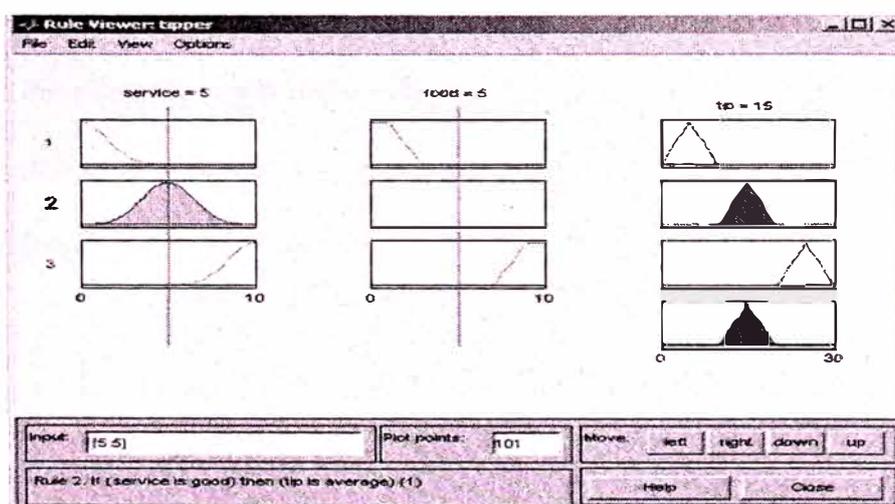


Figura 4.9. Proceso de Inferencia difusa.

En la Figura 4.9 se puede apreciar el resultado a partir de definir la base de datos, y la base de reglas la cuales a través de una inferencia permite tener como resultado un valor de nuestra variable lingüística.

4.3.7 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. La secuencia de cálculos que realiza el motor de inferencia se muestra en las siguientes figura (Figura 4.10 y 4.11).

- 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 A' , siendo éste la unión de los m conjuntos difusos mostrados en la siguiente ecuación:

$$\mu_{B'}(Y) = \mu_{B^1}(Y) + \dots + \mu_{B^m}(Y) \dots \dots \dots (4.7)$$

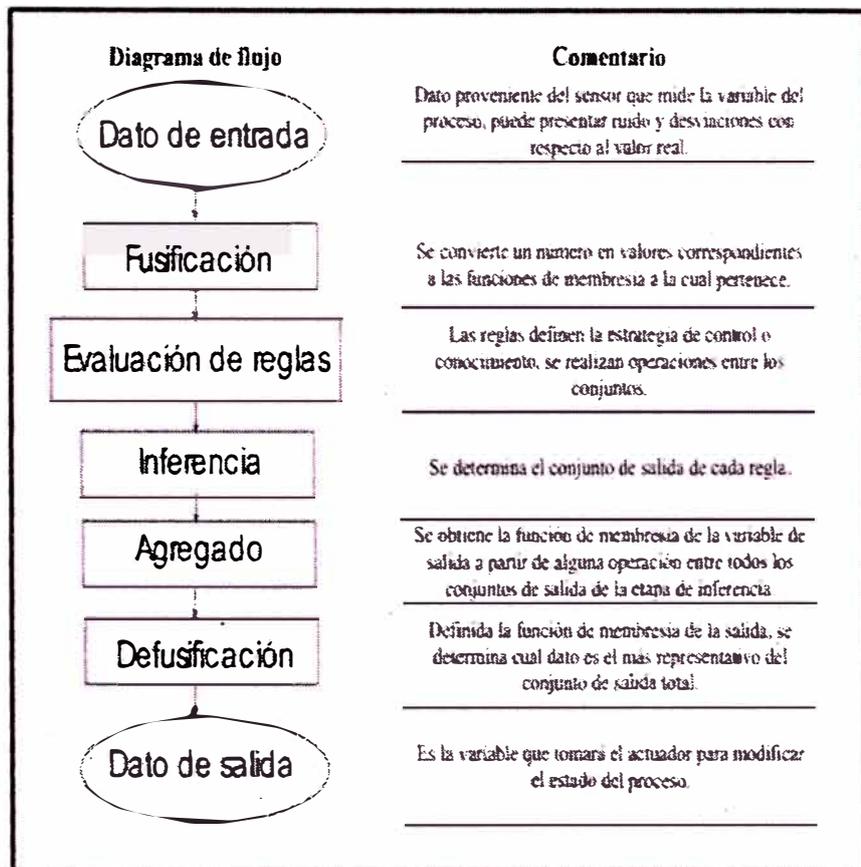


Figura 4.10: Máquina de inferencia difusa

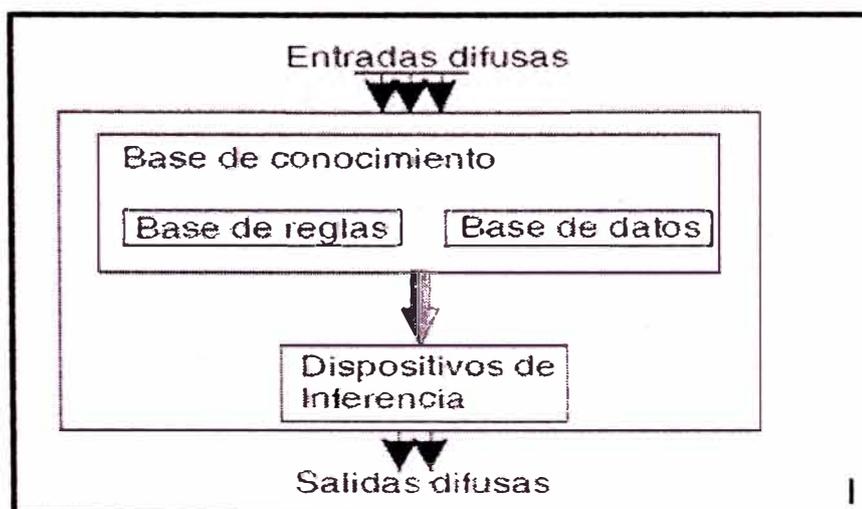


Figura 4.11. Máquina de inferencia difusa simplificada

4.3.8 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 $\mu_{B'}(Y)$.

- 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 siguiente ecuación, véase Figura 4.12.

$$\mu_{B'}(y^*) > \mu_{B'}(y) \dots \dots \dots (4.8)$$

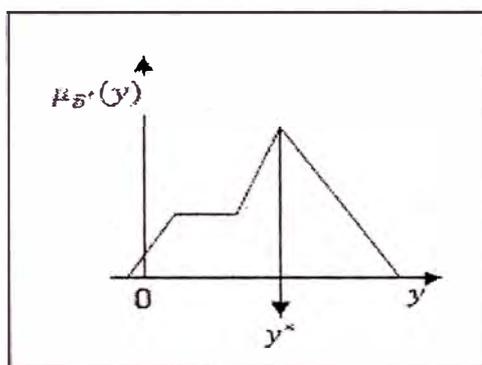


Figura 4.12: Método Max.

- Defusificación por el método del centroide o centro de área (CoG) (ecuación 4.9). Se calcula el centro de gravedad del área limitada por la curva de la función de membresía, véase Figura 4.13.

$$y^* = \frac{\int \mu_{B'}(y) \cdot y dy}{\int \mu_{B'}(y) dy} \dots\dots\dots (4.9)$$

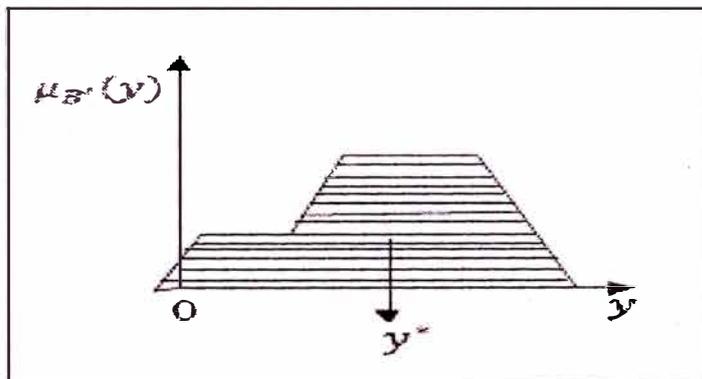


Figura 4.13: Método Centroide.

- Media de máximos (MoM). La salida está definida por la ecuación 4.10, en donde y es el valor medio de los puntos de máximo grado de pertenencia de la función de membresía.

$$y^* = \frac{\sum_i^n \bar{y}}{n} \dots\dots\dots (4.10)$$

Por ejemplo, en la Figura 4.12 la salida defusificada sería:

$$y^* = \frac{a+b}{2} \dots\dots\dots (4.11)$$

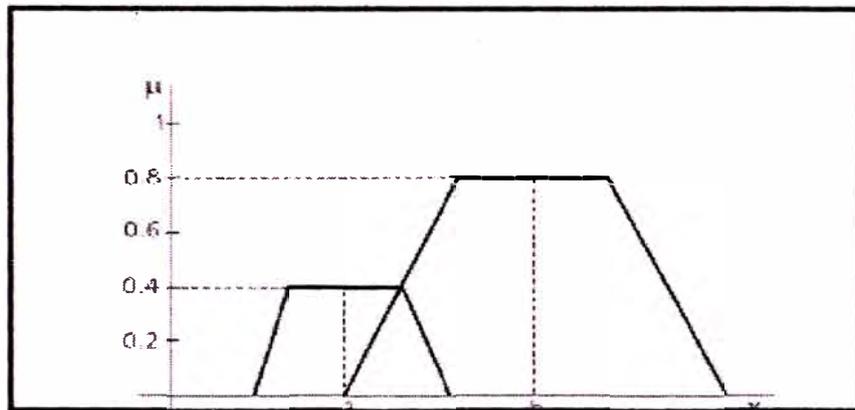


Figura 4.14: Media de máximos

4.4 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.

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 4.15) y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.

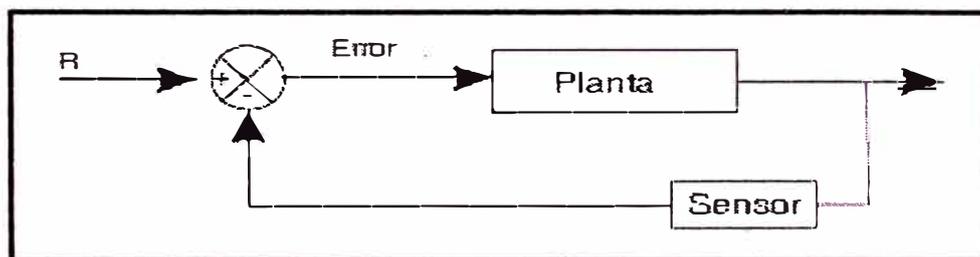


Figura 4.15: Lazo cerrado.

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.

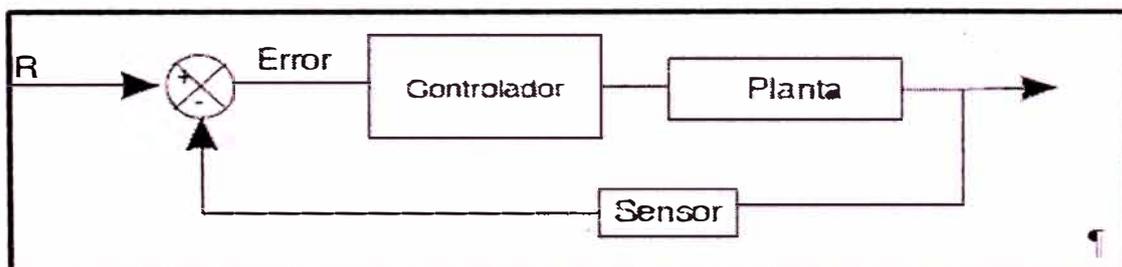


Figura 4.16: Lazo cerrado con controlador

Los controladores industriales 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).

4.4.1 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.

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 4.17, 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.

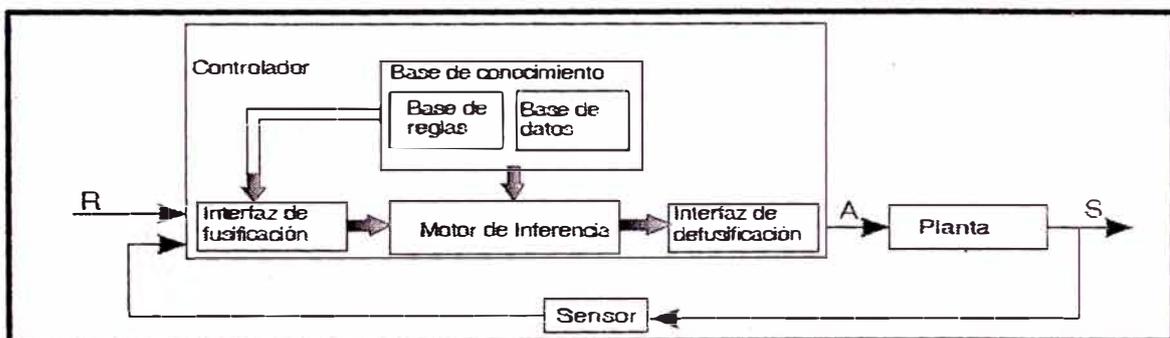


Figura 4.17: Controlador difuso

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

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

- 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:
 - 1) Controlador proporcional: $X = f(e)$
 - 2) Controlador integral: $X = f(s)$
 - 3) Proporcional-derivativo: $X = f(e, \Delta e)$
 - 4) Proporcional-integral: $X = f(e, s)$
 - 5) Con realimentación no lineal: $X = f(R, S)$

En las expresiones anteriores se denota con e el error, con Δe 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:
 - a) Controladores difusos auto-organizados.
 - b) Controladores difusos con auto-aprendizaje.
 - c) 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.

4.5 Transductores

Un transductor se define como el elemento que al someterlo a un cambio físico experimenta un cambio relacionado.

Dentro de la familia de los transductores, se encuentran los sensores. Los sensores se refieren a elementos que producen una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo, lo cual resulta de gran importancia para conocer magnitudes físicas o químicas.

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes e importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida, el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador.

- ✓ Los instrumentos para medir temperatura son los siguientes:
- ✓ Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).
- ✓ Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).
- ✓ Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).
- ✓ F.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
- ✓ Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación)
- ✓ Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas o frecuencia de resonancia de un cristal).

