



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Unidad Azcapotzalco**

**Sección de Estudios de Posgrado e Investigación**

***DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL  
DIFUSO DE UNA MÁQUINA SECADORA  
DE CAFÉ QUE EMPLEA ENERGÍA SOLAR***

---

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANUFACTURA  
PRESENTA:  
ING. LISAURA WALKIRIA RODRÍGUEZ ALVARADO**

---

**DIRECTORES: DR. NARCIZO MUÑOZ AGUIRRE  
M.C. GERARDO VILLEGAS MEDINA**

**MÉXICO D. F. JUNIO 2011**





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 18:00 horas del día 31 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME UA para examinar la tesis titulada:  
Diseño del Sistema de Control Difuso de una Máquina Secadora de Café que Emplea Energía solar.

Presentada por el alumno:

Rodríguez Alvarado Lisaura Walkiria  
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro: 

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 0 | 0 | 6 | 8 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|

aspirante al grado de:

Maestro en Ingeniería de Manufactura

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Narcizo Muñoz Aguirre  
Primer Vocal

M en C. Gerardo Villegas Medina  
Segundo Vocal

Dr. Pedro Alejandro Tamayo Meza  
Presidente

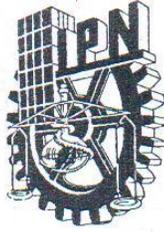
Dr. Salvador Antonio Rodríguez Paredes  
Secretario

Dr. Francisco Gallegos Funes  
Tercer Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Jaime Pacheco Martínez





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México el día 31 del mes de Mayo del año 2011, la que suscribe Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado alumna del Programa de Maestría en Ingeniería de Manufactura con número de registro A100686, adscrito a ESIME UA, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Narcizo Muñoz Aguirre y el M. en C. Gerardo Villegas Medina cede los derechos del trabajo intitulado Diseño del Sistema de Control Difuso de una Máquina Secadora de Café que Emplea Energía Solar, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [lwralvarado@hotmail.com](mailto:lwralvarado@hotmail.com), [nmunoz@ipn.mx](mailto:nmunoz@ipn.mx) ó [gvillegasm@ipn.mx](mailto:gvillegasm@ipn.mx). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado  
Nombre y firma

## **Agradecimientos**

Cada paso y cada etapa vivida durante la realización de esta tesis significaron un pequeño logro, viéndose reflejado hoy, en el trabajo finalmente concluido. Este representa un esfuerzo conjunto de varias personas, a quienes les doy mis más sincera gratitud por sus opiniones, asesoramiento, correcciones, paciencia, ánimo, apoyo y compañía. A todos ustedes muchas gracias! por haber formado parte de este logro.

La fuerza y fortaleza de avanzar con fe en la dirección de los sueños y el empeño de vivir la vida para alcanzar el éxito se lo debo a mis padres y hermanos, el estímulo, confianza y perseverancia entregado a mi persona, me ayudaron en todo momento a no decaer y mirar siempre hacia adelante, lo cual viene acompañado con el calor de hogar y apoyo brindado por la familia López Islas con quienes me sentí como hija, hermana, prima y sobrina, muchas gracias por hacerme parte de su familia.

Aprender a tener un equilibrio en la vida, aceptar la ayuda cuando la necesitamos y sobre todo a no decaer y encontrar la fortaleza en nosotros mismos se lo debo a un persona muy especial que llegó a mi vida a complementarla, mil gracias José Alberto por estar a mi lado, gracias por todos tus consejos, paciencia, dedicación, cariño y comprensión, gracias por esas grandes lecciones de vida.

Agradezco a mis compañeros, amigos, “hermanitos y hermanita” de posgrado: Edgar, Raúl Enrique, Juan, Beto, Paloma, Carlos, Yves, Miguel, con quienes compartí la mayor parte del tiempo. Con ustedes pasé momentos muy alegres, aprendiendo y conociendo un poquito más de de este lindo país, de su gente, costumbres y cultura, nunca faltó un consejo ni una mano amiga que me apoyara cuando le necesitara. Muchas gracias Maestros.

Quiero agradecer a los catedráticos que participaron en el desarrollo conceptual del trabajo de tesis. Especialmente agradezco al M en I. Raúl Valderrábano Ramírez quien es el precursor de este tema de tesis, quien tuvo la iniciativa de desarrollarlo a pesar de los inconvenientes y tropiezos presentados, a quien le debo el apoyo brindado y conocimientos compartidos. De igual manera a la persona que me supo dar dirección y encaminar el objetivo de este trabajo de tesis, al Maestro Raúl Rivera Blas por haberme guiado y aceptado como su alumna durante el tiempo que estuvo con nosotros, gracias por compartir su experiencia y conocimientos. Agradezco al Dr. Narcizo Muñoz Aguirre por su colaboración en la estructura de la tesis y con gran aprecio y estima al Maestro Gerardo Villegas Medina quien tuvo la paciencia necesaria para hacerme ver mis errores y guiarme en momentos de desesperación y sobre todo por haber decidido ser la persona que

me ayudara a culminar el trabajo realizado. Al doctor Carlos Adolfo Hernández Carreón quien fue la primera persona que depositó su confianza en mí y me impulsó a tomar las decisiones que hoy en día se ven reflejadas con una meta cumplida. A la Dra. Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes, al Dr. Francisco Gallegos Funes, al Dr. Salvador Antonio Rodríguez Paredes y al Dr. Pedro Tamayo Meza por el tiempo dedicado, por las observaciones realizadas en pro del mejoramiento del trabajo realizado

Como mencioné anteriormente es un trabajo en el cual se vieron involucradas muchas personas que de una u otra forma brindaron su granito de arena: Profesores y compañeros del CECATI por toda su colaboración y enseñanza. La compañía y apoyo de nuevos amigos que se integraron en el transcurso de la realización del trabajo de tesis, el cual significa mucho para mí. Familia Sárraga, gracias por su acogimiento durante mi estancia en México. Al Personal de apoyo de control escolar por todas las inquietudes resueltas, y por el tiempo brindado.

Agradezco al Instituto Politécnico Nacional por la oportunidad brindada de haber realizado mis estudios en dicha institución. Al CONACYT por el apoyo económico ya que de lo contrario no hubiese sido posible la culminación del trabajo final

Y sobre todo gracias a Dios por haberme permitido llegar hasta donde estoy.

*Muchas gracias a todos!*

## **Dedicatoria**

La fuerza, fe, voluntad, valentía y paciencia son muchas cualidades y virtudes que desarrollamos o aprendemos a lo largo del camino, sin embargo a veces nos topamos con personas que nos ayudan a comprenderlas y adoptarlas en el momento justo y necesario.

Dedico este trabajo a mis dos familias que me mostraron el camino a seguir en el momento justo.

**Familia Rodríguez Alvarado**

**Y**

**Familia López Islas.**

## Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de control difuso para las condiciones de temperatura y humedad deseadas del flujo de aire utilizado para el secado del café.

El sistema de control permite la entrada y salida del aire a la cámara de calentamiento. Con ayuda de un colector solar cilíndrico parabólico, cuyo reflejo converge en la cámara, el aire es calentado hasta alcanzar temperaturas superiores a los 160°C, garantizando que el aire de salida tenga una temperatura de 60 a 65°C con una humedad relativa del 12% las cuales son las condiciones ideales para un buen secado del producto.

La integración del sistema se lleva a cabo mediante el Software de LabVIEW. Mediante una tarjeta de adquisición de datos se realiza la comunicación entre los sensores que monitorean el comportamiento de las variables (temperatura, presión y humedad) y el algoritmo del control aplicado para el accionamiento de las válvulas que permiten la entrada y salida del aire.

El diseño del sistema de control para la máquina secadora de café se utilizó como alternativa considerando que el proceso de secado es un sistema complejo donde se ven involucradas muchas variables, así mismo se tomó en consideración la facilidad y flexibilidad que son característicos del sistema de control difuso en comparación con otros sistemas de control.

Los resultados obtenidos muestran que el aire alcanzó las condiciones adecuadas para ser utilizado en el secado de café, lográndose comprobar que el algoritmo utilizado por lógica difusa responde a la dinámica del proceso cuyos parámetros son ajustables a las condiciones requeridas por el sistema.

## **Abstract**

This project shows the development of a diffused control system for the desired temperature and humidity conditions of the air used for drying coffee.

The system allows the input and output of air into the heating chamber. By using a parabolic cylindrical solar collector, which converges into the chamber, the air is heated up until it reaches temperatures above 160°C, guaranteeing that the air that comes out has a temperature between 60°C and 65°C and a relative humidity of 12%, conditions that are ideal for a good drying process of the product.

The integration of the system is carried out by the LabVIEW Software. Through an acquisition data card the communication between the sensors that monitor the behavior of the variables (temperature, pressure and humidity) and the algorithm of the control applied for starting the valves that let the input and output of the air takes place.

The design of the control system for the coffee drying machine was used as an alternative taking into account that this drying process is a complex system where lots of variables are involved. In addition it was necessary to consider the easiness and flexibility that are typical of the diffused control system in comparison with other control systems.

The results obtained depict that the air reached the adequate conditions to be used in the coffee drying process, proving that the algorithm used for diffused logic responds to the dynamics of the process whose parameters are adjustable to the required conditions by the system.



|   |             |
|---|-------------|
| <b>Resumen</b> .....  | <b>i</b>    |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>ii</b>   |
| <b>Índice de figuras</b> .....  | <b>vii</b>  |
| <b>Índice de tablas</b> .....   | <b>x</b>    |
| <b>Introducción</b> .....   | <b>xi</b>   |
| <b>Antecedentes</b> .....   | <b>xii</b>  |
| <b>Justificación</b> .....  | <b>xv</b>   |
| <b>Planteamiento del problema</b> .....                                     | <b>xvi</b>  |
| <b>Objetivo general</b> .....   | <b>xvii</b> |
| <b>Objetivos específicos</b> .....  | <b>xvii</b> |
| <b>1. Generalidades</b> .....   | <b>1</b>    |
| <b>1.1. Métodos de secado utilizados actualmente</b> .....                  | <b>1</b>    |
| 1.1.1. Secado mixto y artificial.....                                       | 2           |
| 1.1.1.1. Guardiolas.....  | 2           |
| 1.1.1.2. Secadora solar de biomasa McDowell con auxilio de combustible..... | 2           |
| 1.1.1.3. Secadora de bandejas.....  | 2           |
| 1.1.1.4. El horno de Ceylon.....  | 2           |
| 1.1.1.5. Silo secador.....  | 2           |
| 1.1.2. Secado que utiliza fuente de energía renovables.....                 | 3           |
| 1.1.2.1. Secado en patio.....   | 3           |
| 1.1.2.2. Secador solar tipo invernadero.....                                | 3           |
| 1.1.2.3. Secador multipropósito.....  | 4           |
| 1.1.2.4. Tambor rotatorio.....  | 4           |
| 1.1.3. Sistemas automatizados en el proceso de secado.....                  | 4           |
| <b>2. Sistemas de Control</b> .....   | <b>12</b>   |
| <b>2.1. Sistema de control clásico</b> .....                                | <b>12</b>   |
| 2.1.1. Sistema de control de lazo abierto.....                              | 12          |
| 2.1.2. Sistema de control de lazo cerrado.....                              | 12          |
| 2.1.3. Elementos básicos de un sistema de control.....                      | 13          |
| 2.1.3.1. Comparador.....  | 13          |
| 2.1.3.2. Controlador.....   | 13          |
| 2.1.3.3. Elemento de actuación.....   | 13          |
| 2.1.3.4. Proceso.....   | 13          |
| 2.1.3.5. Elemento de medición.....  | 14          |
| 2.1.4. Clasificación de los controladores industriales.....                 | 14          |