4.5.1 Termopar

Un termopar es un dispositivo para la medición de temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes. En uno de los extremos del cable, los dos metales están eléctricamente empalmados (corto circuito) ya sea mediante un trenzado o soldadura; precisamente esta terminación es la que se conecta térmicamente a la región a ser medida, por lo que recibe el nombre de unión caliente, cuya temperatura es mucho mayor que la del otro extremo, generando una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz, efecto *Seebeck*. El otro extremo, llamado unión fría es conectado a un dispositivo de medición (Figura 4.18).

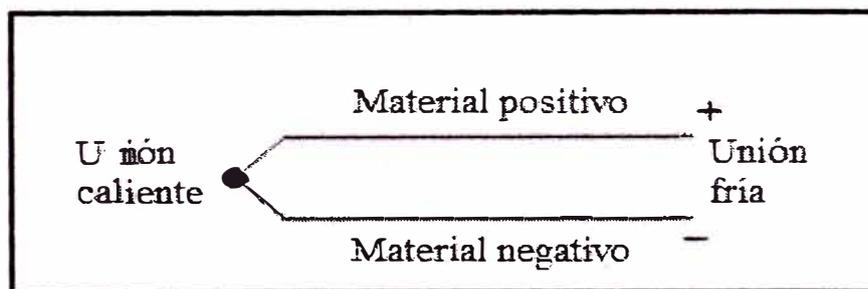


Figura 4.18: Diagrama termopar

El efecto *Seebeck* se presenta cuando existe una diferencia de temperatura entre las uniones fría y caliente, lo que provoca un flujo de calor y un flujo de electrones conocido como corriente Seebeck.

La fuerza electromotriz (*fem*) que genera la corriente se conoce como fuerza electromotriz de termopar tensión de Seebeck.

$$V_{seeback} = \alpha(T_{uc} - T_{uf}) \dots \dots \dots (4.12)$$

En donde:

T_{uc} : Temperatura de la unión caliente.

T_{uf} : Temperatura de la unión fría.

α : Coeficiente Seebeck.

$V_{seeback}$: Tensión o voltaje de Seebeck.

Es posible que la temperatura de la unión fría de un termopar no sea 0 °C, lo que provocará variaciones en la *fem*, debido a esto se recomienda mantener la unión fría de un termopar a 0 °C, es decir tenerlo inmerso en una mezcla de agua y hielo, técnica que resultaría impráctica. Se puede utilizar un circuito de compensación para producir una *fem* que varía con la temperatura de la unión fría, de manera que genere una *fem* que es la misma que se habría generado si la unión hubiese estado a 0 °C.

El valor de la tensión generada por el termopar depende de los metales utilizados y de las temperaturas, debido a esto a los termopares de uso común se les asignan letras de referencia.

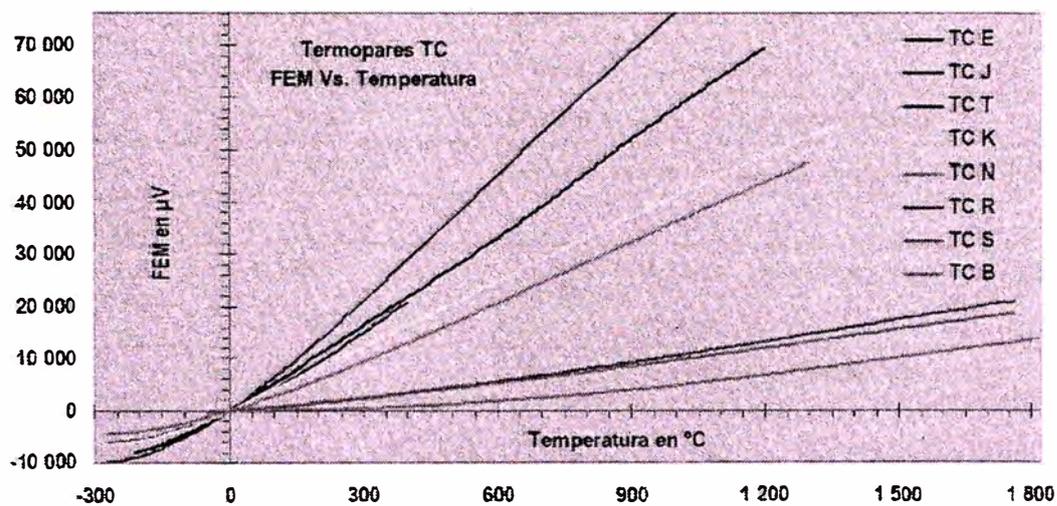


Figura 4.19 : FEM vs Temperatura.

Tabla 4-2: Tipos de termopares

Tipo	Rango de temperatura (°C)	Materiales y aleaciones (+) Vs. (-)
Metal-base		
E	-270 a 1000	Níquel-cromo Vs. Cobre-níquel
J	-210 a 1200	Hierro Vs. Cobre-níquel
T	-270 a 400	Cobre Vs. Cobre-níquel
K	-270 a 1372	Níquel-cromo Vs. Níquel-aluminio
N	-270 a 1300	Níquel-cromo-silicio Vs. Níquel-silicio-magnesio
Metal-noble		
R	-50 a 1768	Platino-13% rodio Vs. platino
S	-50 a 1768	Platino-10% rodio Vs. platino
B	0 a 1820	Platino-30% rodio Vs. Platino-6% rodio

En el proyecto usaremos termopares del tipo T, que es ideal para atmosferas húmedas, reductoras, oxidantes y de no tan altas temperaturas, con una sensibilidad de 43 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

4.6 Resistencias eléctricas

Los hornos industriales de resistencias son aquellos en que la energía requerida para su calentamiento es de tipo eléctrico y procede de la resistencia óhmica directa de las piezas o de resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor.

Si en un conductor circula electricidad, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido al choque que sufren los electrones con las moléculas del conductor por el que circulan elevando la temperatura del mismo; este efecto es conocido como efecto Joule en honor a su descubridor el físico británico James Prescott Joule.

Este efecto fue definido de la siguiente manera: "La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente". Matemáticamente:

$$Q = I^2Rt$$

Dónde:

Q = Energía calorífica producida por la corriente expresada en Joules

I = Intensidad de corriente que circula

R = Resistencia eléctrica del conductor

T = Tiempo

Así la potencia disipada por efecto Joule será:

$$P = RI^2$$

En la industria es mucho más frecuente el calentamiento indirecto por resistencias eléctricas. Dichas resistencias pueden ser:

1.- Barras, varillas, alambres o pletinas, dispuestos en las paredes de la cámara de calentamiento del horno, transmitiendo calor a las piezas por radiación.

2.- Paquetes de resistencias de los mismos materiales que transmiten el calor por convección al aire o gases, y de éstos, también por convección, a las piezas.

3.- Los mismos materiales, dispuestos en el interior de tubos radiantes, cuando la atmósfera interior del horno sea perjudicial para una vida razonable de las resistencias expuestas directamente.

4.- Resistencias blindadas dispuestas en el interior de fundas metálicas de pequeño diámetro con un material cerámico de llenado de las fundas metálicas. Se adquieren de fabricantes especializados y, normalmente, se aplican a temperaturas inferiores a las de las anteriores.

4.6.1 Resistencias Metálicas

Los materiales empleados para la fabricación de resistencias metálicas en hornos industriales se pueden clasificar en tres grandes grupos, Aleaciones de base Ni-Cr Aleaciones Fe-Cr-Al y Otros materiales empleados, sobre todo, en hornos de vacío de

alta temperatura, como molibdeno, tántalo y tungsteno. En este segmento solo se verá el grupo de aleaciones Ni-Cr.

Aleaciones de base Ni-Cr

Cuyas características principales se recogen en la Tabla 4-3. De todas ellas la más utilizada en resistencias de hornos eléctricos es la primera, 80 Ni-20 Cr; mientras que la segunda se ha desarrollado para una mayor resistencia a las atmósferas reductoras. La última aleación, 20 Ni-25 Cr, se utiliza muy frecuentemente en la fabricación de elementos mecánicos en el interior de los hornos, tanto a base de materiales laminados como de piezas fundidas.

Tabla 4-3: Características principales de aleaciones de base Ni-Cr

Aleación Ni-Cr	80-20	70-30	60-15	40-20	30-20	20-25
Composición aproximada:						
Ni %	80	70	60	37	30	20
Cr %	20	30	15	18	20	25
Fe %	<1	<1	20	40	45	50
Densidad kg/m ³	8.300	8.100	8.200	7.900	7.900	7.800
Temperatura de fusión °C	1.400	1.380	1.390	1.390	1.390	1.380
Temperatura máxima de utilización °C	1.200	1.250	1.150	1.100	1.100	1.050
Calor específico a 20 °C kJ/kg · K	0,45	0,45	0,45	0,46	0,50	0,50
Conductividad térmica W/mk a 20 °C	15	14	13	13	13	13
Coefficiente dilatación lineal 20-1.000 °C/°C ⁻¹	18	18	17	19	19	19
Resistencia a la rotura 20 °C N/mm ²	700	800	700	700	700	700
900 °C N/mm ²	100	100	100	120	120	120
Resistencia al creep 800 °C N/mm ²	15	15	15	20	20	20
1.000 °C N/mm ²	4	4	4	4	4	4

La temperatura máxima de utilización se refiere a la temperatura de las resistencias y no a la del interior del horno. La transmisión de calor de las resistencias a la carga, exige un gradiente de temperatura positivo, por lo que la temperatura de las resistencias puede ser excesivamente superior a la del horno. No es frecuente con estas aleaciones operar en el horno con temperaturas superiores a 1150-1175 °C, salvo que se instalen dispositivos para no sobrepasar en las resistencias la temperatura máxima de 1200 °C para la aleación 80 Ni-20 Cr.

La característica más importante de una aleación para resistencias es, evidentemente, la resistividad eléctrica que varía sensiblemente con la temperatura (Tabla 4-4).

Es útil el coeficiente de resistividad (factor multiplicador de la resistividad a 20 °C para obtener la resistividad a diferentes temperaturas). Puede apreciarse que dicho coeficiente es casi constante hasta 1200 °C para 80 Ni-20 Cr (variación 45 por 100) y 70 Ni-30 Cr (variación 5 por 100), mientras que llega a 32.6 por 100 para 20 Ni-25 Cr-50 Fe.

La potencia absorbida por las resistencias, cuando se les aplica una tensión constante, será muy superior a 20 °C que a 1000 °C para dicha aleación, y prácticamente constante para las dos primeras.

Tabla 4-3: Resistividad eléctrica de las aleaciones Ni-Cr

Aleación Ni-Cr	80-20	70-30	60-15	40-20	30-20	20-25
Resistividad eléctrica $\mu\Omega\text{cm}$						
20 °C	112	119	113	105	104	95
100 °C	113	120	114	108	107	99
200 °C	113	122	116	111	111	103
300 °C	114	123	118	114	114	107
400 °C	115	124	120	117	117	111
500 °C	116	125	122	120	120	115
600 °C	115	124	121	122	122	118
700 °C	114	124	121	124	124	120
800 °C	114	124	122	126	126	122
900 °C	114	124	123	128	128	124
1.000 °C	115	124	124	130	130	126
1.100 °C	116	125	125	132	132	126
1.200 °C	117	126	—	—	—	—
Cociente de resistividad						
20 °C	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,009	1,009	1,009	1,028	1,029	1,042
200 °C	1,009	1,025	1,027	1,057	1,067	1,084
300 °C	1,018	1,034	1,044	1,086	1,096	1,126
400 °C	1,027	1,042	1,062	1,114	1,125	1,168
500 °C	1,036	1,050	1,080	1,143	1,154	1,210
600 °C	1,027	1,042	1,071	1,162	1,173	1,242
700 °C	1,018	1,042	1,071	1,181	1,192	1,263
800 °C	1,018	1,042	1,080	1,200	1,211	1,284
900 °C	1,018	1,042	1,089	1,219	1,231	1,305
1.000 °C	1,027	1,042	1,097	1,238	1,250	1,326
1.100 °C	1,036	1,050	1,115	1,257	1,269	—
1.200 °C	1,045	1,050	—	—	—	—

Características particulares de cada aleación.

Austenítica de 80 Ni-20 Cr

Su temperatura máxima de utilización es 1200 °C. Tiene una gran resistencia a la oxidación en caliente y son muy buenas sus características mecánicas a temperaturas elevadas. Permite grandes variaciones de temperatura y de atmósfera, tanto oxidante como reductora, hasta temperaturas de 1150 °C. Sin embargo, no debe exponerse directamente a atmósferas fuertemente cementantes o que contengan azufre, plomo o cinc.

Austenítica de 70 Ni-30 Cr

Su temperatura máxima de utilización es 1200 °C. Es muy semejante a la anterior, pero es mucho mayor su resistencia a las atmósferas cementantes y a la corrosión del tipo «moho verde» entre las temperaturas críticas de 820 a 1030 °C. Es muy notable la estabilidad de la resistencia, tanto mecánica como eléctrica, a alta temperatura.

Austenítica de 60 Ni-15 Cr-25 Fe

Se recomienda para aplicaciones en las que la temperatura de la resistencia no sobrepase 900 °C, en atmósferas cementantes o reductoras. Sin embargo, es sensible a las atmósferas que contengan azufre, plomo o zinc, aunque soporta aceptablemente las atmósferas cementantes.

Se utiliza ampliamente en aparatos electrodomésticos y para terminales de resistencias de aleación 80 Ni-20 Cr.

Austenítica de 40 Ni-20 Cr-40 Fe

Es particularmente adaptada a las atmósferas reductoras cementantes que son nocivas a las aleaciones con mayor contenido de Ni. Puede también utilizarse en resistencias de arranque o de frenado de motores, así como en gran número de aparatos

electrodomésticos. Debe tenerse en cuenta el elevado coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura.

Austenítica de 30 Ni-20 Cr-50 Fe

Se utiliza en atmósferas sulfurosas nocivas para las de mayor contenido de níquel y en los aparatos electro-domésticos donde la temperatura de trabajo tiene poca importancia.

Austenítica de 20 Ni-25 Cr-55 Fe

Es particularmente ventajosa por su precio reducido en aplicaciones electrotérmicas de baja temperatura, aun-que debe evitarse la zona comprendida entre 700 y 800 °C. Se utiliza también en resistencias de arranque y reostatos de motores eléctricos. Soporta atmósferas ligeramente sulfurosas.

CAPÍTULO V

DISEÑO DEL CONTROL DIFUSO

En este capítulo se describe el diseño de todas las partes involucradas en el desarrollo del controlador difuso de temperatura con los objetivos planteados en la presentación, sin considerar el control de velocidad de aire y de humedad, los cuales podrían ser un estudio adicional para complementar el diseño integral del secador de frutas.