|  |           |
|--|-----------|
| 2.1.4.1. Acción de control proporcional .....                                      | 14        |
| 2.1.4.2. Acción de control integral .....  | 15        |
| 2.1.4.3. Acción de control proporcional-derivativa. (PD).....                      | 15        |
| 2.1.4.4. Acción de control proporcional-integral. (PI).....                        | 16        |
| 2.1.4.5. Acción de control proporcional-integral-derivativo. (PID) .....           | 16        |
| <b>2.2. Sistemas de control avanzado.....</b>                                      | <b>17</b> |
| 2.2.1. Control robusto .....   | 17        |
| 2.2.2. Control multivariable.....  | 18        |
| 2.2.3. Control adaptativo.....   | 19        |
| 2.2.4. Control predictivo.....   | 19        |
| 2.2.5. Control por redes neuronales.....   | 20        |
| 2.2.6. Control por lógica difusa. ....   | 21        |
| <b>2.3. Comparativos de los sistemas de control.....</b>                           | <b>22</b> |
| <b>2.4. Sistema de control difuso .....</b>  | <b>23</b> |
| 2.4.1. Operaciones sobre conjuntos difusos.....                                    | 24        |
| 2.4.2. Ventajas y desventajas de la lógica difusa.....                             | 25        |
| 2.4.3. Problemas en el diseño de controladores difusos. ....                       | 25        |
| 2.4.4. Implementación de sistemas difusos. ....                                    | 26        |
| 2.4.5. Funcionamiento de un sistema de control difuso. ....                        | 27        |
| 2.4.5.1. Fusificación de las entradas. ....  | 27        |
| 2.4.5.2. Etapa de inferencia, evaluación de las reglas de control.....             | 29        |
| 2.4.5.2.1. Peso asociado a las reglas de control.....                              | 30        |
| 2.4.5.2.2. Totalidad de las reglas de control.....                                 | 31        |
| 2.4.5.3. Defusificación de las salidas. ....                                       | 32        |
| 2.4.5.3.1. Método centro de gravedad (COG) o centro de área o centroide (COA)..... | 32        |
| 2.4.5.3.2. Defusificador de criterio el máximo. ....                               | 33        |
| <b>3. Descripción del proceso a controlar .....</b>                                | <b>34</b> |
| <b>3.1. Sistema a controlar .....</b>  | <b>34</b> |
| 3.1.1. Cámara de presurización.....  | 35        |
| 3.1.2. Cámara de calentamiento: .....  | 35        |
| 3.1.3. Fuente de energía térmica.....  | 36        |
| 3.1.4. Tolva. ....   | 36        |
| <b>3.2. Instrumentación.....</b>   | <b>37</b> |
| 3.2.1. Sensor de temperatura y humedad .....                                       | 39        |
| 3.2.1.1. Características .....   | 39        |
| 3.2.1.2. Funcionamiento .....  | 39        |
| 3.2.1.3. Adquisición de la señal.....  | 40        |
| 3.2.1.4. Acoplamiento del sensor. ....   | 44        |
| 3.2.2. Sensor de presión.....  | 45        |



|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.2.1. Características .....   | 45        |
| 3.2.2.2. Funcionamiento.....   | 45        |
| 3.2.3. Adquisición de datos.....   | 46        |
| 3.2.3.1. Características del funcionamiento de la DAQ .....                    | 46        |
| 3.2.4. Válvulas de activación. ....  | 47        |
| 3.2.4.1. Características .....   | 47        |
| 3.2.4.2. Funcionamiento .....  | 48        |
| 3.2.5. Otros componentes.....  | 48        |
| 3.2.5.1. Filtro para aire comprimido.....                                      | 49        |
| 3.2.5.2. Manómetro gauge .....   | 49        |
| <b>4. Diseño y desarrollo del sistema de control. ....</b>                     | <b>50</b> |
| <b>4.1. Análisis y conceptualización del proyecto. ....</b>                    | <b>50</b> |
| <b>4.2. Desarrollo del sistema de control difuso .....</b>                     | <b>53</b> |
| 4.2.1. Señales del sistema. ....   | 53        |
| 4.2.2. Variables del sistema.....  | 53        |
| 4.2.3. Temperatura .....   | 54        |
| 4.2.4. Presión.....  | 54        |
| 4.2.5. Flujo másico.....   | 54        |
| <b>4.3. Descripción funcional del controlador.....</b>                         | <b>54</b> |
| <b>4.4. Etiquetas de los conjuntos difusos.....</b>                            | <b>55</b> |
| 4.4.1. Conjuntos para la variable temperatura (T).....                         | 56        |
| 4.4.2. Conjuntos para la variable presión (P).....                             | 57        |
| 4.4.3. Conjuntos para la variable salida (Flujo másico).....                   | 57        |
| <b>4.5. Reglas de control. ....</b>  | <b>58</b> |
| <b>4.6. Funciones de membresía.....</b>  | <b>59</b> |
| 4.6.1. Funciones de membresía de los conjuntos de la variable temperatura..... | 59        |
| 4.6.2. Funciones de membresía de los conjuntos de la variable presión .....    | 60        |
| <b>4.7. Controlador difuso.....</b>  | <b>61</b> |
| 4.7.1. Etapa de fusificación del controlador difuso. ....                      | 61        |
| 4.7.1.1. Filtro promediador.....   | 62        |
| 4.7.2. Etapa de inferencia del control difuso. ....                            | 71        |
| 4.7.3. Etapa de defusificación del control difuso .....                        | 74        |
| <b>4.8. Interfaz con el usuario.....</b>                                       | <b>77</b> |
| 4.8.1. Etapa 1: Adquisición de señales.....                                    | 77        |
| 4.8.1.1. Tiempo .....  | 79        |
| 4.8.1.2. Paro.....   | 79        |
| 4.8.1.3. Gráfica.....  | 79        |



|   |            |
|---|------------|
| 4.8.1.4. Variables .....  | 79         |
| 4.8.1.5. Archivo de Información .....   | 80         |
| 4.8.2. Etapa 2: Sistema de control difuso.....  | 81         |
| 4.8.2.1. Monitoreo de las variables .....   | 82         |
| 4.8.2.2. Estado de los actuadores .....   | 82         |
| <b>5. Análisis y validación .....</b>   | <b>84</b>  |
| <b>5.1. Evaluación experimental.....</b>  | <b>84</b>  |
| <b>5.2. Comportamiento experimental.....</b>  | <b>85</b>  |
| 5.2.1. Análisis primera etapa: entrada del aire al sistema .....                                  | 86         |
| 5.2.2. Análisis segunda etapa: calentamiento de la cámara .....                                   | 92         |
| 5.2.2.1. Error de las curvas simuladas. ....  | 98         |
| 5.2.3. Análisis tercera etapa: accionamiento del control para la salida del aire .....            | 100        |
| 5.2.3.1. Condiciones del aire de salida. ....   | 102        |
| <b>5.3. Verificación del sistema de control.....</b>  | <b>104</b> |
| <b>5.4. Caracterización del proceso .....</b>   | <b>108</b> |
| 5.4.1. Cantidad de masa de agua extraída del café.....  | 108        |
| 5.4.2. Aplicación del sistema de control en la cámara de secado. ....                             | 109        |
| <b>Conclusiones.....</b>  | <b>111</b> |
| 1. Desarrollo del sistema de control .....  | 111        |
| 2. Comportamiento experimental.....   | 112        |
| 3. Caracterización del proceso .....  | 112        |
| <b>Trabajos a futuro.....</b>   | <b>113</b> |
| <b>Referencias.....</b>   | <b>114</b> |
| <b>Anexos .....</b>   | <b>118</b> |
| <b>Anexo 1: Especificaciones técnicas del sensor HMZ433A1 .....</b>                               | <b>118</b> |
| <b>Anexo 2: Especificaciones técnicas del sensor de Presión PSI-100 .....</b>                     | <b>123</b> |
| <b>Anexo 3: Especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6009.....</b> | <b>125</b> |
| <b>Anexo 4: Especificaciones técnicas de las válvulas de activación .....</b>                     | <b>128</b> |



## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1-1: Esquema del proceso del café .....   | 1  |
| Figura 1-2: Secadoras de café mixto y artificial.....  | 3  |
| Figura 1-3: Secadores de café que utilizan energía solar .....   | 4  |
| Figura 1-4: Esquema general de la planta piloto.....   | 5  |
| Figura 1-5: Diseño esquemático del flujo másico y caudal de aire.....  | 6  |
| Figura 1-6: Equipo de secado de café utilizado.....  | 7  |
| Figura 1-7 :Diseño de la máquina secadora de frutas .....  | 8  |
| Figura 1-8: Diagrama esquemático del procedimiento.....  | 8  |
| Figura 1-9: Diseño de la máquina secadora de café.....   | 9  |
| Figura 1-10: Esquema general de la máquina secadora de café.....   | 9  |
| Figura 1-11: Planta piloto de secado .....   | 10 |
| Figura 1-12: Sistema de control aplicado .....   | 10 |
| Figura 2-1: Sistema de control de lazo abierto .....   | 12 |
| Figura 2-2: Sistema de control de lazo cerrado .....   | 13 |
| Figura 2-3: Diagrama de bloques de un controlador proporcional.....  | 14 |
| Figura 2-4: Diagramas de bloques de un controlador integral .....  | 15 |
| Figura 2-5: Diagrama de bloques de un controlador proporcional-derivativo. ....  | 16 |
| Figura 2-6: Diagrama de bloque de un controlador proporcional-integral-derivativo.....   | 17 |
| Figura 2-7: Planta apta para control robusto .....   | 18 |
| Figura 2-8: Control multivariable .....  | 18 |
| Figura 2-9 Diagrama del control adaptativo .....   | 19 |
| Figura 2-10: Diagrama de bloques del control Predictivo .....  | 20 |
| Figura 2-11: Esquema de una red neuronal.....  | 21 |
| Figura 2-12: Diseño de sistema por control de lógica difusa .....  | 21 |
| Figura 2-13: Comparativo del control clásico y control avanzado .....  | 22 |
| Figura 2-14: Características de los sistemas de control avanzado.....  | 23 |
| Figura 2-15: Operaciones en lógica difusa .....  | 24 |
| Figura 2-16: Funcionamiento de un control difuso .....   | 27 |
| Figura 3-1: Esquema general del proceso .....  | 35 |
| Figura 3-2: Prototipo Actual .....   | 36 |
| Figura 3-3: Instrumentación de la cámara de secado .....   | 38 |
| Figura 3-4: Sensor de temperatura y humedad HMZ433A1 .....   | 39 |
| Figura 3-5 Arreglo del circuito .....  | 40 |
| Figura 3-6. Gráficas de la relación voltaje-% de humeada. ....   | 41 |
| Figura 3-7: (a) Expresión lineal que representa el comportamiento de la humedad (b) dato de los residuos de la expresión encontrada..... | 42 |
| Figura 3-8: Gráficas de la relación voltaje - temperatura.....   | 43 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 3-9: (a) Expresión lineal que representa el comportamiento de la humedad (b) dato de los residuos de la expresión encontrada..... | 44 |
| Figura 3-10 (a) sensor encapsulado y (b) ubicación del sensor en la cámara de calentamiento.....   | 44 |
| Figura 3-11 Sensor de presión PSI-100 .....  | 45 |
| Figura 3-12: Esquema de conexión del sensor de presión.....  | 45 |
| Figura 3-13: Tarjeta de adquisición de datos DAQ.....  | 46 |
| Figura 3-14: Válvulas solenoides y posición en la cámara de calentamiento .....  | 47 |
| Figura 3-15: Diagrama electrónico del circuito de activación de las válvulas.....  | 48 |
| Figura 3-16: Filtro utilizado para aire comprimido.....  | 49 |
| Figura 3-17: Manómetro utilizado .....   | 49 |
| Figura 4-1: Funciones y subfunciones del diseño .....  | 50 |
| Figura 4-2 Modelo de espiral.....  | 51 |
| Figura 4-3: Modelo del proyecto a seguir .....   | 52 |
| Figura 4-4: Consideraciones para el diseño del sistema de control. ....  | 53 |
| Figura 4-5: Conjuntos para la variable temperatura. ....   | 56 |
| Figura 4-6: Conjuntos difusos para la variable Presión .....   | 57 |
| Figura 4-7: Conjuntos difusos para la variable de salida.....  | 58 |
| Figura 4-8: Matriz de reglas de control para válvula 1 y 2.....  | 58 |
| Figura 4-9: Etapa de Fusificación. ....  | 62 |
| Figura 4-10: promedio móvil ponderado.....   | 63 |
| Figura 4-11: Diagrama de bloques de etapa de Fusificación.....   | 65 |
| Figura 4-12: Pasos a contemplar en la etapa de Fusificación .....  | 66 |
| Figura 4-13: Matrices de los valores “a, b, c” de las funciones de membresía.....  | 67 |
| Figura 4-14 Representación de los valores de temperatura y conversión a bits.....  | 68 |
| Figura 4-15: Representación de la variable presión y su conversión a términos de bits.....   | 69 |
| Figura 4-16: Cálculos para determinar el grado de pertenencia.....   | 70 |
| Figura 4-17: Etapas de la fase de Inferencia.....  | 71 |
| Figura 4-18: Diagrama de bloques de la etapa de Inferencia .....   | 72 |
| Figura 4-19: Matriz de evaluación términos mínimos de las funciones de Membresía .....   | 73 |
| Figura 4-20 Etapas del proceso de Defusificación .....   | 74 |
| Figura 4-21: Diagrama de bloques de la etapa de Defusificación.....  | 75 |
| Figura 4-22: Panel frontal de la Interfaz para la adquisición de las señales.....  | 78 |
| Figura 4-23: Algoritmo de desarrollo de la interfaz: “Adquisición de señales” .....  | 79 |
| Figura 4-24: Adquisición de señal de la variable Temperatura .....   | 80 |
| Figura 4-25: Panel frontal de la interfaz gráfica del programa de control. ....  | 81 |
| Figura 5-1: Etapa uno del sistema. ....  | 86 |
| Figura 5-2: Comportamiento de la presión.....  | 86 |



---

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5-3 (a) Código en Matlab y (b) diagrama de bloques función de transferencia .....  | 87  |
| Figura 5-4 Comportamiento experimental y simulado (Presión).....                          | 88  |
| Figura 5-5: Valores a considerar para aplicar el método de Strejc. ....                   | 89  |
| Figura 5-6: Comportamiento de la gráfica experimental y simulada .....                    | 90  |
| Figura 5-7: Comparativos de parámetros .....  | 90  |
| Figura 5-8: Esquema general de la variación de temperatura.....                           | 92  |
| Figura 5-9: Comportamiento de la Temperatura Interna en la cámara de calentamiento...     | 92  |
| Figura 5-10: (a) Código en Matlab y (b diagrama de bloques función de transferencia ..... | 93  |
| Figura 5-11 Comportamiento experimental y gráfica simulada de primer orden.....           | 93  |
| Figura 5-12: Comportamiento de la gráfica experimental y simulada de quinto orden.....    | 96  |
| Figura 5-13: Esquema general de la variación de la presión.....                           | 100 |
| Figura 5-14: Comportamiento de la presión interna de la cámara de calentamiento.....      | 100 |
| Figura 5-15: Comportamiento de la temperatura de salida. ....                             | 102 |
| Figura 5-16: Comportamiento de la humedad del aire de salida. ....                        | 103 |
| Figura 5-17: Prueba 1 .....   | 105 |
| Figura 5-18: Prueba 2 .....   | 106 |
| Figura 5-19: Prueba 3 .....   | 106 |
| Figura 5-20: Prueba 4 .....   | 107 |
| Figura 5-21 Peso inicial y final del café .....   | 109 |



## Índice de tablas

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 2-1: Funciones de membresía de un conjunto difuso .....   | 28  |
| Tabla 3-1: Descripción de los componentes utilizados en la instrumentación .....  | 38  |
| Tabla 3-2: Características determinantes para la selección del sensor.....  | 39  |
| Tabla 3-3: Valores de Referencia (a) Humedad y (b) Temperatura.....   | 40  |
| Tabla 3-4: Relación voltaje-temperatura.....  | 42  |
| Tabla 3-5: Características del sensor de presión PSI-100 .....  | 45  |
| Tabla 4-1: Relación de rangos y bits del conjunto de la variable temperatura .....  | 60  |
| Tabla 4-2: Relación de rangos y bits del conjunto de la variable Presión.....   | 61  |
| Tabla 4-3: Función de membresía y grado de pertenencia para la variable Temperatura...  | 64  |
| Tabla 4-4: Función de membresía y grado de pertenencia para la variable Presión .....   | 65  |
| Tabla 4-5: Descripción de los componentes de la Interfaz gráfica. ....  | 78  |
| Tabla 4-6: Descripción de los componentes numerados en la interfaz gráfica.....   | 82  |
| Tabla 5-1 Parámetros del sistema.....   | 87  |
| Tabla 5-2: Parámetros de comparación .....  | 88  |
| Tabla 5-3: Parámetros de Strejc.....  | 89  |
| Tabla 5-4: Parámetros del sistema.....  | 92  |
| Tabla 5-5: Parámetros de comparación .....  | 94  |
| Tabla 5-6: Comparativo de los diferentes modelos obtenido por el método de Strejc .....   | 94  |
| Tabla 5-7: Parámetros de Strejc.....  | 95  |
| Tabla 5-8: Área y porcentaje de error del comportamiento de la presión de entrada por el método de Simpson. ....                                | 99  |
| Tabla 5-9: Área y porcentaje de error del comportamiento de la temperatura interna de la cámara de calentamiento por el método de Simpson. .... | 99  |
| Tabla 5-10: Comparativos de tiempos de las diferencias de presiones obtenidas vía experimental y por medio de la ecuación física.....           | 101 |



## Introducción

En la degustación de una taza de café nos percatamos que son muchos los factores que intervienen para obtener un producto de calidad. Las variables, medios y afectaciones externas que puedan incidir sobre el producto pueden marcar una diferencia en las propiedades del mismo. Las variables del medio antes, durante y después del proceso de secado inciden sobre las propiedades del producto. Es por ello que surge la necesidad de controlar el mayor número de variables que intervienen en la obtención del producto final.

En general, el proceso de secado del café no se encuentra totalmente automatizado ni bajo un criterio de control previamente establecido donde se tenga una interrelación, monitoreo y especificación de cada una de las variables que inciden en el proceso.

La automatización y control están orientados a mantener la eficiencia y rendimiento de un proceso determinado mediante el uso de sistemas o elementos computarizados encaminados a mejorar la calidad y productividad. El desarrollo de los sistemas automáticos data desde los años 60's con la incursión de las computadoras digitales, sin embargo sus inicios remontan desde el siglo XVIII con las primeras máquinas simples sustituyendo una forma de esfuerzo por otra forma que fueran manejadas por el ser humano [24].

Sin embargo, el alcance de automatizar y controlar va más allá que la simple mecanización de los procesos ya que ésta provee a operadores humanos mecanismos para asistirlos en los esfuerzos físicos del trabajo. La automatización reduce ampliamente la necesidad sensorial y mental del humano, abarcando la instrumentación industrial, que incluye los sensores y transmisores de campo, los sistemas de control y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos, y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar y controlar las operaciones de plantas o procesos industriales.

Un sistema de control en base a Lógica difusa no sólo considera que hay una infinidad de valores semánticos entre "verdadero y falso", sino que es un tipo de controlador lógico capaz de resolver problemas relacionados con la incertidumbre de la información o del conocimiento, considerada la lógica difusa como una herramienta eficaz en el manejo de variables que presentan cierto grado de incertidumbre, [30] por lo que se pretende el desarrollo de un sistema de control por aplicación de lógica difusa para el establecimiento y control de las variables ( presión, temperatura, humedad relativa, flujo másico) y una optimización en el actual funcionamiento del proceso, obteniendo de esta forma un proceso estable que permita dar como resultado un producto de calidad, en menor tiempo y costo.



## Antecedentes

En este segmento se muestran los proyectos realizados en materia de control y automatización de secado de granos, específicamente café. En éste ámbito se han desarrollado algunos sistemas de secado orientado a la mejora del proceso y optimización del mismo.

Para obtener el secado de un grano con una serie de características deseadas, es necesario analizar la complejidad en el control y manejo del proceso, el cual está determinado de acuerdo a la naturaleza y objetivo que este conlleva.

Se ha incursionado en el diseño de sistemas de control orientados al proceso de secado aunque no directamente orientado al secado de café; tal es el caso de un trabajo realizado en Colombia (*“Revista Colombiana de Tecnología de Avanzada”*<sup>1</sup>) donde; debido a la demanda de los productos alimenticios la microempresa Colombiana dedicada a la producción y su comercialización diseñó un sistema que controla de forma automática la temperatura y el tiempo de secado.

Las aplicaciones de los sistemas de control ofrecen una amplia gama de opciones en el control del proceso, el cual, está definido directamente por la naturaleza del mismo, variables que se pretenden controlar, refiriéndose a los sistemas de control basados en lógica difusa que permiten controlar subsistemas y procesos industriales más complejos. Ejemplo de esta naturaleza se puede citar el trabajo titulado *“Diseño de un algoritmo de control basado en lógica difusa aplicado a un secador de tambor rotario de alimentos”*<sup>2</sup> que hace referencia sobre la importancia del número de parámetros que tienen influencia sobre el proceso y las interacciones entre ellos haciendo un sistema complejo, en el que se realiza la comprobación de diferentes modelos que describen el comportamiento de las variables como son: un modelo dinámico mixto, un modelo empírico y un control clásico proporcional. Mediante el desarrollo del algoritmo de control se regularizaron las variables de estado del secador dentro de los límites convenientes con el fin de obtener un producto homogéneo con una humedad deseada. Así mismo, el trabajo realizado por Elkin Mauricio López Fontal (2005) titulado, *“Sistemas de lógica difusa en el proceso de secado de café en lecho fluidizado”*<sup>3</sup>, desarrolla un prototipo donde el café es sometido a varias temperaturas de secado a un determinado tiempo durante el cual se obtuvo un producto con humedad final uniforme, y con características organolépticas de buena calidad.

---

<sup>1</sup> *Diseño de un sistema de Control del proceso de secado de pastas alimenticias*. Ms.C. Antonio Gan Acosta, Ing. Nydia Susana Sandoval Carrero.

<sup>2</sup> Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Instituto Tecnológico de Veracruz.

<sup>3</sup> Elkin Mauricio López Fontal. 2005. Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería e Investigación.



Las técnicas usadas para el desarrollo de los sistemas de control se incursionan en las diferentes necesidades de secado de granos y frutas, donde se han realizado pruebas experimentales con diferentes diseños que se adaptan al producto a secar. Tal es el caso del estudio *“Development of a semi-industrial multi fruit dryer system using simultaneous intelligent control”* [15], desarrollado en la universidad de Putra Malaysia; en este estudio se presenta una máquina semi-industrial para el secado de diferentes tipos de frutas, en el cual se utilizó un microcontrolador y sensores de temperatura y humedad. Un estudio similar es el estudio desarrollado por Ilhan Ceylan con el trabajo titulado: *“Energy analysis of PID controlled heat pump dryer”* donde se diseñó y manufacturó una bomba secadora y se controló la temperatura por medio de un PID fue utilizado para secar Kiwi, aguacate y bananas con parámetros de temperatura alrededor de los 40°C.

De igual forma se ha incursionado en otros métodos de secado como es el caso del trabajo realizado en la Universidad Politécnica de Valencia, en *“Desarrollo de un sistema de secado mediante lecho fluido Asistido por ultrasonidos de potencia”*<sup>4</sup>, en el cual se da la aplicación de ultrasonidos de potencia en la deshidratación de materiales porosos enfocada a procesos en los que se traten materiales altamente sensibles al calor.