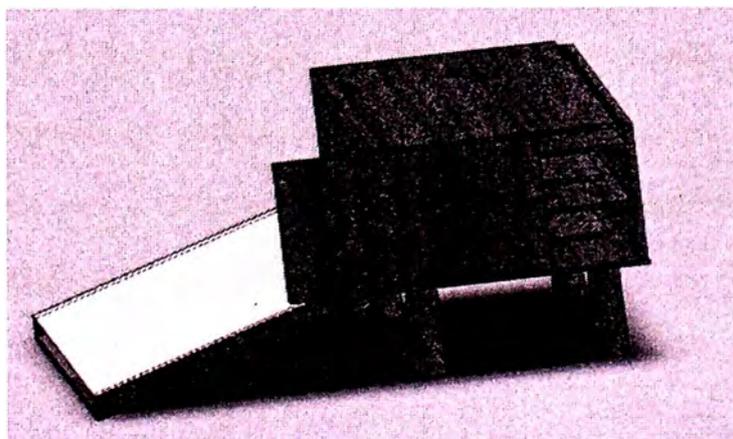


Figura 5.1: Modelo del secador en 3D

El modelo del secador de frutas en el cual se trabajará es el que posee dos cámaras, una acumuladora de energía y la otra de secado, el cual estará construido principalmente de madera, así mismo estará constituido por resistencias eléctricas que brinden la energía adicional a la del sol, ventiladores, paneles donde se depositaran las frutas. Este horno nos permitirá secar las frutas en días soleados con muy poco consumo de energía eléctrica, y en los días más fríos nos permitirán mantener siempre una temperatura adecuada para el secado de las frutas.

5.1 Modelamiento matemático del secador

El sol calienta el acumulador de energía por efecto invernadero proporcionando aire caliente con una temperatura variable de acuerdo a las condiciones del clima, los sensores de temperatura determinan la temperatura en cada parte del horno y envían la señal de retroalimentación al controlador de lógica difusa, quien desarrolla internamente las inferencias difusas arrojando un voltaje acorde a las entradas de error y la derivada del error; el cual es tomada por el amplificador de potencia para proporcionar la energía adicional necesaria mediante energía eléctrica.

Modelo matemático de la cámara de secado

El modelo matemático de una cámara de secado es obtenido del siguiente diagrama.

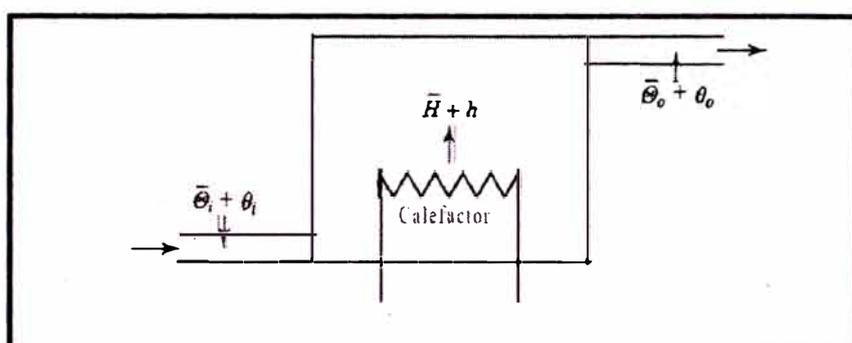


Figura 5.2: Diagrama esquemático del horno

Se considera que la pérdida de calor en las paredes es mínima en comparación con el calor involucrado en el secado de frutas.

Definimos las siguientes variables:

θ_i : Temperatura de entrada ($^{\circ}\text{C}$)

θ_o : Temperatura de salida ($^{\circ}\text{C}$)

c : Calor específico del aire ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)

C : Capacitancia térmica de la cámara ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$)

H : Flujo de calor de entrada (J/s)

G : Flujo de masa de aire a través de la cámara (m^3/s)

R : Resistencia Térmica ($^{\circ}\text{Cs}/\text{J}$)

La ecuación que define nuestro fenómeno físico sería el siguiente:

$$Cd\theta_i = [h + Gc(\theta_i - \theta_o)]dt \dots \dots \dots (5.1)$$

Considerando $Gc = \frac{1}{R}$

Obtenemos

$$RC \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o = Rh + \theta_i \dots \dots \dots (5.2)$$

Aplicando Laplace

$$\theta_o(s) = \frac{R}{RCs+1} H(s) + \frac{1}{RCs+1} \theta_i(s) \dots \dots \dots (5.3)$$

Mostrándose esta ecuación en el siguiente diagrama de bloques que nos permitirá hacer el modelamiento en matlab (Ver anexo III para valores de las constantes).

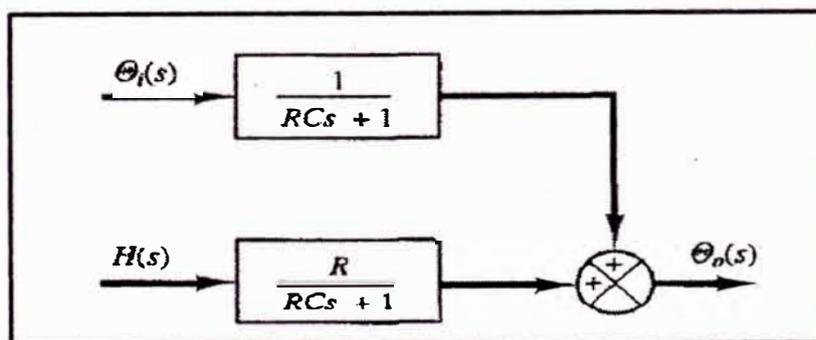


Figura 5.3: Diagrama de bloques del horno.

5.2 Diseño del sistema

Para el desarrollo del sistema de control de temperatura se obtienen sus parámetros de operación (temperatura máxima, tiempo que tarda en alcanzar la temperatura máxima, tiempo en enfriamiento) y se averigua la forma en que se va a manipular, tomando en cuenta todas las actividades que se encuentran en su conjunto integradas para obtener resultados que permitan la creación del sistema de control de temperatura, realizando las siguientes etapas.

Acondicionamiento de la señal del termopar o termistor

Conocimiento de las partes importantes, como son: la capacidad de las resistencias eléctricas, la estructura del horno para averiguar la localización óptima de los termopares para permitir una temperatura homogénea en toda la cámara de secado.

Caracterización del termopar tipo T o un termistor: conocer su rango de operación, relación voltaje temperatura y el error que presenta en la medición de temperatura.

Amplificar, filtrar y adaptar la señal del termopar para acoplarla a la tarjeta de control.

Módulo de disparo

Se diseñará un circuito de potencia capaz de manipular la energía que se le suministra al horno, utilizando un control de encendido apagado.

•

Se diseñará un circuito por medio de un microcontrolador, para activar el circuito de potencia.

Se programará un microcontrolador, que permitirá guardar la información de la salida del controlador difuso que activará y controlará el amplificador de potencia.

Implementación del control difuso

Del acondicionamiento de la señal del termopar, se obtendrá el error de la temperatura y el cambio de error utilizándolas como entradas al controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo y como salida del controlador difuso, se utilizará un nivel de voltaje, el cual será enviado al módulo de disparo.

Interfaz con el de usuario

Se integrará en el controlador de lógica difusa, una perrilla que a través de un potenciómetro regulará la temperatura deseada y en una pantalla de LCD se mostrara tanto la temperatura deseada y la que tenemos en el horno.

Pruebas

- Calibración del control difuso.
- Pruebas del sistema.

5.2.1 Módulo de disparo.

Para realizar la conexión de la carga eléctrica con la TAD, realizaremos un módulo de disparo implementado en hardware, el cual está integrado por:

- a. Detector de cruce por cero
- b. Microcontrolador ATmega48A
- c. Etapa de potencia

La corriente que se le suministra al horno, se regula mediante un control de encendido apagado, el cual es manejado por un microcontrolador, que recibe la señal del detector de cruce por cero y una señal proveniente del controlador difuso.

a. Detector de cruce por cero.

El detector de cruce por cero detecta los cambios de signo de la señal de voltaje de corriente alterna (CA).

En cada semiciclo negativo de la señal de CA envía pulsos de 0 y 5 voltios a una frecuencia de 60 Hz al microcontrolador ATmega48A, el cual los detecta en flanco de subida por medio de una interrupción.

En la Figura 5.4 se muestra la configuración del detector de cruce por cero, en él se puede observar un amplificador operacional con la configuración de comparador, se utilizará el LM358 ya que es compatible con niveles TTL (0 a 5V), que son los valores de voltaje que maneja el microcontrolador.

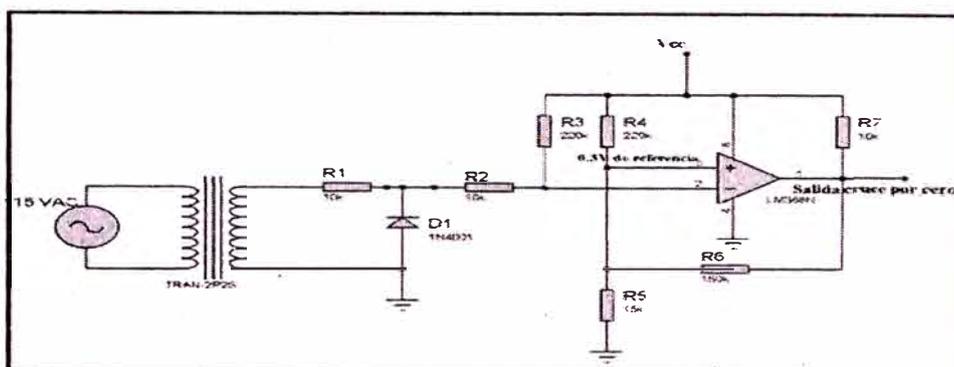


Figura 5.4: Detector de cruce por cero.

La Figura 5.5 muestra las formas de onda de entrada y salida del circuito detector de cruce por cero, la entrada es una onda senoidal medida a la salida del transformador de 6.36Vrms, cuando esta señal es menor que el voltaje de referencia 0.3V, el detector envía a la salida un voltaje positivo, de lo contrario envía 0V generando así una señal cuadrada de 3.32V a 60Hz.

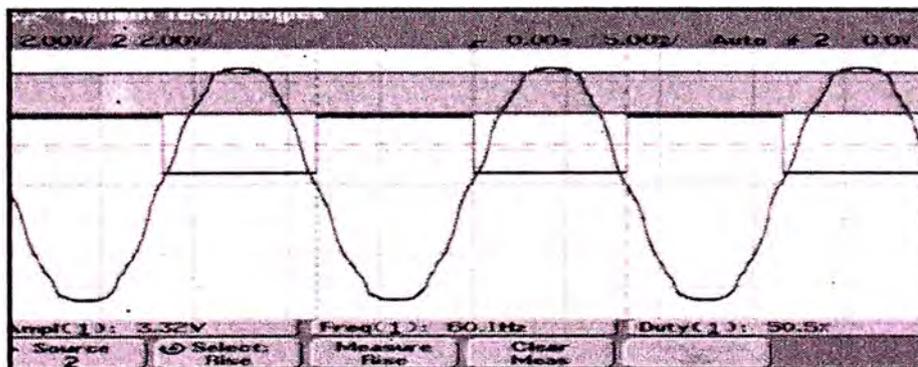


Figura 5.5: Ondas de salida.

b. Microcontrolador atmega48A-PU

El microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las instrucciones grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres unidades funcionales principales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada y salida. Su uso típico consiste en realizar funciones de “control” interactuando con el mundo real para monitorear condiciones, y en respuesta a ello enviar una señal de salida.

El uso de un microcontrolador reduce notablemente el número de componentes electrónicos, tamaño y en consecuencia disminuye la probabilidad de averías. Cada tipo de microcontrolador sirve para una serie de casos y es el diseñador del sistema quien debe decidir cuál es el microcontrolador más idóneo para cada uso. El microcontrolador PIC16F84 cumple con los requerimientos, pero se tiene mayor experiencia y dominio con los microcontroladores de Atmel. Se eligió el Atmega48A-PU de Atmel [URL10], debido a su bajo precio, facilidad de programación y a las características que a continuación se presentan:

- ✓ 32 registros de 8 bits.
- ✓ Frecuencia máxima de trabajo: 20MHz.
- ✓ Memoria de datos: 512 bytes de RAM y 256 bytes de EEPROM.

- ✓ Memoria de código: 4 Kbytes de memoria flash.
- ✓ Terminales de entrada/salida: 23.
- ✓ Canales de conversión analógico/digital: 6 de 10 bits.
- ✓ Canales PWM: 6.
- ✓ Temporizadores: 2 de 8 bits y 1 de 16 bits.
- ✓ Interrupciones externas: 2.

El microcontrolador se utilizó para realizar el control por encendido apagado, controlado por un nivel de voltaje, proveniente del controlador difuso. A continuación se muestra un diagrama a bloques (Figura 5.6) en el que se muestra la secuencia del programa que realizó el microcontrolador.

Las interrupciones constituyen el mecanismo más importante para la conexión del microcontrolador con el exterior ya que sincronizan la ejecución de programas con los valores externos, como en este caso la detección de pulsos externos. El microcontrolador recibe los pulsos del detector de cruce por cero a través de la interrupción externa INT1 (Figura 5.7), configurada por flanco de subida, con base en cada interrupción un contador cuenta los ciclos.

También se activa una interrupción por coincidencia por comparación para el ADC (ADC0), éste recibe una entrada de voltaje en un rango de 0 a 5 volts proveniente de

la TAD, que es la señal del controlador difuso; el voltaje es digitalizado de la siguiente manera:

$$ADCW = \frac{V_{in} * 1024}{V_{ref}} \dots \dots \dots (5.4)$$

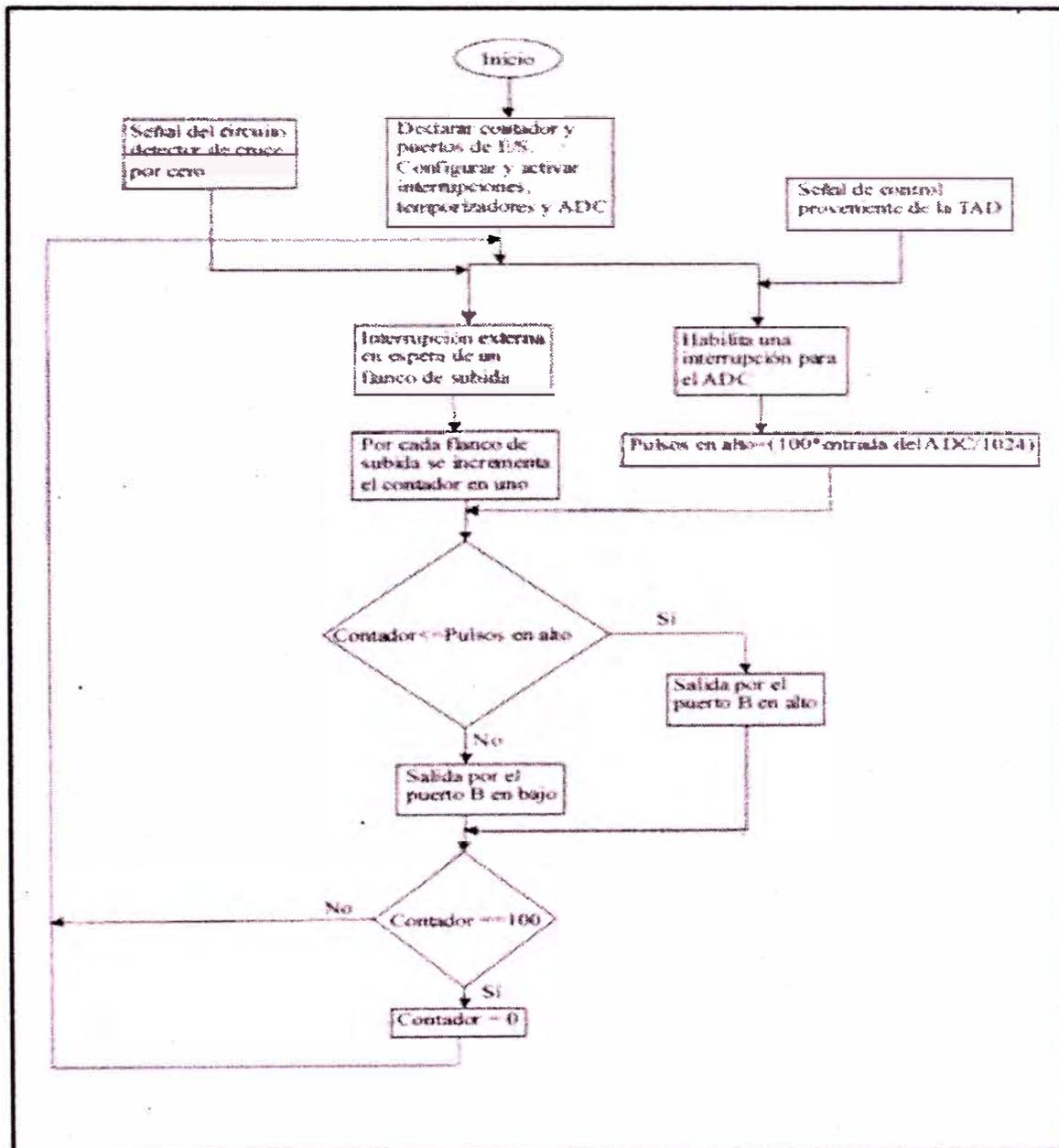


Figura 5.6: Diagrama de flujo.

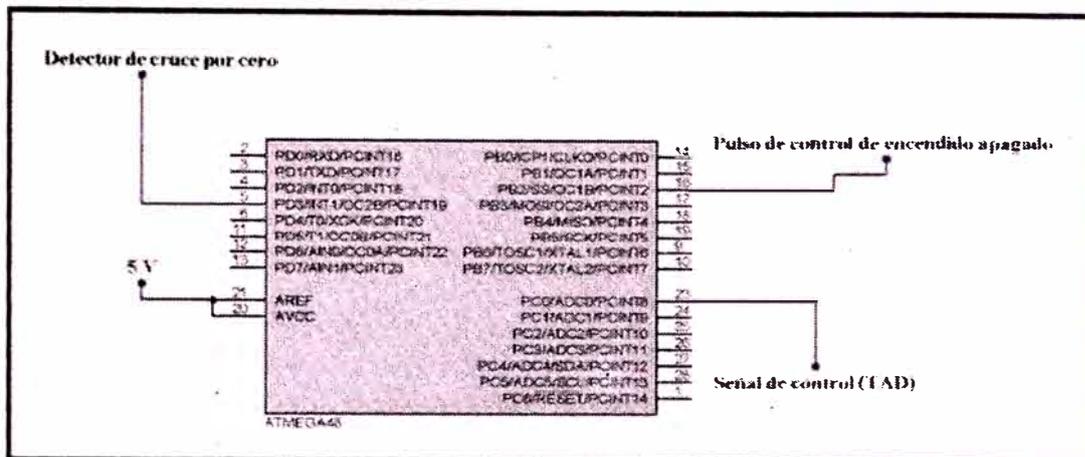


Figura 5.7: Conexión del Atmega43A-PU

c. Etapa de potencia

El microcontrolador envía una señal de control al circuito de potencia, éste permite que el horno se encienda y apague por un determinado tiempo, a través de un Triac (dispositivo de potencia). Para realizar esto, se requiere tener una protección y una conexión entre ambas etapas (la digital y la de potencia), por lo que se utilizó un optocoplador MOC3031 [URL11], este dispositivo realiza un acoplamiento óptico y un aislamiento eléctrico, mediante un diodo emisor infrarrojo, ópticamente acoplado a un detector monolítico (fototriac), desempeñando la función de un circuito interno de cruce por cero que conmuta al Triac sólo, cuando el diodo está energizado y en los cruces por cero de la señal de CA que nos proporciona CFE.

El circuito de potencia (Figura 5.8) recibe un pulso de control proveniente del microcontrolador, cuando el pulso se encuentra en un nivel alto (5V), hará circular una corriente por el diodo emisor infrarrojo, lo que provocará que el fototriac entre en conducción en el siguiente cruce por cero de tensión de la red eléctrica. Cuando esto sucede se comporta como un interruptor cerrado enviando corriente a la entrada G (gate) del Triac NTE5695 [URL4] a su vez éste envía corriente al horno eléctrico encendiéndolo. Es importante mencionar que se debe instalar un disipador y un ventilador que está removiendo el calor generado por el Triac ya que maneja potencias medias por un periodo largo de tiempo, y esto puede repercutir en su funcionamiento.

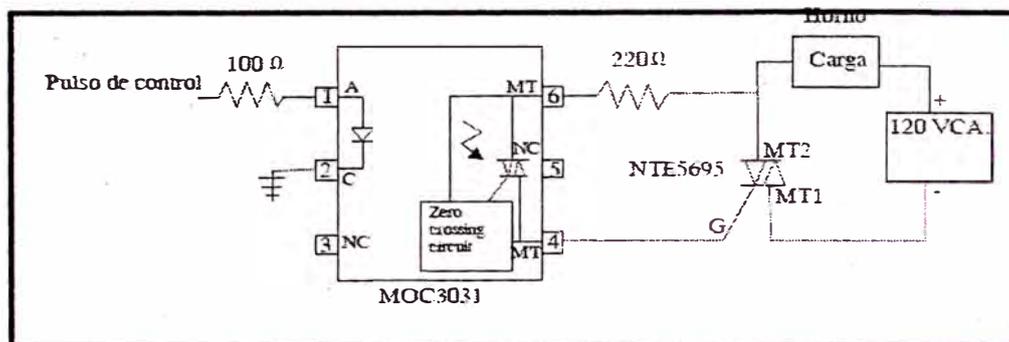


Figura 5.8: Circuito de potencia.

5.2.2 Diseño del Controlador

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.

Por lo general se recomiendan los siguientes pasos en el diseño de un controlador difuso:

1. Identificar las variables de entrada y salida del sistema.
2. Un modelo lingüístico puede ser creado con base en el conocimiento de un humano experto.
3. 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).
4. Asignar funciones de pertenencia para cada conjunto difuso.
5. Asignar una relación entre las entradas y las salidas, formando una base de reglas.
6. Determinar un método de defusificación.

Considerando lo anterior, diseñaremos nuestro controlador difuso. Primero definiremos las variables de entrada y salida de nuestro controlador.

Se utilizaran dos variables de entrada, la primera es el error que se refiere a la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura de referencia (deseada), como a continuación se muestra:

$$\text{error} = e = \text{temperatura deseada} - \text{temperatura medida}$$

La segunda variable de entrada es el cambio del error, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$\text{cambio del error} = \Delta e = \text{error actual} - \text{error anterior}$$

Se eligieron estas variables de entrada debido a que la variable e cuantifica que tan lejos o cerca se encuentra la temperatura de la referencia y la variable Δe cuantifica que tan rápido o lento cambia la temperatura. Como variable de salida del controlador se toma el voltaje en un rango de 0 a 5 volts, debido a que es el rango de salida de la mayoría de tarjetas electrónicas es de 0 a 5v.

El controlador está constituido, como se muestra en la figura 5.9, este controlador es difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo, debido al tipo de preprocesado de sus entradas.

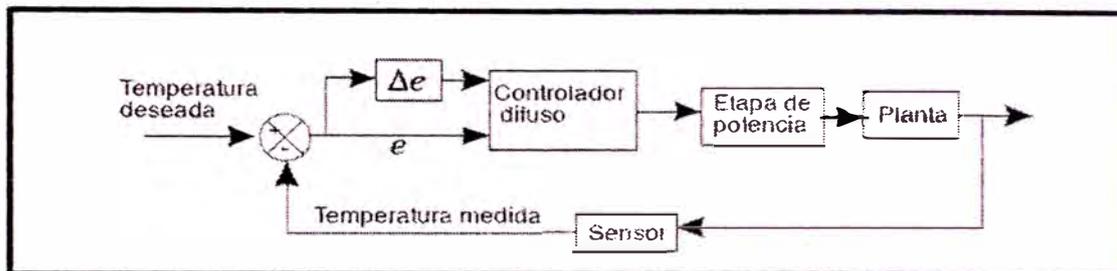


Figura 5.9: Controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo

Se utilizó la herramienta (TOOLBOX) difusa de matlab para diseñar el controlador difuso, en el que se definen las entradas, salidas, funciones de pertenencia, base de reglas, dispositivo de inferencia y método de defusificación. Toda esta información es guardada en un archivo para posteriormente cargarlo en el controlador difuso.

a. Fusificación y diseño de las funciones de membresía

Una vez que tenemos definidas nuestras variables de entrada y salida, proseguimos a defusificarlas para que el controlador las pueda procesar.

Definimos el universo de discurso sobre el que se definen nuestras variables y después las particionamos en conjuntos difusos caracterizados por funciones de membresía; por lo que nuestras variables de entrada y salida serán llamadas variables lingüísticas.

Variable lingüística error

Para nuestra variable lingüística “error (e)” definimos un universo de discurso en el rango de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido a que se estima que nuestra temperatura no podría ser superior a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ mayor que la temperatura deseada y tampoco menor a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ que la temperatura deseada una vez que haya alcanzado o superado la temperatura deseada. Para lo cual lo dividiremos en 5 conjuntos difusos con su respectivo rango, como se muestra en la Tabla 5-1 y en la Figura 5.10.

Los rangos se determinaron de este modo, de tal manera que se si el error es muy grande, ya sea positivo o negativo, nuestro controlador debería determinar si es necesario alimentar o quitar energía calorífica de una manera más acelerada y si el error de temperatura es mínimo y alrededor de cero, nuestra variación de suministro o disminución de energía calorífica debería de ser más aguda, lo cual permitirá tener un mejor control y llegar a la temperatura deseada.

Variable lingüística variación del error

Para nuestra variable lingüística “error (Δe)” definimos un universo de discurso en el rango de -3.5 a 3.5 , debido q a que la variación de error no podría ser superior a los $3.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ni disminuir tan abruptamente disminuyendo la temperatura mayor a $3.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, para

lo cual lo dividiremos en 5 conjuntos difusos con su respectivo rango, como se muestra en la Tabla 5-2 y en la Figura 5.11.

Tabla 5-1: Rango del error.

CONJUNTO DIFUSO	DESCRIPCION	RANGO
NG	Error negativo grande	-30 a -5
NP	Error negativo pequeño	-10 a 0
C	Error cero	-5 a 5
PP	Error positivo pequeño	0 a 10
PG	Error positivo grande	5 a 30

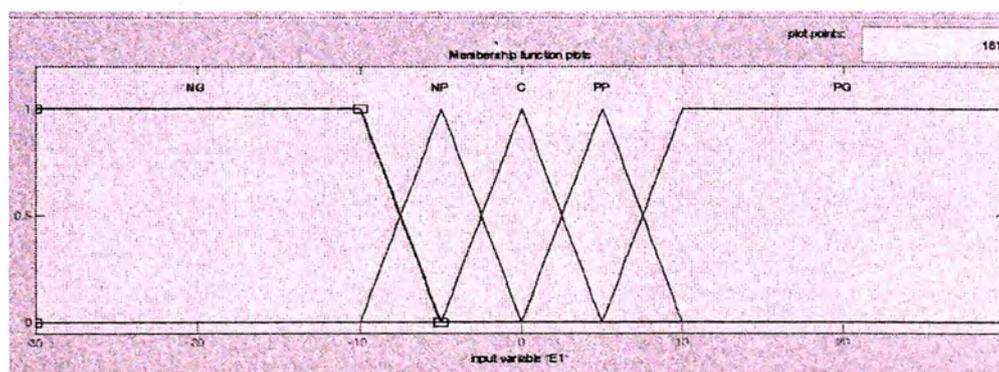


Figura 5.10: Funciones de pertenencia del error.

Del mismo modo que el rango de pertenencia de nuestros conjunto difusos del error, la variable de variación del error en conjunto con la variable error, permitirá al

controlador si tiene como variación del error un valor relativamente grande disminuir o aumentar la temperatura en una proporción mayor que si la variación del error es cercana a cero.

Tabla 5-2: Rango de la derivada del error.