De manera similar se han realizado estudios comparativos en sistemas híbridos de control. En el trabajo realizado por Flavio Torres, Carlos Muñoz, Ivan Velásquez y Carolina Shene, titulado *“Control difuso para una planta piloto de secado por lecho fluidizado”* [34] se presenta un control difuso proporcional-prealimentado (CDPP) aplicado a un proceso de secado por lecho fluidizado de material húmedo. El CDPP se somete a diferentes experimentos y se compara ventajosamente con el control difuso proporcional-integral (CDPI), donde según los resultados obtenidos se observa que el CDPP tiene un mejor comportamiento que el CDPI ya que con él no se observan oscilaciones en la salida, aspecto clave para el correcto funcionamiento del proceso de secado por fluidización.

Por otro lado los sistemas de control avanzado han tenido su participación en el enfoque de secado como tal es el caso del trabajo realizado por Leena Yliniemi (1999) titulado *“Advanced control of a rotary dryer”* [39], en el cual se explican las oportunidades de desarrollar una operación de secado eficiente mediante la aplicación de los sistemas de control, así como también la eliminación de las perturbaciones de las variables de entrada mediante la construcción de un modelo basado en lógica difusa y redes neuronales, el resultado del estudio demostró que los controladores avanzados son muy adecuados para el control del secador rotatorio.

---

<sup>4</sup> Instituto de Acústica, Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia.



---

La aplicación del sistema de lógica difusa [1] proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta, donde sus áreas de aplicación están orientadas a problemas de interfaces hombre/máquina, problemas no lineales variante en el tiempo y clasificación de problemas.

Mediante el análisis del desarrollo del sistema de control y grado de aplicación se pretende analizar la incidencia sobre la optimización del proceso de secado.



## Justificación

En el proceso de secado de café uno de los principales factores que influye en la calidad del producto es la humedad. Los granos húmedos constituyen un medio ideal para el desarrollo de microorganismos e insectos que dañan al producto y deterioran su aspecto, el cual es característica fundamental para obtener un grano de calidad.

Una vez despulpado<sup>5</sup> y lavado, es cuando se inicia el proceso de secado, en dicho proceso se utilizan medios mecánicos y naturales (secado en patio, guardiolas, domos de energía solar) con control de la temperatura y humedad de grano, lo cual es fundamental para obtener un producto de calidad. Algunos otros procesos han puesto en funcionamiento el monitoreo de los caudales de aire ingresados a las secadoras, el uso de la energía solar, el monitoreo del consumo eléctrico y el de subproductos, buscando optimizar el proceso de secado y los recursos energéticos.

Aunque estos métodos garantizan que el grano adquiera el porcentaje de humedad necesario para su posterior procesamiento, todo conlleva a una serie de inconvenientes como son el tiempo, espacio, condiciones a las que es expuesto el producto (intemperie y exposición a productos de combustión interna), rendimiento y eficiencia del proceso.

El presente proyecto surge de la necesidad de desarrollar un sistema de control que disminuir el porcentaje de humedad contenido en los granos de café mediante el control de las principales variables que intervienen en el proceso y que son determinantes para la calidad del grano. Es aplicado el sistema de lógica difusa ya que la naturaleza del proceso de secado de café se puede considerar como un proceso de incertidumbre donde ciertas partes del proceso no pueden medirse de forma directa y, sobre todo, la incidencia de ciertas variables sobre otras que gobiernan el proceso mismo.

Mediante el desarrollo y ejecución del sistema de control se pretende primeramente mejorar el proceso mediante la utilización de colectores solares como fuente de energía para garantizar el calentamiento del flujo que permita llevar a cabo el proceso de secado, aprovechando de esta forma la energía solar como el recurso energético, el control de las variables incidentes, el aprovechamiento del espacio, el rendimiento, la eficiencia sin afectar la calidad del producto.

---

<sup>5</sup> Esta operación consiste en la separación mecánica de la cáscara del grano.



---

## Planteamiento del problema

Una de las etapas más importantes durante el procesamiento del café es el secado, el cual consiste en eliminar gran parte del agua del grano. La cantidad de agua en el grano se estima mediante la medición de humedad y es necesario que su variación sea desde un 60-65% de humedad inicial hasta un 10 o 12% final.

Actualmente, y en la mayoría de las ocasiones, el café es secado en forma natural, expuesto al aire libre con energía solar, o en forma artificial donde se utiliza aire forzado siendo calentado mediante algún sistema intercambiador para luego entrar en contacto con los granos. Ambos métodos presentan ciertas desventajas especialmente en la exposición de la integridad del producto, en los cuales intervienen de manera significativa el control de las variables del proceso que permiten obtener un secado homogéneo, a un tiempo determinado, preciso, efectivo sin ocasionar daños al producto final.

Existen diferentes aplicaciones del secado del café donde han intervenido diferentes sistemas de control, sin embargo en dichos sistemas, se continua utilizando aire forzado y elementos fósiles para su calentamiento. Investigaciones realizadas analizan la importancia del control de las variables, determinación de las condiciones idóneas del aire en contacto con el grano a secar, y sobre todo la factibilidad del sistema de control en responder de manera efectiva y rápida ante perturbaciones incidentes en el proceso.

El sistema de control por lógica difusa es una herramienta eficaz en el manejo de las variables con cierto grado de incertidumbre y que requieren alta precisión, y no es necesario que este tipo de sistema esté representado por un modelo matemático para poder ser aplicado. Motivo por el cual se desarrolló y aplicó una estrategia para el monitoreo y control del flujo de aire necesario a la temperatura deseada para ser utilizado en el proceso de secado de café dando como resultado la disminución del porcentaje de humedad del aire hasta alcanzar valores comprendidos entre el 10 y el 12% de humedad. Una característica principal de este sistema de secado es que el calentamiento del aire se obtiene por medio de un concentrador cilindro parabólico, donde fue necesario realizar el acondicionamiento de los sensores garantizando de esta manera las condiciones óptimas para la aplicación del sistema de control.



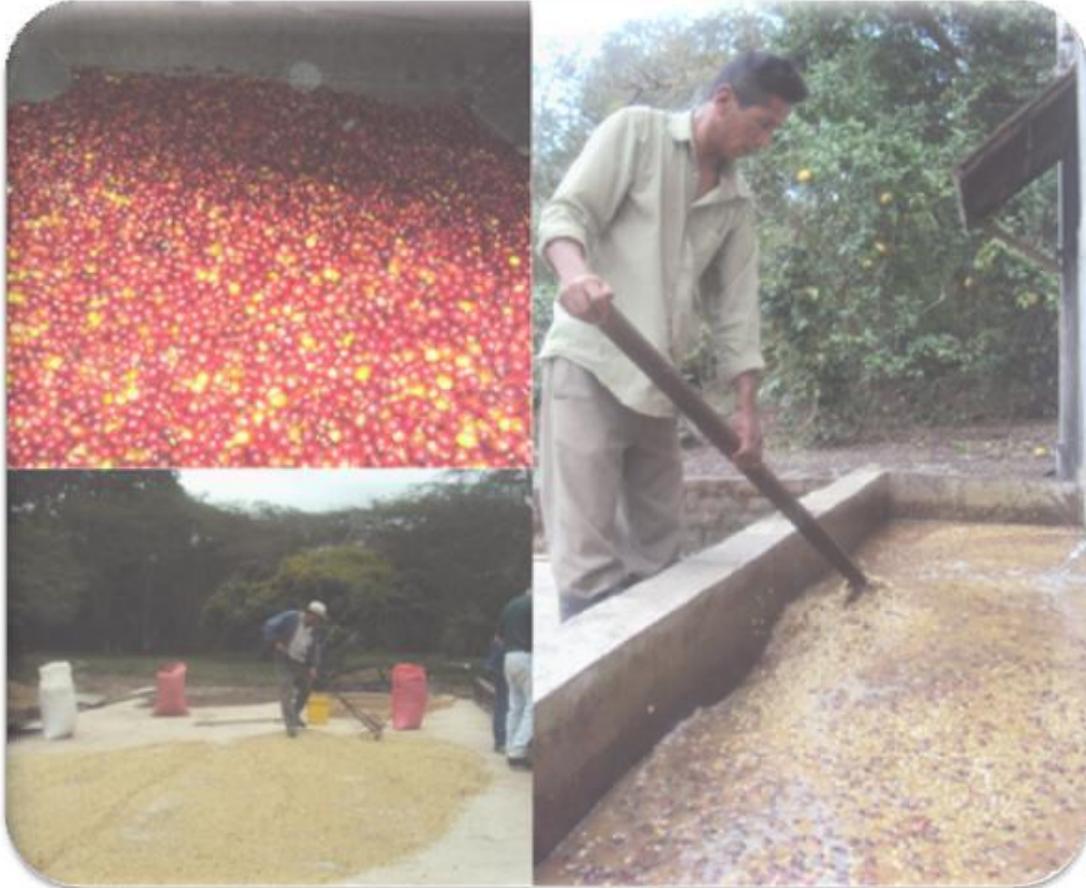
## **Objetivo general**

Diseñar un sistema de control con aplicación de lógica difusa para controlar la temperatura interna y presión del aire de una máquina secadora de café que emplea energía solar.

## **Objetivos específicos**

1. Desarrollar una estrategia de control mediante la aplicación de lógica difusa de la máquina de secado de café de acuerdo a las variables del proceso a controlar: presión, temperatura interna, humedad relativa y flujo del aire.
2. Realizar la programación del sistema de control difuso en el ambiente gráfico de programación de LabVIEW.
3. Simular el sistema de control para determinar la capacidad del proceso de secado de café con su implementación en el prototipo construido.

# CAPÍTULO 1



## GENERALIDADES

En este capítulo se presentan los temas necesarios para comprender los métodos de secado actuales y analizar los procedimientos automatizados orientados al secado de café.



## 1. Generalidades

Una de las etapas del proceso del café es el secado (ver Figura 1-1); afectaciones externas que puedan incidir sobre el producto puede marcar una diferencia notable. Una vez que se ha efectuado el corte del café, con una madurez idealmente homogénea, se procede a separar los granos “vanos” o defectuosos de los “buenos”. Posteriormente se realiza el beneficiado húmedo, que es el proceso físico por medio del cual el grano es liberado de la cáscara y pulpa<sup>6</sup> que lo cubren. Esta práctica consiste en friccionar el fruto entre dos discos de metal para la separación, usando agua para facilitar la tarea. El resultado del beneficiado húmedo es el café pergamino, nombre que se le da por la película o mucílago que todavía lo envuelve y que no es soluble en agua, por lo que debe fermentarse durante 24 horas en tanques de agua, seguidamente viene el secado del grano el cual se puede hacer en patios de cemento en los que se tiende el café por un periodo de aproximadamente cinco días<sup>7</sup>, durante los cuales se mueve a intervalos regulares para evitar un secado parcial. En plantaciones mayores también se recurre a secadoras que funcionan con diesel o gas, lo que reduce significativamente el tiempo de secado pero presenta los inconvenientes climáticos de las zonas cafetaleras y afectaciones al producto [30].



Figura 1-1: Esquema del proceso del café

### 1.1. Métodos de secado utilizados actualmente

La experiencia y estimados preliminares indican que el secado tiene una importancia decisiva en la obtención de un grano comercializable de alta calidad. El principal factor que influye en la calidad del café almacenado es la humedad. Los granos húmedos constituyen un medio ideal para el desarrollo de microorganismos e insectos que dañan el producto y deterioran su aspecto.

Los métodos de secado más comunes que son utilizados actualmente pueden ser clasificados en los que utilizan energía renovable, y los convencionales que no utilizan fuente de energía aprovechable [9].

<sup>6</sup> Cáscara superficial que recubre el grano de café

<sup>7</sup> Esta en dependencia de la zona donde se de el cultivo por las variaciones del clima



### **1.1.1. Secado mixto y artificial.**

Son los tipos de secadoras artificiales que sólo dependen del calor producido por la combustión de la madera, el gas, el petróleo o la electricidad o así mismo combinados con algún tipo de energía renovable y que a menudo tienen ventiladores para incrementar su potencial de secado.