CONJUNTO DIFUSO	DESCRIPCION	RANGO
NG	Error negativo grande	-3.5 a -0.25
NP	Error negativo pequeño	-0.5 a 0
C	Error cero	-0.25 a 0.25
PP	Error positivo pequeño	0 a 0.5
PG	Error positivo grande	0.25 a 3.5

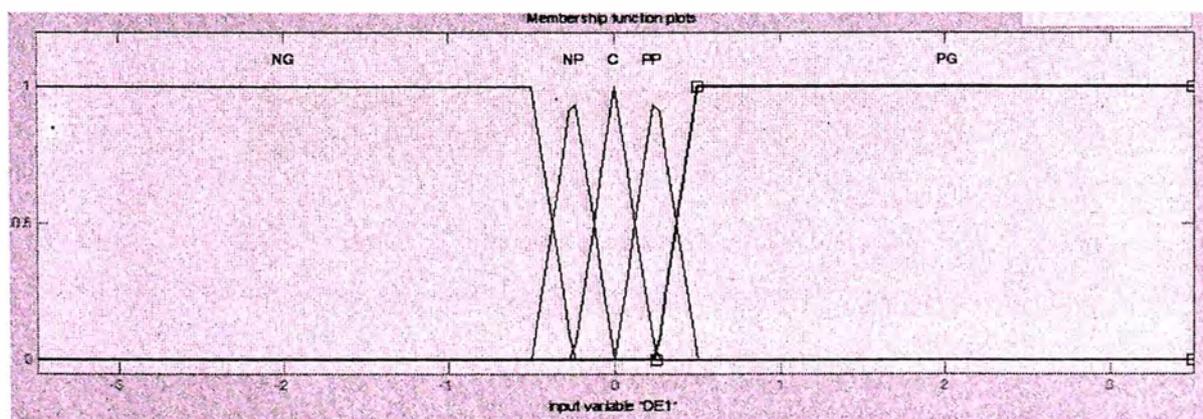


Figura 5.11: Funciones de pertenencia de la variable del error

Como se observa en la Figura 5.10 y Figura 5.11, los conjuntos difusos PP, C y NP están caracterizados por funciones de pertenencia tipo triangular y los conjuntos difusos PG y NG están caracterizados por funciones tipo trapezoidal.

Variable lingüística Voltaje

Para nuestra variable lingüística “voltaje (V)” definimos un universo de discurso en el rango de 0 a 5, debido a que el voltaje de salida de nuestra tarjeta electrónica tendrá una salida de voltaje de 0 a 5 volts. Para lo cual se dividió el universo de discurso en 5 conjuntos difusos con su respectivo rango, permitiendo tener una salida de voltaje alta si la temperatura no está cercana a la deseada y si es cercana tendremos un aumento o disminución del voltaje de salida con una variación muy pequeña.

El universo de discurso de la variable salida se muestra en la tabla 5.3 y en la figura 5.12.

Tabla 5-3: Rango de la salida.

CONJUNTO DIFUSO	DESCRIPCION	RANGO
MB	Voltaje muy bajo	0 a 1.25
B	Voltaje bajo	0.1 a 2.5
M	Voltaje medio	1.25 a 3.75
MA	Voltaje mediana alto	2.5 a 4.9
A	Voltaje alto	3.75 a 5

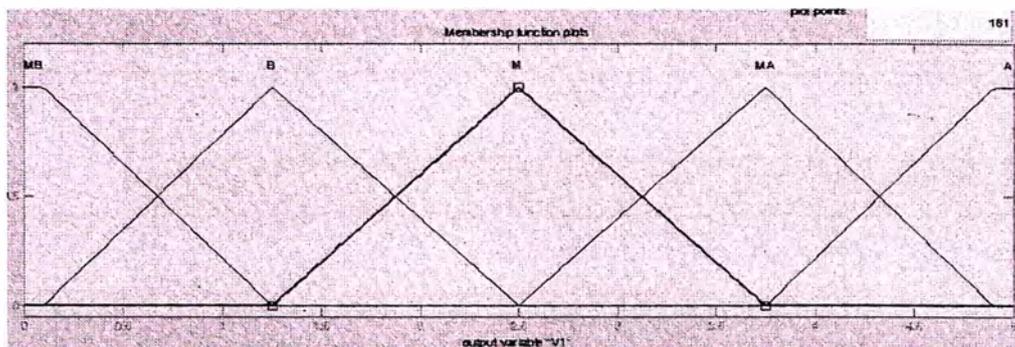


Figura 5.12: Funciones de pertenencia de la salida

b. 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 un valor de salida.

La base de reglas siguió el formato tipo Mamdani, donde en nuestro controlador se conformaría de la siguiente manera, por ejemplo:

If e es NG y Δe es NG then voltaje es MB.

Para expresar las 25 reglas de una forma más simplificada, se agruparon en una matriz de reglas (Tabla 5.4).

Tabla 5-4: FAM del controlador difuso de temperatura.

		Δe				
		PG	PP	C	NP	NG
e	PG	A	A	A	A	A
	PP	A	A	MA	MA	M
	C	MA	M	M	M	MB
	NP	M	B	B	MB	MB
	NG	B	MB	MB	MB	MB

El dispositivo de inferencia utilizado fue el de Max-min, el cual interpreta las reglas del tipo If then con el formato de reglas tipo Mamdani de la siguiente manera:

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

$$\mu_{B^k}(y) = \max^k [\min [\mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2)]] \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{ec.16})$$

La ecuación 16 toma el valor mínimo de pertenencia 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, véase Figura 5.13.

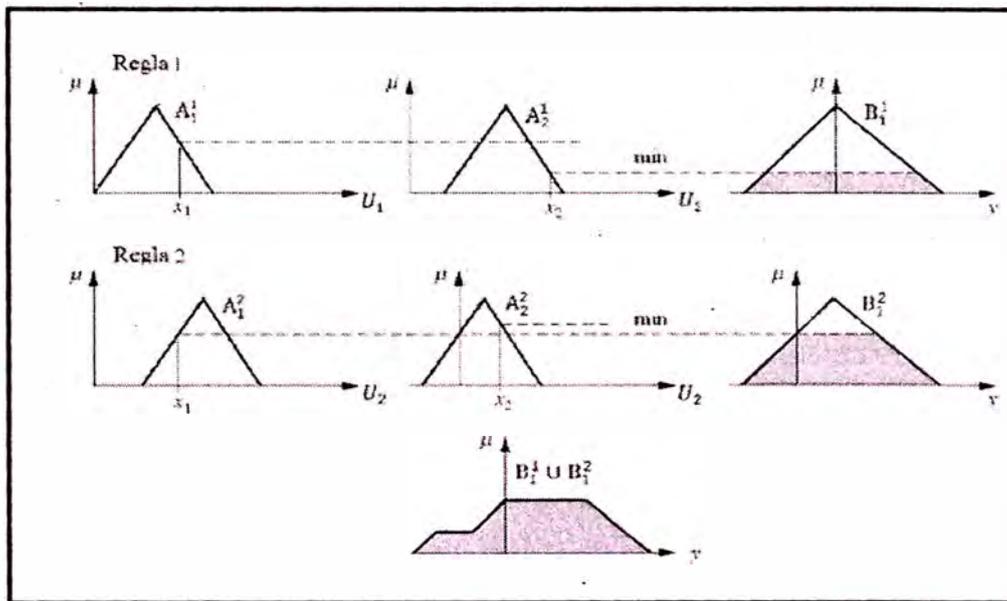


Figura 5.13: Método Max-min

c. Identificación del método de fusificación

El objetivo de defusificar consiste en obtener un valor no difuso, en nuestro caso un voltaje.

Para este controlador se utiliza el método del centroide, debido a que es el más usado en aplicaciones de control, obteniendo buenos resultados en diversas aplicaciones, en el que la salida final será 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 implementaron en la herramienta de lógica difusa de Matlab 2010, como se muestra en la Figura 5.14.

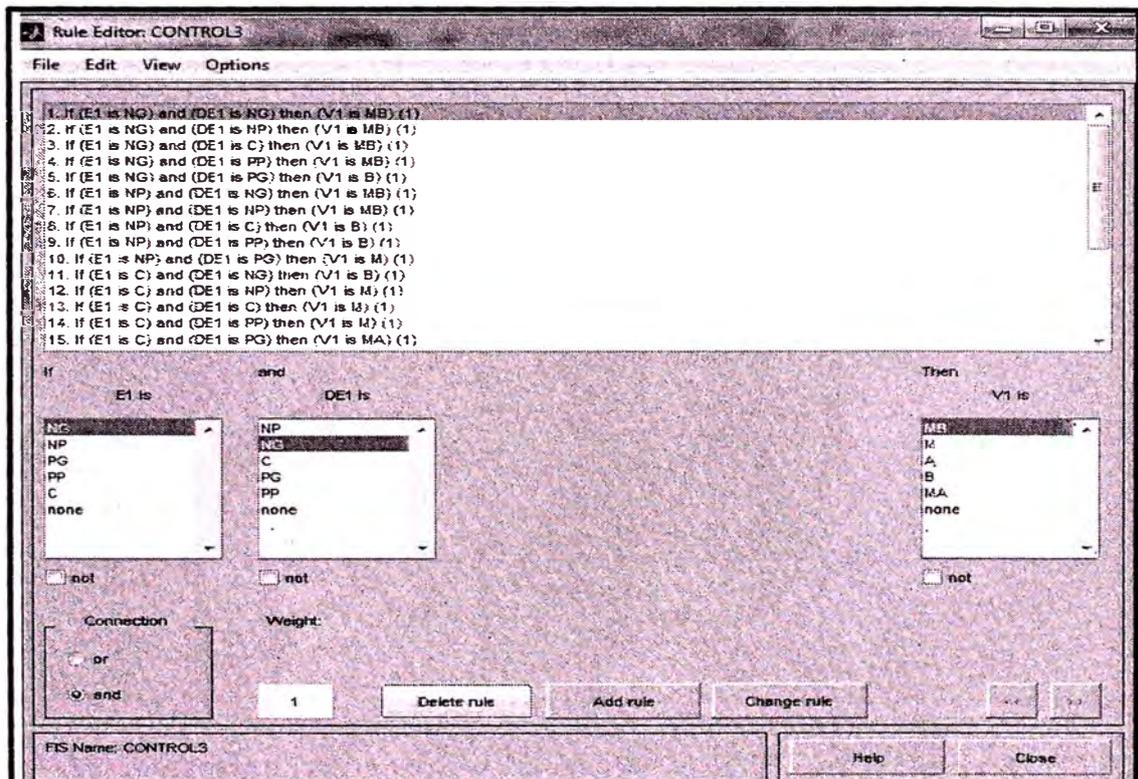


Figura 5.14: Editor de base de reglas.

La superficie de control es una gráfica en tres dimensiones donde el dominio son las entradas, en nuestro caso e y Δe y el codominio que es el resultado de salida de control: voltaje. Esto nos permite visualizar la relación, forma y comportamiento que sigue nuestra salida de control (Figura 5.15, realizada en MATLAB), en ésta se observa que la zona amarilla presenta un error muy grande lo que produce una salida de 5 volts, pero al

aproximarse a un error de cero disminuye el voltaje. Cuando el error y el cambio de error se encuentran cerca de cero el voltaje oscila alrededor de 2.55 volts, la superficie azul corresponde a un error y cambio de error con valores muy negativos, lo que implica valores de voltaje de cero.

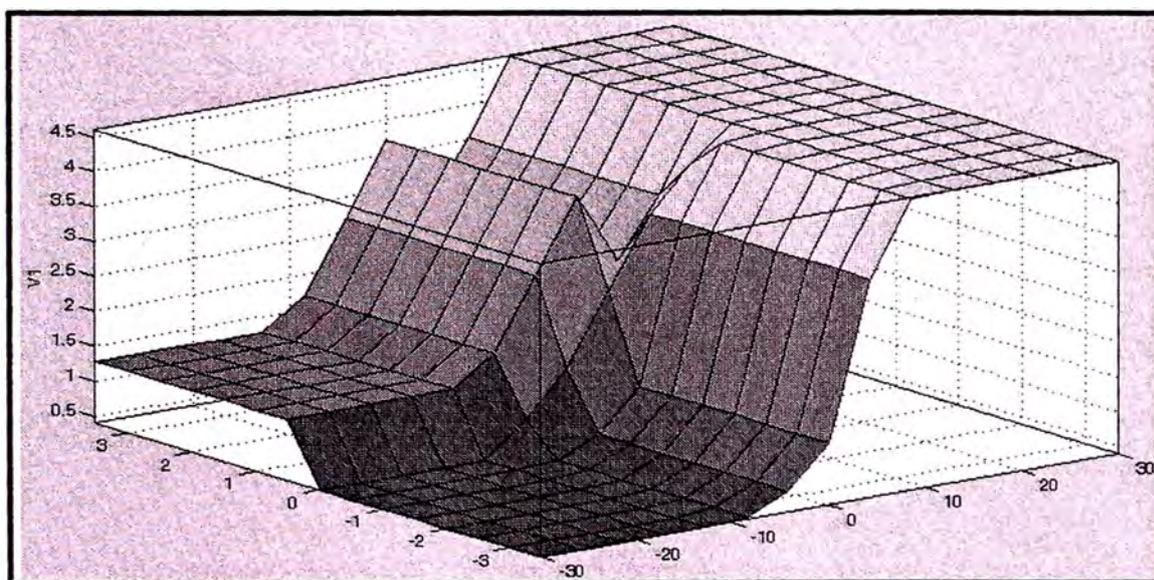


Figura 5.15: Superficie de control.

Al controlador difuso se le agregaron ganancias (Figura 5.16) para amplificar el error (e) y el cambio del error (Δe), además de minimizar la salida de voltaje en las rampas de bajada. Las ganancias serán representadas en nuestro diagrama de matlab como g_1 , g_2 y g_3 con valores de 1.5, 1.2 y 0.9, encontrados mediante prueba y error en la simulación realizada durante el proceso de diseño en el programa de simulación de matlab (simulink).

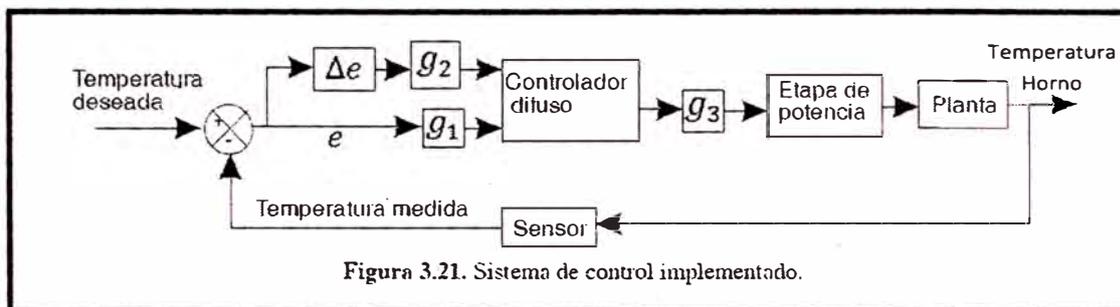


Figura 5.16: Sistema de control implementado.

5.2.3 Determinación de entradas y salidas.

Para poder determinar el modelo de equipo a usar es importante conocer cuántas entradas y salidas tendremos y cuántas son analógicas y digitales, por tal razón se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 5-5: Señales del sistema de control.

Nº	DESCRIPCION	CODIGO	TIPO	UBICACIÓN
1	Temperatura de referencia	Temp_ref	Dato	Interno
2	Temperatura Real	Temp_real	Analógico	Entrada
3	Señal de activación/desactivación	S_act_des	Digital	Entrada
4	Cruce por cero	C_C	Digital	Entrada
5	ON/OFF	ON_OFF	Lógica	Interno
6	Señal de salida	S_sal	Digital	Salida

5.2.4 Modelamiento del sistema integrado

El sistema es modelado en matlab, en el cual podremos apreciar todos los componentes del sistema expresado en subsistemas, tal como de muestra en la Figura 5.17.

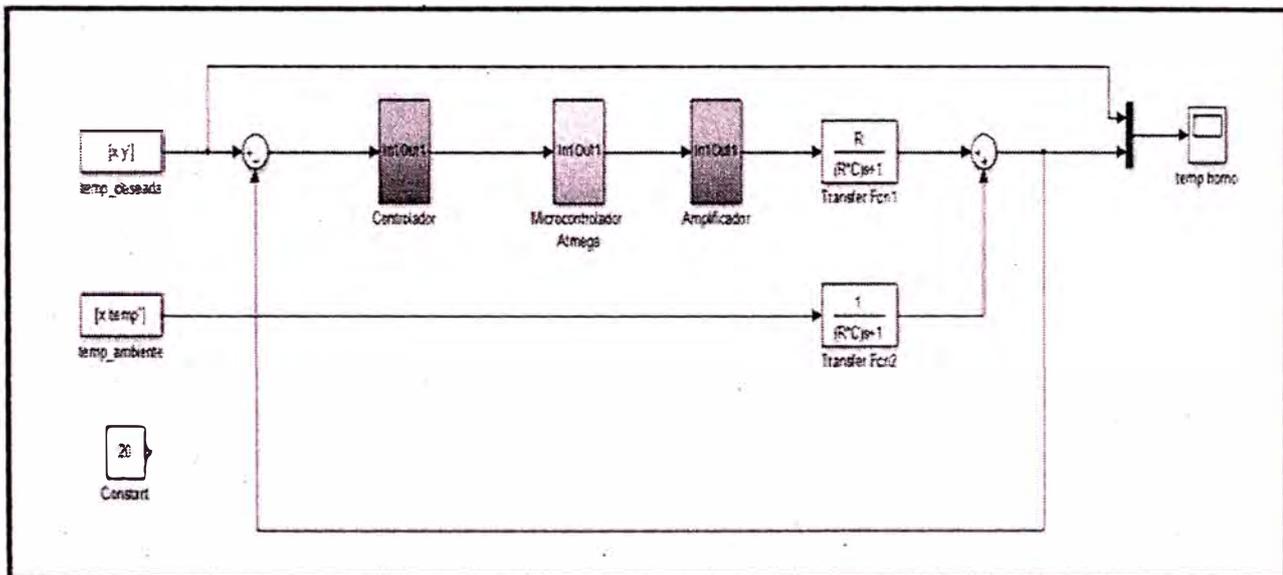


Figura 5.17: Diagrama general del sistema

a. Subsistema Controlador

En esta sección podemos apreciar las ganancias de las variables e , Δe y de la salida; los cuales fueron determinadas anteriormente mediante prueba y error.

Los limitadores ubicados anteriormente a las ganancias g_1 y g_2 , representan limitadores de voltaje los cuales permiran filtrar el voltaje correspondiente a un error de

temperatura mayor a 30°C y menor a -30°C y una variación del error a mayor a 3.5°C/s y menor a -3.5°C/s . La constante1 con un valor de 2.5, representa el voltaje fijo que permitira descontar los 2.5V de la salida de nuestro controlador cuando haya alcanzado el error cero.

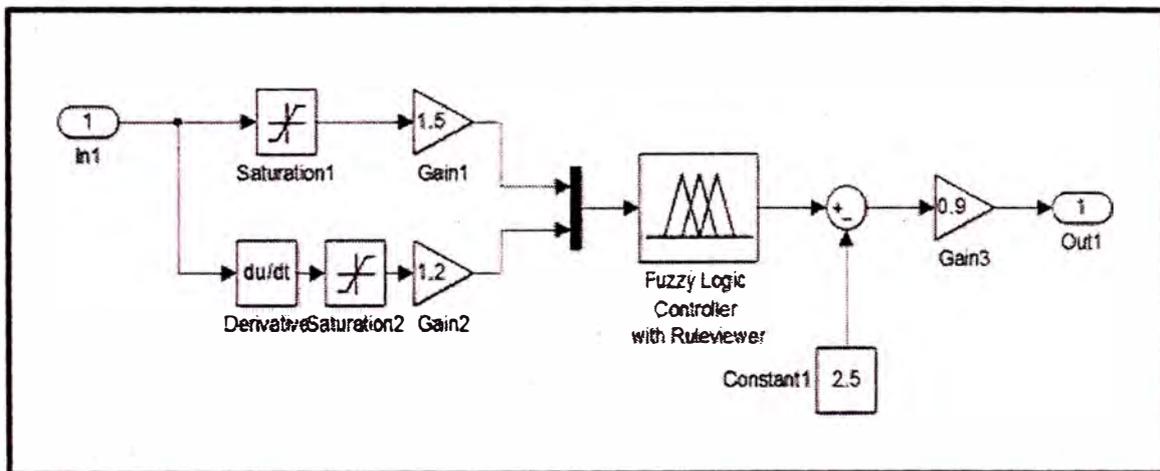


Figura 5.18: Subsistema Controlador

b. Subsistema Microcontrolador Atmega

En esta sección el sistema se encargara de recibir el voltaje del controlador y convertirlo en pulsos para la entrada del amplificador de potencia.

Así mismo guardara el valor anterior del voltaje de salida del controlador para que cuando el controlador llegue a determinar un error de "0" y vote un voltaje igual a "0" el

voltaje de salida del microcontrolador Atmega siga con el valor anterior, lo cual permitirá tener un voltaje constante para mantener el horno a la misma temperatura.

El siguiente esquema en Matlab podemos representar este proceso.

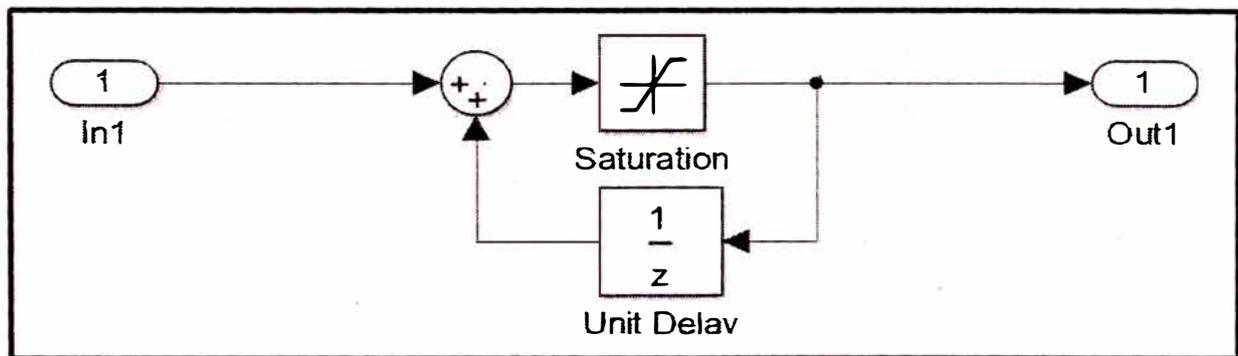


Figura 5.19: Representación del Microcontrolador Atmega

c. Subsistema Amplificador.

Este subsistema representa el proceso de amplificar la señal de salida en pulsos del microcontrolador Atmega en suministro de energía al sistema mediante una placa electrónica constituida como elemento fundamental un triac. En nuestro diagrama representamos como un multiplicador con una ganancia de 80.

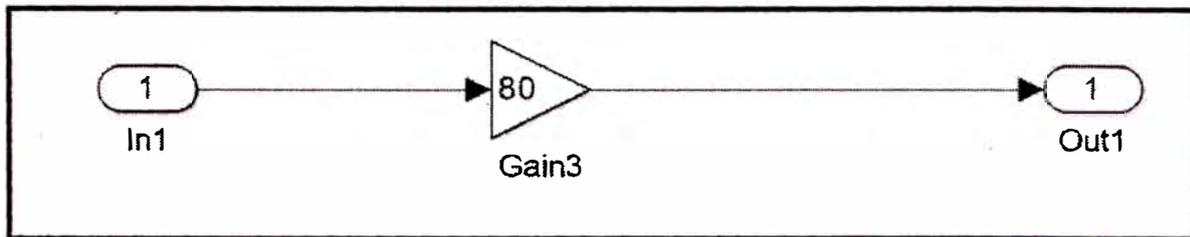


Figura 5.20: Representación del amplificador de potencia.

d. Planta

El horno es representado por los 2 bloques siguientes.

Los valores de las variables de la planta son determinados y mostrados en el

ANEXO III.

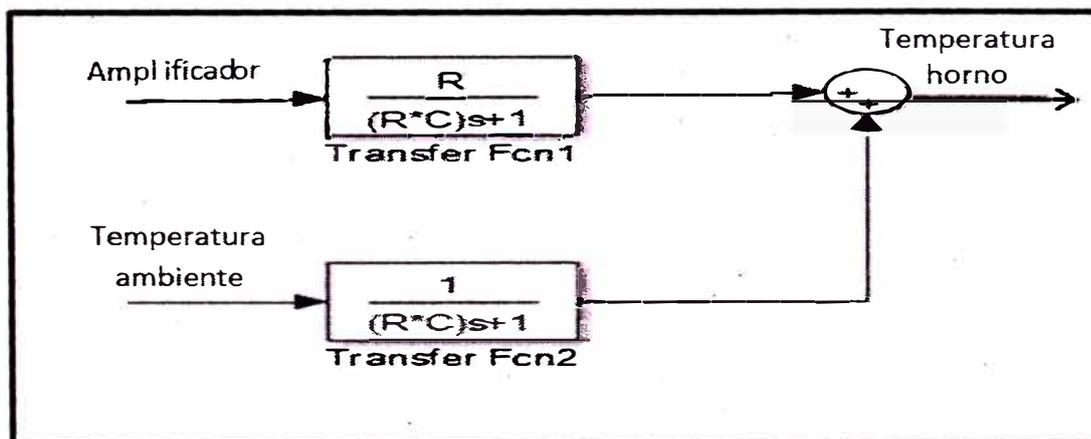


Figura 5.21: Representación del horno

5.2.5 Evaluación final

En esta sección mostramos las diversas respuestas y la robustez de nuestro controlador a diferentes necesidades, condiciones ambientales y etapas del secado de frutas.

Las pruebas del control se realizarán desde las más básicas, desde el control de temperatura de un escalón de 60°C y una temperatura de ambiente constante de 20°C , hasta un el control de una rampa descendente con pendientes de descenso de temperatura de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Prueba 1

Respuesta del sistema y la performance del controlador a una entrada constante con temperaturas de 60°C y una temperatura del ambiente constante de 20°C .

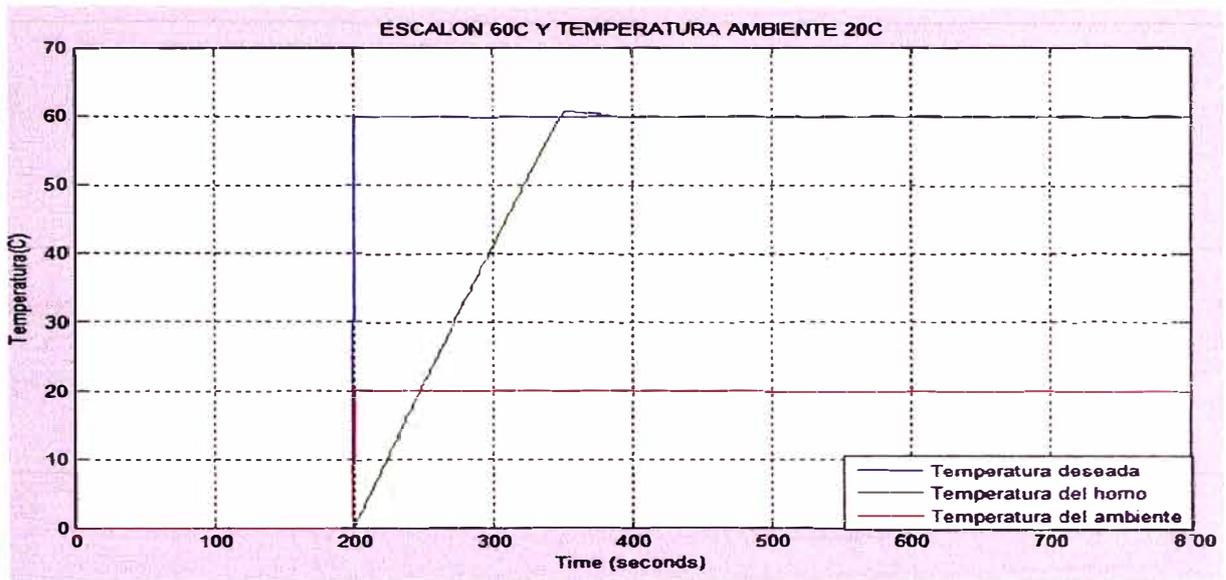


Figura 5.22: Respuesta a escalón 60°C

Prueba 2

Respuesta del sistema y la performance del controlador a una entrada constante con temperaturas de 40°C y una temperatura del ambiente constante de 25°C .