#### **1.1.1.1. *Guardiolas.***

Podría definirse como un secado de convencional que consiste en un tambor rotatorio en donde son introducidos los granos de café y secados a base de material combustible (ver Figura 1-2 - a). Este proceso trae consigo falta de homogeneidad en el secado, añadiendo las fuentes de emanaciones de CO<sub>2</sub> dirigidas hacia la atmósfera [3].

#### **1.1.1.2. *Secadora solar de biomasa McDowell con auxilio de combustible.***

El diseño original fue propuesto por McDowell para superar los problemas de secado en zonas húmedas tropicales (ver Figura 1-2 - b). La bandeja de secado con el producto se ubica debajo de un techo solar convencional provisto de doble hoja de material transparente. El aire ingresa a la cámara a través de los orificios situados debajo de la bandeja. Esta secadora tiene una caja de fuego conectada a tuberías de retención de calor que pasan por debajo de la bandeja hacia una chimenea externa [3].

#### **1.1.1.3. *Secadora de bandejas.***

Consiste en una cámara de secado con bandejas apiladas a través de las cuales circula el aire caliente, y que es suministrado por un inyector de aire caliente ubicado en la parte inferior (ver Figura 1-2- c). Existen dos tipos de secadoras de bandejas: las secadoras por tandas y las semicontinuas. La más simple es la secadora por tandas, en la cual la cámara se llena con bandejas que contienen el producto y el aire circula hasta que toda la tanda esté seca. En una secadora semicontinua un sistema mecánico permite que la bandeja que se seca primero sea retirada de la secadora (usualmente será la que se encuentra abajo, pues está más cerca de la fuente de calor). Las demás bandejas deben acomodarse dejando un espacio libre en la parte superior, donde se coloca una nueva bandeja con producto fresco [3].

#### **1.1.1.4. *El horno de Ceylon.***

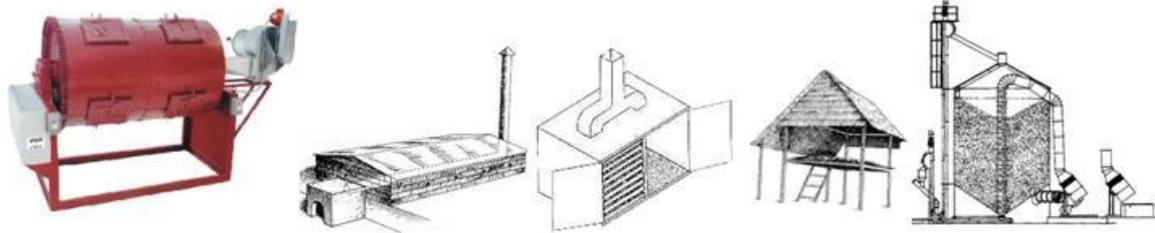
Este modelo es un ejemplo de secadora de biomasa de fuego directo (ver Figura 1-2 - d). La secadora consiste en un quemador que se ubica en el suelo y una parrilla o plataforma de secado, todo ello protegido por una simple estructura con un techo [3].

#### **1.1.1.5. *Silo secador.***

Cuenta con una cámara superior para grano húmedo y un generador de aire caliente para secarlo. Cuando el producto ha alcanzado la humedad deseada, se abren los vertederos



mecánicos de descarga y éste cae al fondo del silo. Un ventilador inferior impulsa hacia arriba aire exterior para enfriarlo (ver Figura 1-2- e). A su vez este aire al calentarse actúa como precalentado del grano húmedo en la cámara superior [22].



a) Guardiolas    b) Secadora solar de biomasa.    c) Secadora de bandejas    d) Horno de Ceylon    e) Silo secador

**Figura 1-2: Secadoras de café mixto y artificial**

### **1.1.2. Secado que utiliza fuente de energía renovables.**

En búsqueda de un proceso amigable con el ambiente y evitar incrementar el grado de contaminación actual<sup>8</sup> se han desarrollado nuevas alternativas dirigidas al aprovechamiento de fuentes renovables donde cobra fuerza e interés las opciones solares.

#### **1.1.2.1. Secado en patio.**

El secado en patio es el más típico y generalizado de los sistemas de secado de café. En la Figura 1-3 (a) se muestra uno de los patios típicos de secado, el cual consiste en exponer el producto durante varias horas o días a los rayos directos del sol, removiéndolo periódicamente hasta que su humedad se haya reducido. Se necesita extraer aproximadamente del 43% al 48% de agua con relación a su peso total. El secado en patio es un proceso simple sin embargo trae consigo ciertos factores como la temperatura baja, humedad relativa, implicaciones de tipo operativo que pueden dificultar su total ejecución sin repercusión, así como la exposición del producto a la intemperie del medio expuesto.

#### **1.1.2.2. Secador solar tipo invernadero**

Consiste básicamente en una estructura de madera que puede ser de sección cuadrada o rectangular, el exterior se encuentra cubierto por plástico especial para invernadero el cual tiene un tratamiento para resistir la intemperie y la degradación causada por los rayos de sol. En el interior se colocan tarimas construidas con madera y malla de acero sobre las cuales se colocan los granos de café [27] su estructura se puede ver en la Figura 1-3 (b). Es importante mencionar los invernaderos tipo parabólico donde el sistema básico es

<sup>8</sup> Siendo México el 4<sup>to</sup> productor de emisión de CO<sub>2</sub> a nivel mundial



aprovechar el efecto invernadero para producir una concentración de calor debido al principio físico que involucra.

#### 1.1.2.3. *Secador multipropósito.*

Está constituido por una estructura de perfiles metálicos en forma de paralelepípedo, garantizando la impermeabilización con una cubierta de vidrio transparente. Dentro del secador se efectúa el movimiento de aire forzado por medio de ventiladores. El producto está colocado sobre zarandas de malla metálica [30]. Ver Figura 1-3 (c)

#### 1.1.2.4. *Tambor rotatorio.*

Constituido por una estructura metálica de la misma forma paralelepípedo, posee una doble cubierta de vidrio transparente, el tambor colocado en el interior de la cámara de secado formado por un doble cilindro metálico de chapa de acero perforada, encargado de captar la radiación solar, y en el espacio anular entre los dos cilindros se coloca el producto por secar [30]. Ver Figura 1-3 (d).



a) Secado en patio b) Secador solar tipo invernadero c) Secador solar Multipropósito d) Secador solar rotatorio

Figura 1-3: Secadores de café que utilizan energía solar

#### 1.1.3. **Sistemas automatizados en el proceso de secado.**

En la mayoría de las secadoras, el control de la misma es manual. El operario debe medir periódicamente la humedad de salida de los granos para regular el dispositivo descargador de la máquina para adecuarlo a la humedad de entrada. Cuando ingresa el grano de mayor humedad se debe reducir la velocidad de descarga del grano seco (para que el grano tenga más tiempo de permanencia dentro de la secadora). Si posteriormente ingresa grano con menor porcentaje de humedad, se produce al contrario, y es necesario acelerar la velocidad de descarga, pues, de no hacerlo, el grano saldría sobresecado. Por estas razones, desde hace tiempo se ha pensado en desarrollar algún sistema que permita automatizar este trabajo. Desde hace algunos años se han presentado algunos controles que trabajan satisfactoriamente. En general, se trata de medidores automáticos que monitorean continuamente la humedad de entrada y de salida del grano de la secadora. Con estos datos, por medio de dispositivos electrónicos accionados por microprocesadores y computarizados, se manda una orden al sistema de descarga para que acelere o reduzca el caudal de salida del grano seco. Este procedimiento permite que la humedad de salida del grano permanezca muy cercana a las consignas de humedad fijadas; sin embargo,



cuando el control es manual, esas humedades presentan variaciones superiores, es decir que se manifiesta un secado no uniforme.

Las secadoras artificiales han tenido un gran impacto como lo son el *Control Para Secador de Café – CPUSG*, que es un dispositivo que permite el funcionamiento automático de un secador de café a gas de tal manera que el usuario solo debe indicar la temperatura máxima de secado y el tiempo que estará encendido el secador [28].

Con el desarrollo de la tecnología, se han realizado intentos de diseñar un sistema que controle de forma automática la temperatura y el tiempo de secado, que regule el caudal de aire o medio de secado; donde no únicamente se ha tratado de enfocarse en el secado de un grano en específico, sino también para usos múltiples. A continuación se presentan algunos de los trabajos desarrollados relacionados con el secado donde se incursionan diferentes sistemas de control clásico, avanzados e híbridos, con diferentes objetivos de control.

### “Control difuso para una planta piloto de secado por lecho fluidizado” [34]

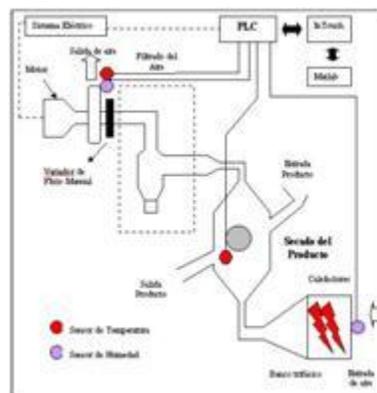


Figura 1-4: Esquema general de la planta piloto

Se utiliza un control difuso proporcional prealimentado CDPP y se compara con un control difuso proporcional integral.

Se desarrollaron dos algoritmos de control para controlar la temperatura de un secador de lecho fluidizado a escala piloto. En el algoritmo de CDPP se incorporó una prealimentación difusa de la referencia con un notorio mejoramiento con respecto al control difuso PI por la rapidez de la respuesta y disminución de las fluctuaciones.



**“Diseño de un algoritmo de control basado en lógica difusa aplicado a un secador rotario de alimentos” [36].**

Debido a la complejidad del proceso en la aplicación de este diseño se analizaron diferentes modelos, un modelo dinámico mixto, un modelo dinámico empírico un control clásico proporcional integral y aplicaciones de lógica difusa, desarrollando un algoritmo de control basado en lógica difusa para regular las variables de estado de un secador de tambor rotatorio dentro de los límites convenientes con el fin de obtener un producto homogéneo y con una humedad deseada.

La utilización de la lógica difusa como una estrategia de control en el proceso de secado sobre tambor rotatorio resultó ser satisfactoria para regular las variables del proceso y absorber las incertidumbres de modelado del mismo.

**“Caudal del flujo másico y caudal de aire para un ventilador utilizados en silos para secado para café” [25].**

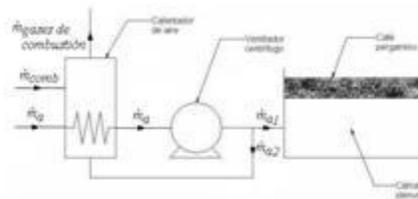


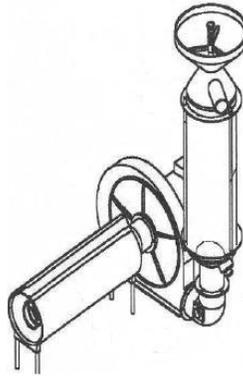
Figura 1-5: Diseño esquemático del flujo másico y caudal de aire

Se establece una metodología para calcular el flujo másico y el caudal de aire que debe de suministrar un ventilador con el objetivo de secar una masa de café en un silo.

Se desarrolló un modelo termodinámico para estimar el flujo másico, y el caudal que debe mover el ventilador utilizado para secar cualquier masa de café para diversos tiempos de secado.



**“Secado de café en lecho fluidizado” [19].**



**Figura 1-6: Equipo de secado de café utilizado**

Se emplea el secado mediante fluidización, en un prototipo de 5000 gramos de capacidad, secando café en 3 condiciones de temperatura 42, 46 y 49°C con una variación en el tiempo de secado entre 6 y 8 horas.