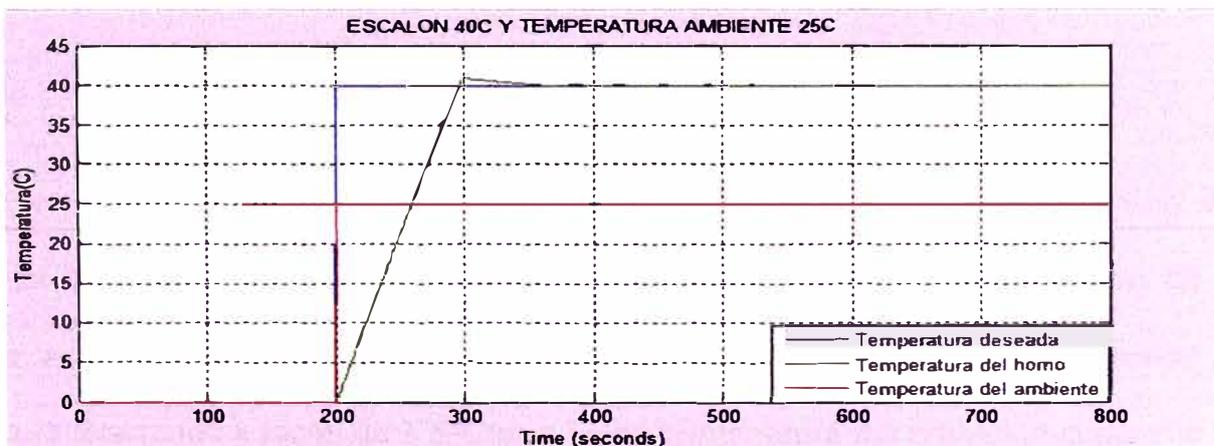


Figura 5.23: Respuesta escalón 40°C

Prueba 3

Respuesta del sistema y la performance del controlador a una entrada constante con temperaturas de 70°C y una temperatura del ambiente constante de 30°C .

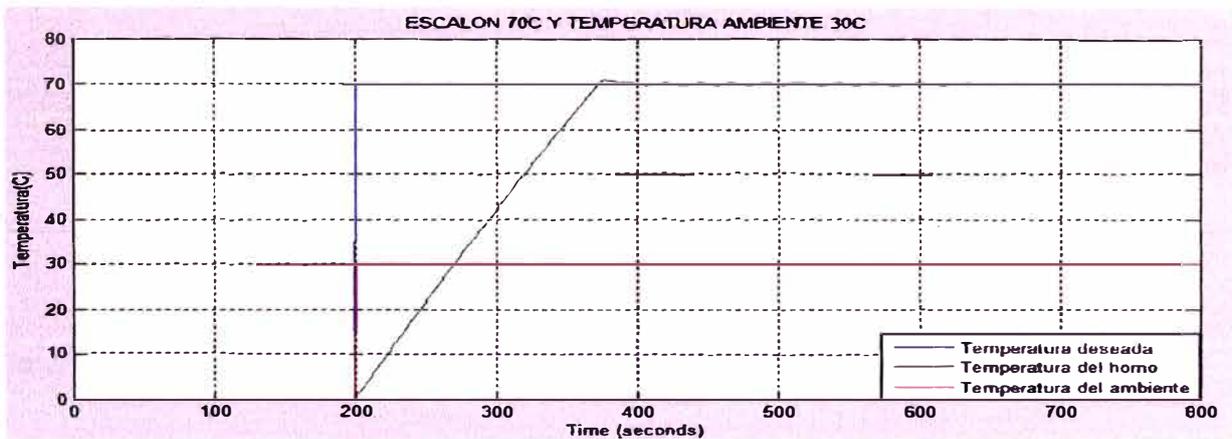


Figura 5.24: Respuesta escalón 70°C

Prueba 4

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el modelamiento del sistema en diferentes etapas del proceso de secado, verificando el seguimiento de la respuesta a la temperatura deseada, aquí podemos apreciar una respuesta cuando la temperatura desciende a razón de $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y una temperatura del ambiente constante de 20°C .

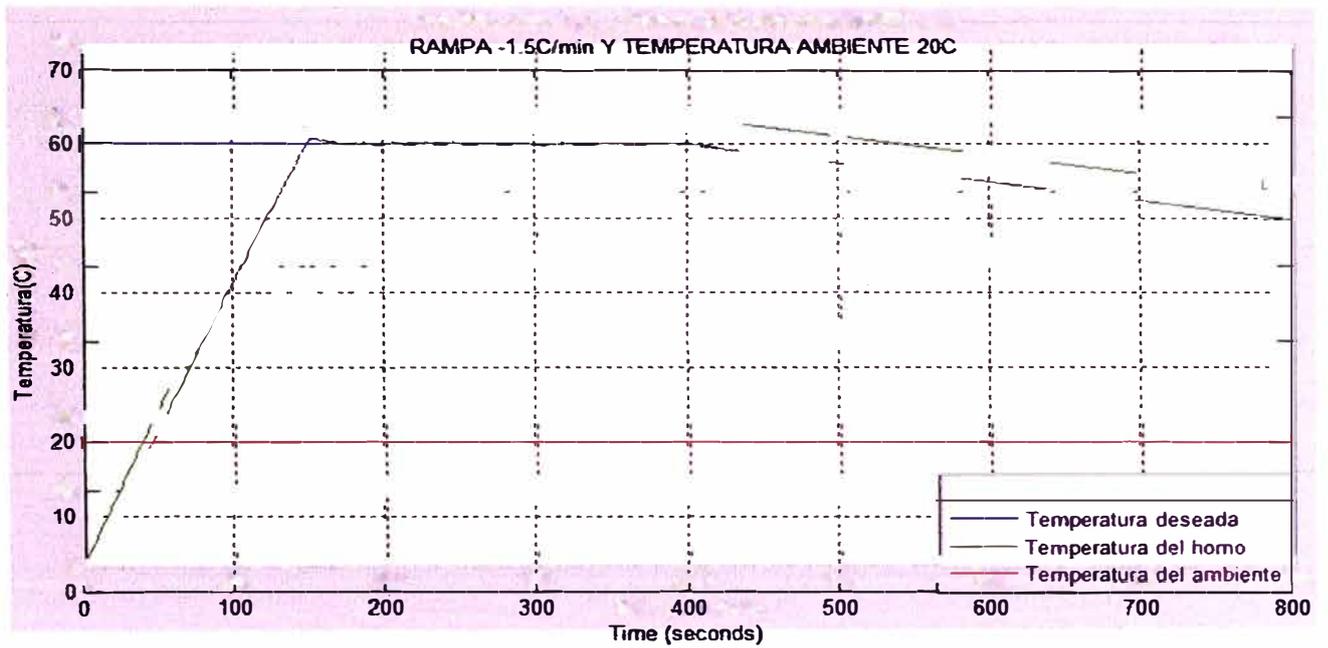


Figura 5.25: Respuesta a una rampa descendente de $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Prueba 5

Respuesta a un descenso de temperatura a razón de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y una temperatura de ambiente constante de 20°C .

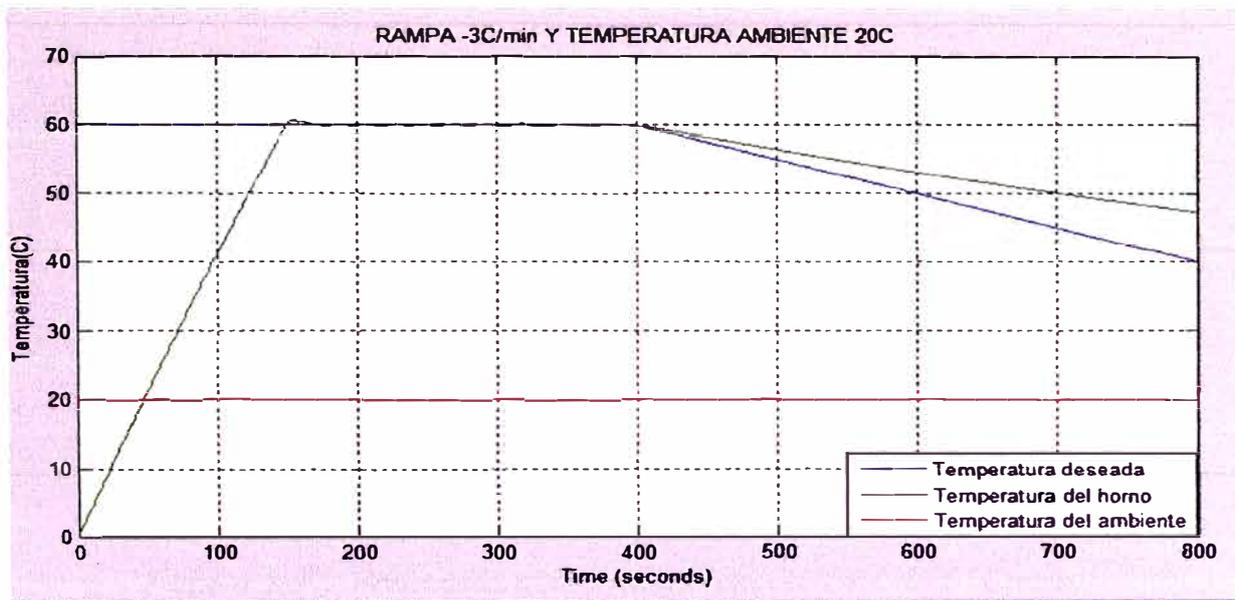


Figura 5.26: Respuesta a una rampa descendente de 3^oC/min

Prueba 6

En esta sección pondremos a prueba nuestro controlador incrementando la temperatura a razón de 6^oC/min y una temperatura de ambiente de 20^oC.

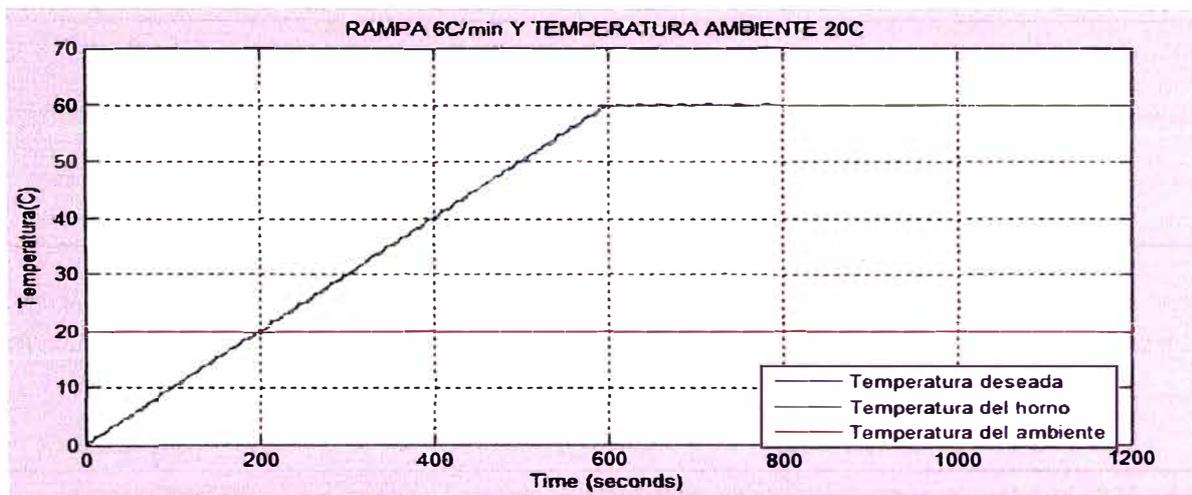


Figura 5.27: Respuesta a una rampa ascendente de 6 °C/min

Prueba 7

Aquí podemos apreciar la respuesta del sistema a una situación de transición, cuando la temperatura en la cámara de invernadero se incrementa a razón de debido a una mayor radiación solar y posteriormente desciende a un descenso.

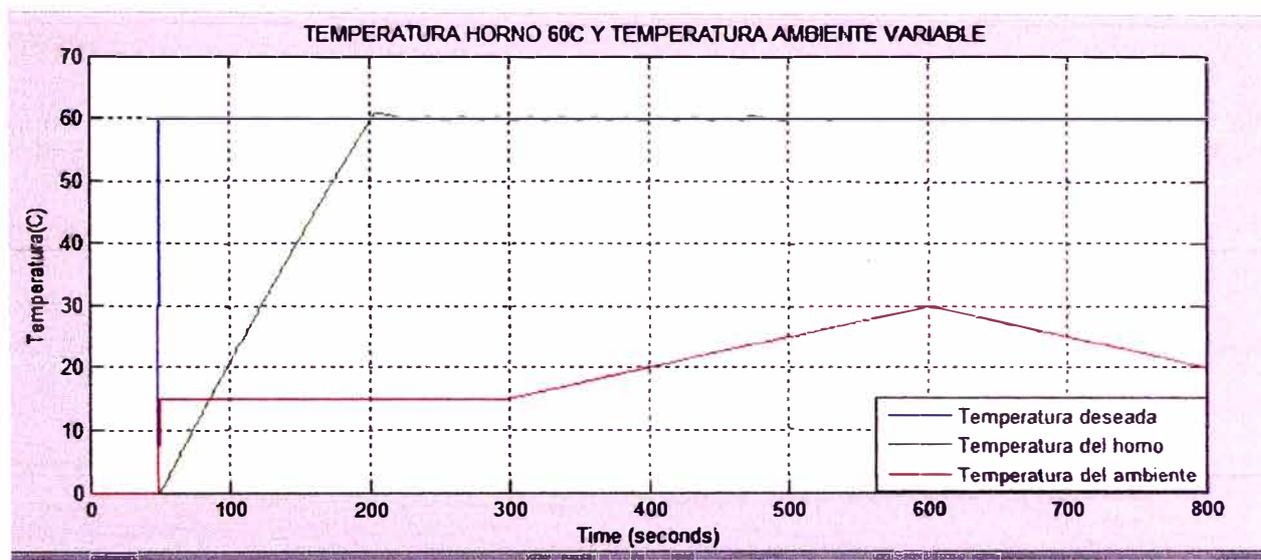


Figura 5.28: Respuesta a un escalón de 60°C y temperatura de ambiente variable.

5.2.6 Costos

A continuación en la tabla Tabla 5-6 se muestra el costo del material que se utilizó en la implementación del controlador difuso.

Tabla 5-6: Tabla de costos

Componente	Número de componentes	Costo(S/.)
Módulo de secado con bandejas y puerta	1	500
Colector solar	1	200
Placa negra de metal	1	400
Cubierta de polietileno	2m2	20
Microcontrolador Atmega	1	25
PIC 16F84	1	30
Sensor temperatura LM35	2	20
Amplificador LM358N	1	10
MOC3031	1	20
Resistencia eléctrica 5000w	1	20
Otros componentes electrónicos	VARIOS	30
OTROS GASTOS		100
Total		1125

CONCLUSIONES

1. Podemos apreciar que el controlador mantiene en todo momento bastante cercanía con la referencia, lo que es muestra que el controlador está trabajando como se desea.
2. Podemos apreciar que el controlador no es capaz de mantener la temperatura de descenso deseado cuando se desea que la temperatura descienda a razón de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ debido a que el sistema no puede perder energía tan rápido por propia condición intrínseca del horno. Para este caso sería necesario implementar un ventilador que permita hacer circular más rápido el aire del medio ambiente.
3. Se puede apreciar que el controlador es suficientemente robusto para poder mantener la temperatura constante dentro de la cámara de secado, a pesar de que la temperatura en la cámara de invernadero es variable.
4. Podemos apreciar en el modelamiento que la temperatura de la cámara de secado en todas las fases del proceso se mantienen a la temperatura deseada, situación que favorece a un secado óptimo de las distintas frutas que deseen secarse.

5. Si en el modelamiento se hubiese considerado otros factores de pérdidas, como el calentamiento de las paredes del horno y de la pérdida de calor por transferencia conductiva, se hubiese obtenido un resultado similar debido a que estas pérdidas por conducción en las paredes son casi despreciables.
6. El controlador directo difuso sin optimización es lo suficientemente capaz de mantener la temperatura adecuada de la cámara de secado ya que es suficientemente capaz de mantener la temperatura constante a pesar que cambie las condiciones del medio ambiente.
7. Se recomienda usar el horno secador de frutas en ambientes y temporadas calientes y/o en días despejados en los cuales podamos gozar de una gran cantidad de energía solar.
8. En días soleados la energía solar que se podría usar para secar las frutas es de aproximadamente el 85% de la energía total necesaria para poder secar la fruta en todo el proceso.

Bibliografía

1. Antonio Creus Solé; Instrumentación Industrial; Alfaomega, Sexta Edición, 1998.
2. Data sheet atmega48A-PU. Recuperado de: http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p_datasheet_summary.pdf
3. Ficha técnica de secadores solares recuperado de <http://www.slideshare.net/Perusolar/2-fichas-tecnicas-de-secadores-solares>.
4. Guía de uso de secadores solares para frutas, hortalizas, legumbres, plantas medicinales y carnes. recuperado de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf>.
5. Jan jantzen: Foundations of Fuzzy Control; John Wiley & Sons, 2007
6. Katsuhito Ogata; Ingeniería de control moderna; Prentice Hall, Tercera edición, 1998.
7. Muhammad H. Rashid, Electrónica de potencia; Pearson Educación, Tercera Edición, 2004.
8. Matlab, Programming Fundamentals; Revisión setiembre 2013.

ANEXOS

ANEXO I: DATOS ESTADÍSTICOS DE LAS EXPORTACIONES

<http://www.sierraexportadora.gob.pe/productos/catalogo-de-productos/aguaymanto/>

Principales Mercados de Exportación Durante los Últimos 3 Años
Partida Nro 0810905000 (uchuvas, ufillas, physalis peruviiana frescas)
(Expresado en Kilogramos y Participación Porcentual)

País Socio	Cantidad (KG)			% de participación		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Canadá	0	448	358	0%	59%	34%
Japón	0	0	280	0%	0%	27%
Francia	0	0	175	0%	0%	17%
Países Bajos (Holanda)	1	220	115	2%	29%	11%
Italia	0	0	90	0%	0%	9%
Otros	36	88	20	97%	12%	2%
Total	37	756	1,038	100%	100%	100%

Fuente: SUNAT

Elaborado por: SIERRA EXPORTADORA

<http://www.sierraexportadora.gob.pe/productos/catalogo-de-productos/arandano/>

Principales Mercados de Exportación Durante los Últimos 3 Años
Partida Nro 0810400000 (arandanos rojos, mirtilos y demás frutos del genero vaccinium, frescos)
(Expresado en Kilogramos y Participación Porcentual)

País Socio	Cantidad (KG)			% de participación		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Países Bajos (Holanda)	336	1,956	18,127	5%	29%	41%
Reino Unido	324	0	14,932	5%	0%	33%
Bélgica	1,449	1,836	7,802	23%	27%	17%
Estados Unidos	0	2,703	1,600	0%	40%	4%
Aguas Internacionales	3,800	0	1,000	60%	0%	2%
Otros	450	225	1,261	7%	3%	3%
Total	6,359	6,722	44,721	100%	100%	100%

Fuente: SUNAT

Elaborado por: SIERRA EXPORTADORA

<http://www.siicex.gob.pe/promperustat/frmPaises x Partida.aspx>

Exportación de mangos

TOTAL LISTADO	126.965,055.660	133,296,027.57
	Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
Total período: Año 2013 Mes: Todo el año	126,965,055.660	133,296,027.57
Total de la Consulta	126,965,055.660	133,296,027.57
Contribución : Total listado / Total período * 100	100.0000%	100.0000%

TOTAL LISTADO	99,608,480.850	117,273,808.12
	Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
Total período: Año 2012 Mes: Todo el año	99,608,480.850	117,273,808.12
Total de la Consulta	99,608,480.850	117,273,808.12
Contribución : Total listado / Total período * 100	100.0000%	100.0000%

TOTAL LISTADO	97,503,872.700	90,005,315.39
	Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
Total período: Año 2010 Mes: Todo el año	97,503,872.700	90,005,315.39
Total de la Consulta	97,503,872.700	90,005,315.39
Contribución : Total listado / Total período * 100	100.0000%	100.0000%

Exportación plátanos

#	Código País	País	Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
1	DE	Alemania	50.00	754.50
TOTAL LISTADO			50.000	754.50
			Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
Total período: Año 2012 Mes: Todo el año			50.000	754.50
Total de la Consulta			50.000	754.50
Contribución : Total listado / Total período * 100			100.0000%	100.0000%

TOTAL LISTADO	53,536.090	749,519.53
	Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
Total período: Año 2011 Mes: Todo el año	53,536.090	749,519.53
Total de la Consulta	53,536.090	749,519.53
Contribución : Total listado / Total período * 100	100.0000%	100.0000%

Exportación de pasas

TOTAL LISTADO	129,589.520	263,236.70
	Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
Total periodo: Año 2013 Mes: Todo el año	129,589.520	263,236.70
Total de la Consulta	129,589.520	263,236.70
Contribución : Total listado / Total periodo * 100	100.0000%	100.0000%

TOTAL LISTADO	101.710	308.87
	Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
Total periodo: Año 2012 Mes: Todo el año	101.710	308.87
Total de la Consulta	101.710	308.87
Contribución : Total listado / Total periodo * 100	100.0000%	100.0000%

TOTAL LISTADO	40,000.840	97,211.74
	Peso Neto Kg.	Valor FOB USD.
Total periodo: Año 2011 Mes: Todo el año	40,000.850	97,211.74
Total de la Consulta	40,000.850	97,211.74
Contribución : Total listado / Total periodo * 100	100.0000%	100.0000%

ANEXO II: % DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DE SECADO

[http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf)

[Guiasecaderosolar.pdf](#)

Contenido de humedad de algunos productos y temperatura máxima tolerable

Producto:	fresco(%)	seco(%)	°C
Granos:			
arroz	24	14	50
maíz	35	15	60
poroto	70	5	n/d
maní	40	9	n/d
café	50	11	n/d
Tubérculos:			
papa	75	13	55
mandioca	62	13	n/d
batata	80	13	70
Hortalizas:			
arveja	80	5	60
cebolla	80	4	55
hortalizas en hoja	80	10	50
tomate	95	8	65
repollo	94	4	55
zanahoria	70	5	60
locote y ají	86	5	60
ajo	80	8 a 10	55
Frutas:			
durazno	85	18	n/d
manzana	84	14	50
banana	80	15	70
guayaba	80	7	n/d
uva	80	15 a 20	55
mango	85	12 a 15	65
mamón	85	2 a 15	65
pescado (sin salado)	80	15	40
pescado (con salado)	80	35 a 45	40

ANEXO III: DETERMINACION CONSTANTES DEL SISTEMA

a. Valores aproximados para propiedades del aire y agua

Densidad del agua:	$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$
Densidad del aire:	$\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$
Calor específico del agua líquida:	$c_w = 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
Calor específico a presión cte del aire:	$c_{p,a} = 1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
Calor específico a volumen cte del aire:	$c_{v,a} = 0,717 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
Calor específico a presión cte del vapor de agua:	$c_{p,va} = 1,8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$
Masa molecular del aire seco	$M_a = 28,9645 \text{ kg/mol}$
Masa molecular del agua	$M_w = 18,01528 \text{ kg/mol}$
Calor latente de vaporización del agua:	$\Delta h_{g,w} = 2500 \text{ kJ/kg}$

b. Calculo de la potencia de la resistencia eléctrica para incrementar el aire 45 °C

$$P_a = Q\rho C\Delta T$$

Donde:

P: Potencia total(Watts)

Q: Flujo aire(m³/s)

ρ : Densidad del aire(m³/Kg)

C: Calor especifico del aire

ΔT : Variacion de la temperatura (°C)

Considerando una velocidad de aire de 0.5m/s, calculamos la potencia máxima necesaria de la resistencia para incrementar la temperatura en 45 °C.

$$Q = V_a \times \text{Area} = 0.5 \times 0.2 = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_a = 0.1 \times 1.2 \times 1000 \times 45$$

$$P_a = 5400 \text{ Watts}$$

c. Cálculo de las variables del sistema

Resolviendo la ecuación diferencial de nuestro fenómeno tenemos.

$$\theta_o(s) = \frac{R}{RCs + 1} H(s) + \frac{1}{RCs + 1} \theta_i(s)$$

Donde:

R : Resistencia Térmica ($^{\circ}\text{C}/\text{J}$)

C : Capacitancia térmica de la cámara ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$)

V : Volumen del acumulador (m^3)

G : Flujo de masa de aire a través de la cámara (m^3/s)

Q : Flujo aire (m^3/s)

y

$$R = \frac{1}{Gc} \text{ y } C = \rho Vc$$

Pero sabemos:

$$G = \rho_a Q = 1.2 \times 0.1 = 0.12 \text{ kg/s}$$

Entonces:

$$R = \frac{1}{Gc_a} = \frac{1}{0.12 \times 1000} = 0.0083^{\circ}\text{C}/\text{J} = 8.3^{\circ}\text{C}/\text{KW}$$

$$C = \rho Vc = 1.2 \times 2 \times 1 \times 0.2 \times 1000 = 480 \text{ J}/^{\circ}\text{C} = 0.48 \text{ KJ}/^{\circ}\text{C}$$

ANEXO IV: PROGRAMAS EN MATLAB

A continuación mostramos los programas en Matlab donde se simulan las condiciones de la temperatura del ambiente y las diversas temperaturas deseadas.

PRUEBA 1

```

close all
clear all
clc
R=0.0083;%%Resistencia termica
C=480; %Capacitancia termica
a=readfis('CONTROL5');
x=0:800;
x=x';
k=801;
%y=zeros(k);
for i=1:k
    if i<=200
        y(i)=0;
        temp(i)=0;
    else i>200&i<=300
        y(i)=60;
        temp(i)=20;
    end
    if i>300
        y(i)=60;
        temp(i)=20;
    end
end
end

```

PRUEBA 2

```

close all
clear all
clc
R=0.0083;%%Resistencia termica
C=480; %Capacitancia termica
a=readfis('CONTROL5');
x=0:800;
x=x';
k=801;
%y=zeros(k);
for i=1:k
    if i<=200
        y(i)=0;
        temp(i)=0;
    else i>200&i<=300
        y(i)=40;
        temp(i)=25;
    end
    if i>300
        y(i)=40;
        temp(i)=25;
    end
end
end

```

PRUEBA 3

```

close all
clear all
clc
R=0.0083;%%Resistencia termica
C=480; %Capacitancia termica
a=readfis('CONTROL5');
x=0:800;
x=x';
k=801;
%y=zeros(k);
for i=1:k
    if i<=200
        y(i)=0;
        temp(i)=0;
    else i>200&i<=300
        y(i)=70;
        temp(i)=30;
    end
    if i>300
        y(i)=70;
        temp(i)=30;
    end
end
end

```

PRUEBA 4

```

close all
clear all
clc
R=0.0083;%%Resistencia termica
C=480; %Capacitancia termica
a=readfis('CONTROL5');
x=0:800;
x=x';
k=801;
%y=zeros(k);
for i=1:k
    if i<=400
        y(i)=60;
        %temp(i)=(i-1+300)/15;
    else i>400&i<=600
        temp(i)=20;
        y(i)=(2800-i+1)/40;
        % temp(i)=(i-1+300)/15;
        temp(i)=20;
    end
    if i>600
        y(i)=(2800-i+1)/40;
        %temp(i)=(1100-i+1)/20;
        temp(i)=20;
    end
end
end

```

PRUEBA 5

```

close all
clear all
clc
R=0.0083;%%Resistencia termica
C=480; %Capacitancia termica
a=readfis('CONTROL5');
x=0:800;
x=x';
k=801;
%y=zeros(k);
for i=1:k
    if i<=400
        y(i)=60;
        %temp(i)=(i-1+300)/15;
    end
end

```

```

        temp(i)=20;
    else i>400&i<=600
        y(i)=(1600-i+1)/20;
        % temp(i)=(i-1+300)/15;
        temp(i)=20;
    end
    if i>600
        y(i)=(1600-i+1)/20;
        %temp(i)=(1100-i+1)/20;
        temp(i)=20;
    end
end

```

end

PRUEBA 6

```

close all
clear all
clc
d=1.2;
A=1;
Va=5;
%Ce=1;
%R=1/(d*A*Va);
R=0.86;
%%C=d*Ce;
C=1214.4;
a=readfis('CONTROL5');
x=0:800;
x=x';
k=801;
%y=zeros(k);
for i=1:k

```

```

    if i<=400
        y(i)=(i-1)/10;
        %temp(i)=(i-1+300)/15;
        temp(i)=20;
    else i>400&i<=600
        y(i)=(i-1)/10
        % temp(i)=(i-1+300)/15;
        temp(i)=20;
    end
    if i>600
        y(i)=60;
        %temp(i)=(1100-i+1)/20;
        temp(i)=20;
    end
end

```

end

PRUEBA 7

```

close all
clear all
clc
R=0.0083;%%Resistencia termica
C=480; %Capacitancia termica
a=readfis('CONTROL5');
x=0:800;
x=x';
k=801;
%y=zeros(k);
for i=1:k
    if i<=50
        y(i)=0;
        temp(i)=0;
    end
    if i>50&i<=300
        y(i)=60;
        temp(i)=15;
    end
    if i>300&i<=600
        y(i)=60;
        temp(i)=(i-1)/20;
    end
    if i>600
        y(i)=60;
        temp(i)=(1200-i+1)/20;
    end
end
end

```