A una temperatura de 46°C y 21% de humedad se obtiene un tiempo de secado de 8 horas, a una temperatura de 49 °C y humedad de 19% se obtiene un tiempo total de 7 horas. El secado de café en lecho fluidizado no altera las características organolépticas del café.

**“Sistemas de lógica difusa en el proceso de secado de café en lecho fluidizado” [20]**

Como complemento al trabajo realizado anteriormente y teniendo en cuenta el grado de incertidumbre del proceso, mediante el sistema de lógica difusa se plantean en forma preliminar algunas posibles estrategias de control y automatización para establecer el punto de fluidización de los granos húmedos, control de la velocidad superficial del aire y usar una temperatura de secado mayor a los 50°C.

Los sistemas de lógica difusa se presentan como una alternativa favorable para el control y automatización del proceso de secado de café en lecho fluidizado, teniendo en cuenta su grado de incertidumbre, mostrando resultados satisfactorios en el control de la curva de caída de presión Vs frecuencia obtenida experimentalmente.



“Development of a semi-industrial multi fruit dryer system using simultaneous intelligent control” [15].

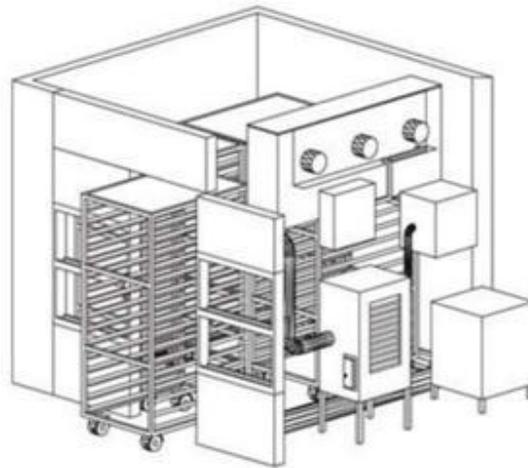


Figura 1-7 :Diseño de la máquina secadora de frutas

Dispositivo que se emplea para secar diferentes tipos de frutas, y en el cual se empleó un microcontrolador para monitorear las variables.

El mecanismo fue probado con tres diferentes frutas: Manzanas secadas a 75°C con una duración de 300 minutos, bananas a 60°C con una duración de 500 minutos, y ciruelas a 70°C durante 3000 minutos.

“Energy análisis of Pid controlled heat pump dryer” [5].

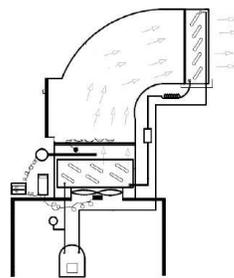


Figura 1-8: Diagrama esquemático del procedimiento

Es una máquina secadora donde la temperatura es controlada por un PID, fue probada para el secado de Kiwi, aguacate y banana, considerando cambios en la temperatura entre 40 °C.



El control PID fue analizado experimentalmente en el secado de frutas tropicales. El control de la temperatura estuvo en el rango de los 40°C, el diseño requiere la utilización de otra fuente de calentamiento para el secado. Es necesario ejercer un control de la velocidad del aire para que no afecte la temperatura del equipo.

**“Secador para grano y materiales granulares en general” [32].**

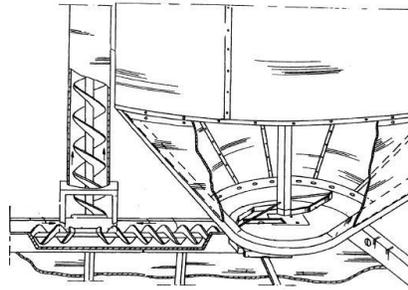


Figura 1-9: Diseño de la máquina secadora de café

Un secador con recirculación para granos y materiales que comprende una cámara de secado y un transporte vertical de tornillo sin fin asociados a la cámara para recoger el material.

Proporciona un secador perfeccionado de alto rendimiento que puede hacer un uso máximo del volumen de su cámara de secado, garantizando la circulación y mezcla del material para impedir el estancamiento del mismo.

**“Dispositivo que utiliza energía solar, especialmente para secar y tostar productos agrícolas, así como productos de procesamiento de alimentos, finalizar la destilación y la evaporización y separar compuestos complejos” [11].**

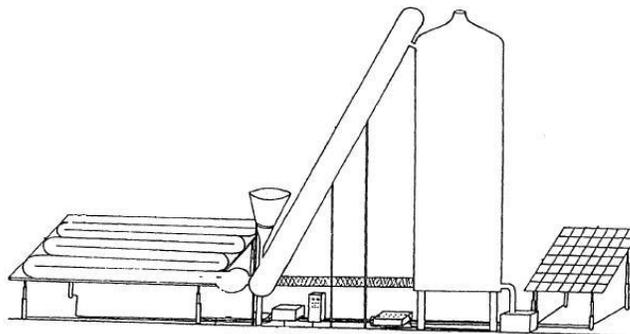


Figura 1-10: Esquema general de la máquina secadora de café



Dispositivo que utiliza energía solar para secar y tostar productos agrícolas, el cual consta de colectores ajustables a la dirección de la radiación del sol y un sistema que transfiere la energía térmica acumulada por los colectores.

Implementa el movimiento/seguimiento solar de los colectores planos y de los colectores cilíndricos paraboloide en dos direcciones y utiliza de forma económica la energía térmica en el sistema de absorción de calor de los colectores.

“Advanced control of a rotary dryer” [39].

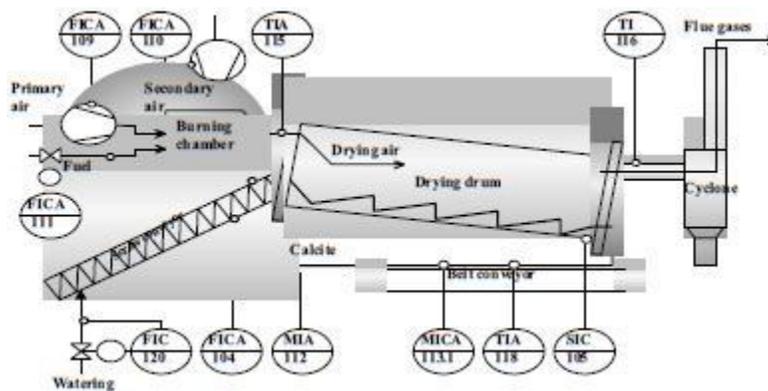


Figura 1-11: Planta piloto de secado

Se desarrolló un control híbrido basado en: Lógica difusa, PI, y Redes Neuronales. Cada uno fue analizado con simulaciones y experimentos en una planta piloto.

Según las evaluaciones realizadas, el control realimentado es el que presenta mayor estabilidad de control, sin embargo para su desarrollo se requiere de una gran cantidad de conocimientos teóricos y experimentales, por lo que el sistema de control por lógica difusa es el más atractivo para desarrollarlo, de igual manera el control con aplicación de redes neuronales y PI da un desarrollo aceptable.

“Diseño del sistema de control del proceso de secado de pastas alimenticias” [10].



Figura 1-12: Sistema de control aplicado



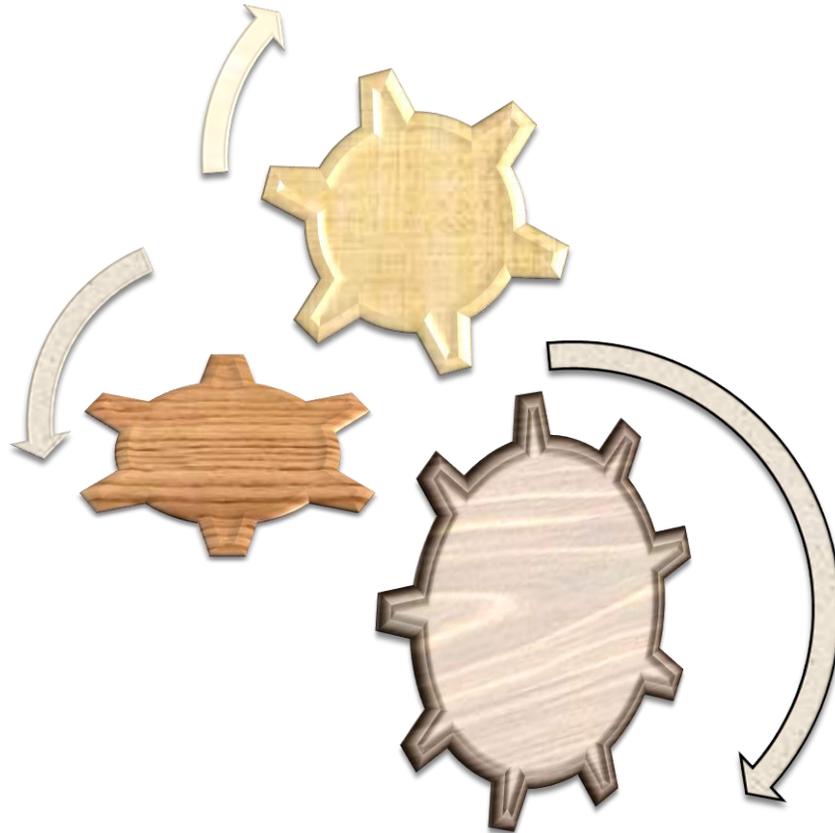
Diseño de un sistema que controle de forma automática la temperatura y el tiempo de secado a través de la climatización, variable de una zona condicionada para tal efecto; su impacto se ve reflejado en la calidad y costos de producción.

Desarrollo de una herramienta con la que se controla el proceso de secado de pastas, sin tener una dependencia de la temperatura ambiente, además es un proceso supervisado virtualmente en tiempo real.

En lo referente a la aplicación de otros sistemas de control tomando en consideración el grado de incertidumbre que encierra al proceso se hace un plantemamiento preliminar de algunas posibles estrategias de control y automatización mediante sistemas de lógica difusa en la aplicación de lecho fluidizado relacionadas con establecer el punto de fluidización de los granos húmedos y control de la velocidad superficial del aire [20]. En este proceso los sólidos húmedos del lecho son secados por inyección de aire caliente, a su vez el aire caliente se obtiene al hacer pasar aire del medio ambiente a través de una cámara de calefactores eléctricos.



# CAPÍTULO 2



## SISTEMAS DE CONTROL

En este capítulo se presentan los temas necesarios para comprender mejor el objeto del proyecto realizado tales como diseño de sistemas de control, sistemas de control clásico y sistemas de control avanzados.



## 2. Sistemas de Control

Esta área de conocimiento se ha desarrollado en los últimos 60 años de una manera sorprendente, siendo una de las principales áreas de estudio, gracias a su enfoque multidisciplinario tanto de su campo de estudio como de aplicación a diferentes sistemas [11]. Conociendo que un sistema de control es el que está constituido por un conjunto de elementos conectados de tal forma que permiten regular o gobernar otro sistema denominado planta o proceso [1].

### 2.1. Sistema de control clásico.

Existen dos tipos básicos de sistemas de control clásico.

#### 2.1.1. Sistema de control de lazo abierto

En este tipo de sistema de control la salida del proceso no afecta a la acción de control, es decir, la salida no se mide ni se retroalimenta para compararla con la entrada por lo que requiere un completo conocimiento del proceso a controlar y la garantía del correcto funcionamiento del controlador, que no tiene acceso a la señal de salida del proceso. Por lo tanto para un sistema de control de lazo abierto, la entrada de referencia corresponde a una condición de operación fija. Así la precisión del sistema depende de la calibración [24]. En la Figura 2-1 se puede observar que el sistema no cuenta con retroalimentación, por lo tanto la salida no afecta la acción del control.

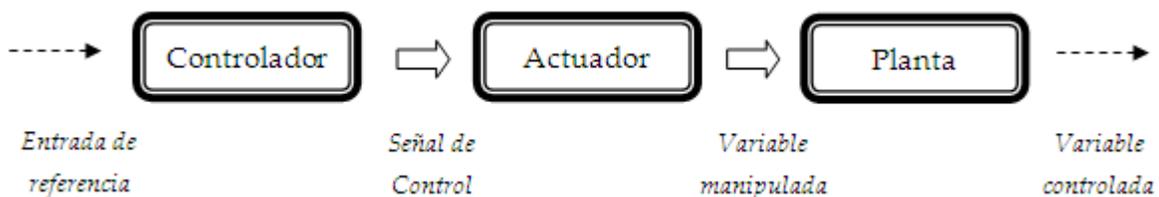
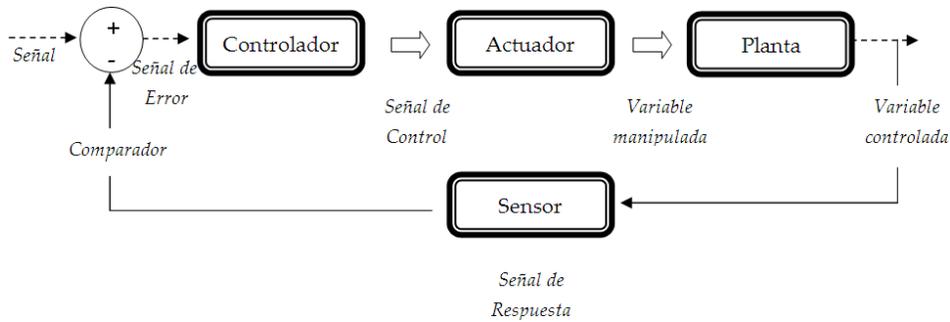


Figura 2-1: Sistema de control de lazo abierto

#### 2.1.2. Sistema de control de lazo cerrado.

Con frecuencia se les llama así a los sistemas de alimentación retroalimentados. La señal de error actuante, que es la diferencia entre la señal de entrada y la de retroalimentación (que puede ser la señal de salida o una función de esta señal o una derivada), entra al control para reducir el control y llevar la señal de salida a un valor deseado. El término de lazo cerrado implica siempre el uso de la acción de control retroalimentado para reducir el error del sistema [24]. En la Figura 2-2 se observa cómo la señal de error alimenta al controlador, teniendo incidencia directa sobre el actuador.



**Figura 2-2: Sistema de control de lazo cerrado**

Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Por tanto es posible usar componentes relativamente precisos de bajo costo para obtener el control adecuado de una planta determinada. Por otro lado la estabilidad es una función principal en el sistema de control en lazo cerrado, lo cual puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o variable [24].

### 2.1.3. Elementos básicos de un sistema de control.

#### 2.1.3.1. Comparador.

Compara el valor deseado o referencia de la condición variable que se controla con el valor medio de lo que se produce y genera una señal de error. Se puede considerar que suma la señal de referencia, positiva a la señal del valor medio, que en este caso es negativa.

$$\text{Señal de error} = \text{Señal de referencia} - \text{Señal del valor medido}$$

#### 2.1.3.2. Controlador.

En cuanto recibe una señal de error el controlador decide que acción llevar a cabo, lo que puede representar una señal para accionar un interruptor o abrir una válvula. El plan de control podría consistir en entregar una señal que encienda o apague un dispositivo al producirse un error.

#### 2.1.3.3. Elemento de actuación.

El elemento de actuación produce un cambio en el proceso a fin de corregir o modificar la condición controlada. El término actuador designa al elemento de una unidad de corrección que proporciona la energía para realizar la acción de control.

#### 2.1.3.4. Proceso.

El proceso es aquello que se está controlando, se define como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales



que se suceden uno al otro en forma relativamente fija y que conducen a un resultado determinado.

#### 2.1.3.5. Elemento de medición.

El elemento de medición produce una señal relacionada con el estado de la variable del proceso que controla.

#### 2.1.4. Clasificación de los controladores industriales.

Se pueden clasificar de acuerdo a su naturaleza de acción. El tipo de controlador que se use debe decidirse con base en la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales, incluyendo consideraciones tales como seguridad, costo, disponibilidad, precisión, peso y tamaño [17], [24].

##### 2.1.4.1. Acción de control proporcional

En los casos en que se requiera una acción de control más suave, puede utilizarse un controlador proporcional. El controlador proporcional desarrolla una señal de control proporcional al error. Esencialmente, actúa como un amplificador.

Para un controlador con acción de control proporcional la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad 2-1$$

O bien expresados en términos de la transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad 2-2$$

En donde  $K_p$  se considera la ganancia proporcional.

El controlador proporcional es, en esencia un amplificador con una ganancia ajustable.

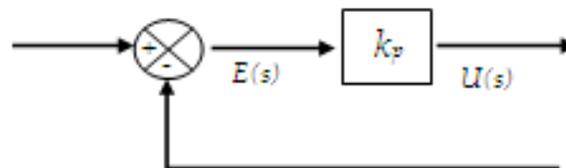


Figura 2-3: Diagrama de bloques de un controlador proporcional



**2.1.4.2. Acción de control integral**

En un controlador, al emplear una acción de control integral, la señal de control se modifica a una velocidad proporcional a la señal de error. Es decir, si la señal de error es grande, la señal de control se incrementa con una gran rapidez; si es pequeña, la señal de control se incrementa con una lentitud mayor.

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

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \tag{2-3}$$

En donde  $K_i$  es una constante ajustable. La función de transferencia del controlador integral es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{S} \tag{2-4}$$

En ocasiones la acción de control integral se denomina control de reajuste (reset).

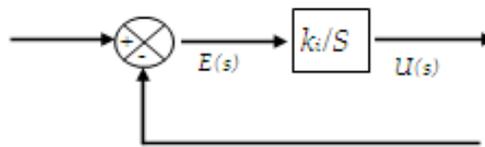


Figura 2-4: Diagramas de bloques de un controlador integral

**2.1.4.3. Acción de control proporcional-derivativa. (PD)**

La acción de control derivativo proporciona una señal de control proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. Puesto que esta no genera ninguna salida a menos que el error sea modificado, en raras ocasiones se utiliza solo. La acción de control de un controlador proporcional-derivativa (PD), se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_p \frac{de(t)}{dt} \tag{2-5}$$

Y expresado en función de transferencia queda de la siguiente manera:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \tag{2-6}$$

En donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y,  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo, ambas son ajustables. La acción de control derivativo, en ocasiones denominada control de velocidad, ocurre cuando la magnitud de la salida del controlador



es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. El tiempo derivativo es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional. Aunque la acción de control derivativa tiene la ventaja de ser preventivo, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y provoca un efecto de saturación en el actuador.

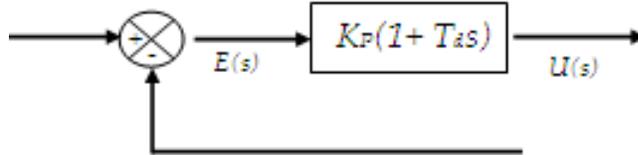


Figura 2-5: Diagrama de bloques de un controlador proporcional-derivativo.

**2.1.4.4. Acción de control proporcional-integral. (PI)**

Algunas veces es necesario combinar acciones de control. Un controlador proporcional es incapaz de neutralizar una carga en el sistema sin ningún error en estado estable (en régimen permanente) de la salida. Un controlador integral puede proporcionar un error cero, pero suele suministrar una respuesta lenta. Para resolver este problema se utiliza el controlador PI y se representa por:

$$u_{(t)} = K_p e_{(t)} + K_i \int_0^t e_{(t)} dt \tag{2-7}$$

Donde  $k_i$  regula la ganancia del integrador y  $k_p$  ajusta al integrador y la ganancia proporcional.

**2.1.4.5. Acción de control proporcional-integral-derivativo. (PID)**

Tres de las acciones de control se pueden combinar para formar el controlador PID. El controlador PID es el tipo de control más general y, con toda probabilidad es el tipo de control más utilizado. Proporciona una respuesta rápida, un buen control de la estabilidad del sistema y un bajo error de régimen permanente.

La combinación de una acción de control proporcional, una acción de control integral y una acción de control derivativa se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u_{(t)} = K_p e_{(t)} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e_{(t)} dt + K_p T_{(p)} \frac{de_{(t)}}{dt} \tag{2-8}$$



La función de transferencia esta expresado de la siguiente manera:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad 2-9$$

En donde  $k_p$  es la ganancia proporcional  $T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  es el tiempo derivativo.

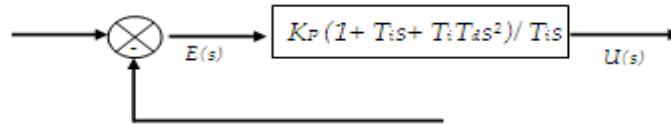


Figura 2-6: Diagrama de bloque de un controlador proporcional-integral-derivativo

## 2.2. Sistemas de control avanzado.

Hoy en día el control avanzado es sinónimo de implementación del proceso con tecnologías basadas en ordenadores o microprocesadores. Es una tecnología multidisciplinaria en la que intervienen ingeniería de control, procesamiento de señales, estadística, inteligencia artificial e ingeniería del hardware y del software y en particular una comprensión del comportamiento de la planta unida a la aplicación juiciosa de las tecnologías de control actuales [6].

La unidad de control avanzado se basa en el siguiente principio: “Dado el estado actual... ¿Qué acciones hay que tomar para alcanzar las especificaciones deseadas?, el control avanzado precisa pues, de un modelo del proceso con la suficiente información para predecir las consecuencias de los cambios en las condiciones de operación del proceso.

Existen diversos tipos de control avanzado [6]:

### 2.2.1. Control robusto

La robustez es una característica interesante del controlador que indica la tolerancia e insensibilidad del controlador ante los cambios o perturbaciones que puedan presentarse en las condiciones de trabajo del proceso Figura 2-7.

Tiene por objetivo el control de plantas de características dinámicas desconocidas a perturbaciones desconocidas. La robustez obliga a cuantificar las incertidumbres de los errores del modelo del proceso debido al comportamiento no lineal o variable en el tiempo; por lo tanto el control va a mantenerse estable y lograr que el proceso funcione dentro de las especificaciones.



La mayor dificultad que se presenta es la síntesis de una ley de control que mantenga dentro de las tolerancias limitadas los efectos sobre el proceso de la incertidumbre (ruido, perturbaciones, errores del modelo del proceso) del sistema.

Se analiza una curva de retardo- ganancia para determinar la estabilidad e inestabilidad del proceso, en base a la ganancia y retardo relativo, y, con él un factor de seguridad se observa si al incrementar la ganancia este conduce a la inestabilidad y si se sobrepasa el factor de seguridad.

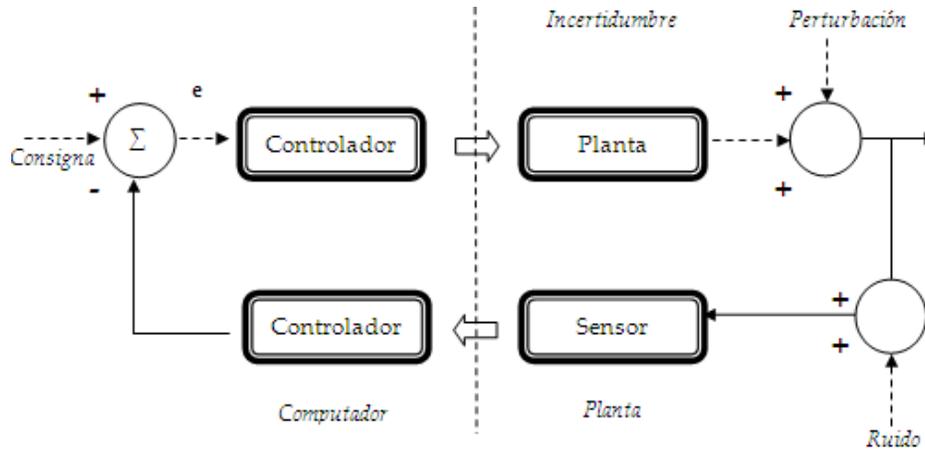


Figura 2-7: Planta apta para control robusto

### 2.2.2. Control multivariable

Un proceso es multivariable cuando posee varias entradas y varias salidas importantes que se influyen mutuamente, es decir, si cualquier cambio en una de las entradas provoca una variación en varias señales de salida ( Figura 2-8). Su objetivo es compensar las perturbaciones en las variables y desacoplar las mismas, es decir, si por ejemplo cambia el punto de consigna de una de las variables, solo ésta debe quedar afectado, sin modificar o perturbar las restantes.

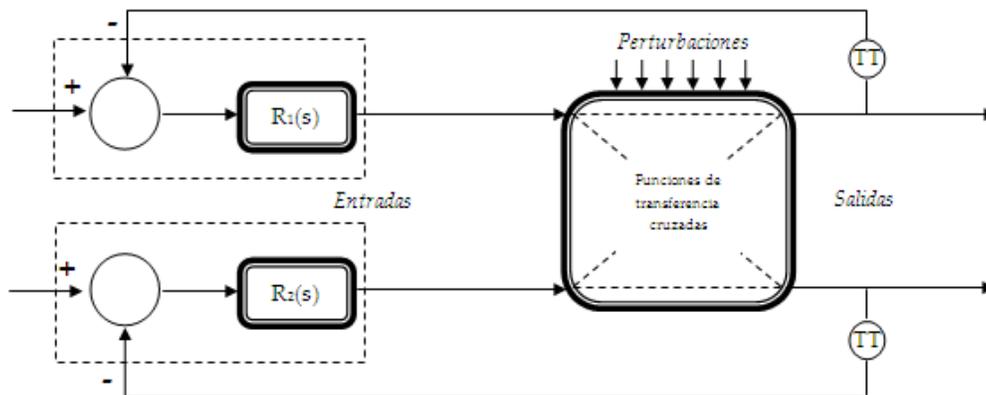


Figura 2-8: Control multivariable



### 2.2.3. Control adaptativo.

El control adaptativo es el sistema de control que ajusta automáticamente sus parámetros para compensar los cambios que puedan producirse en el proceso. De este modo intenta resolver el control de procesos no lineales que el controlador clásico PID no resuelve satisfactoriamente (Figura 2-9).

Es decir el sistema de control es adaptado al proceso, permitiendo en los procesos no lineales ajustar las acciones PID a los parámetros del proceso.

El ajuste se calcula mediante un modelo del proceso que se compara con el proceso real, obteniéndose una diferencia o error entre las características de la respuesta del modelo y las del proceso real; esta señal de error es introducida en el algoritmo de control adaptativo dando una señal de salida que ajusta ya los parámetros del controlador.

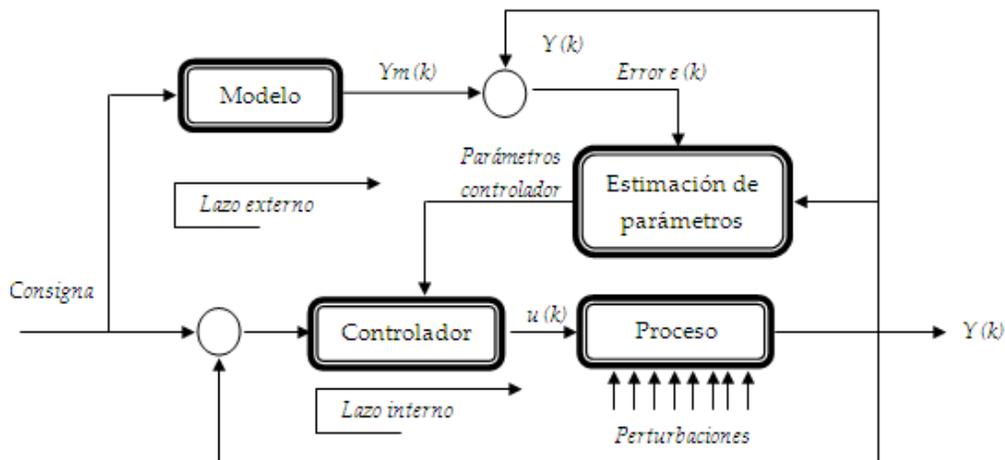


Figura 2-9 Diagrama del control adaptativo

### 2.2.4. Control predictivo.

Se basa en el uso de modelos dinámicos del proceso establecidos de tal forma que permiten anticiparse y predecir las situaciones futuras del proceso, con el objetivo de utilizar esta información para modificar la estrategia actual del control. Ver Figura 2-10

En cierta forma, se comporta igual que un operario con experiencia que a la vista de los datos pasados y los actuales, actúa sobre el elemento final de control con el fin de obtener valores futuros de la variable controlada. Este controlador trabaja como un universo del modelo del proceso (modelo lineal) siendo capaz por su robustez, de solucionar el control de la mayoría de los procesos no lineales.

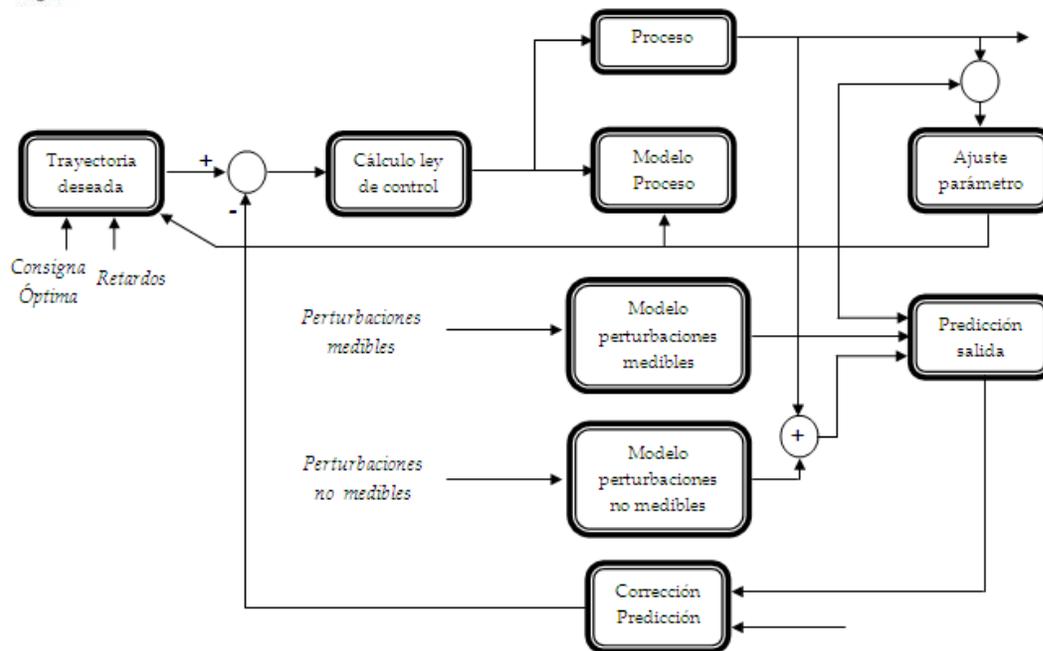


Figura 2-10: Diagrama de bloques del control Predictivo

### 2.2.5. Control por redes neuronales.

Este tipo de control imita el funcionamiento de las neuronas del sistema nervioso. La red neuronal puede aprender y ser un sistema experto que extraiga datos automáticamente sin precisar de reglas. La forman un conjunto de elementos, las neuronas, que están conectadas entre sí en una forma semejante a la del cerebro humano. La señal procedente de las diversas entradas o “*dentritas*” genera excitación en la salida o “*axón*” de la neurona, siempre que sobrepase un determinado umbral de carácter bioquímico. Cada conexión neuronal (sinapsis) entre las salidas de unas neuronas (axones y las entradas de otras neuronas (dentritas), se caracteriza por un valor llamado “*peso*” que puede ser excitador (positivo) o inhibidor (negativo) del elemento del proceso.

El algoritmo de retropropagación del error presenta repetidamente los datos de entrada a la red neuronal. En cada representación, la salida de la red neuronal se compara con la salida deseada y el posible error se realimenta a la red ajustando los pesos de las neuronas, de tal modo que el error disminuye en cada iteración y el modelo neuronal se aproxima cada vez más a la salida deseada. (Figura 2-11)

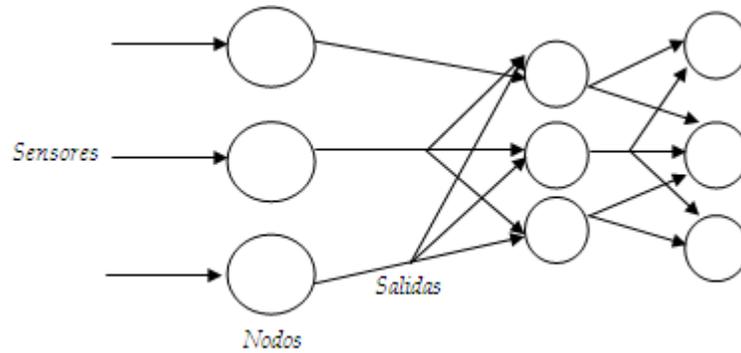


Figura 2-11: Esquema de una red neuronal

### 2.2.6. Control por lógica difusa.

Este tipo de control es adecuado para el control de procesos no lineales y un comportamiento variable en el tiempo; el cual utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas, se podría decir que hace mucho mas humano el control, pues tiene muchos puntos en contacto con el lenguaje corriente. Cuando se carece de un algoritmo que dicte cómo un sistema debe responder a ciertas entradas (función de transferencia), la lógica difusa puede ser útil para controlar o describir el sistema usando reglas de sentido común. Los sistemas difusos frecuentemente tienen reglas tomadas de expertos, pero cuando no hay experto los sistemas difusos adaptivos aprenden las reglas observando cómo la gente manipula sistemas reales. El método de lógica difusa emplea un modelo lingüístico representado en funciones de membresía, y aplicando las reglas de los conjuntos se determina el grado de pertenencia de cada uno de los valores al valor estipulado.

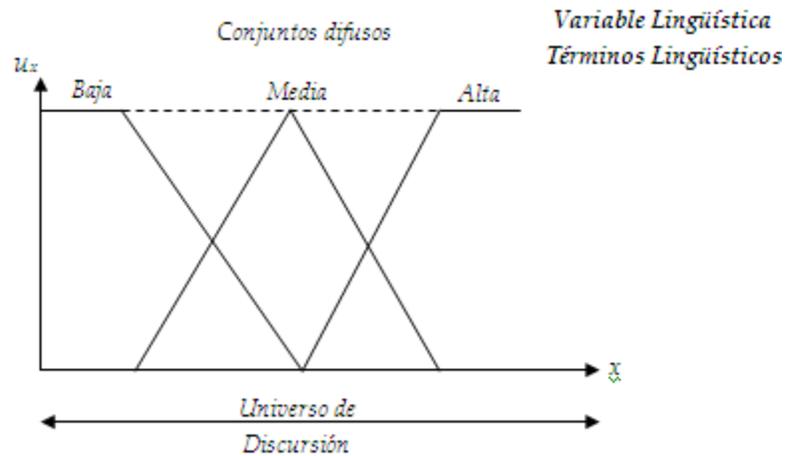


Figura 2-12: Diseño de sistema por control de lógica difusa

Existen otros tipos de control avanzados tales como "Correctores de retardo", "Control linealizador global", "Control óptimo", "Sistemas expertos". Para hacer una adecuada



selección del sistema de control a desarrollar es importante analizar la naturaleza del proceso y las ventajas que ofrecen cada uno de los sistemas.

### 2.3. Comparativos de los sistemas de control

A continuación se presenta un comparativo que engloba los sistemas arriba detallados y que fue utilizado para analizar y determinar el sistema de control a desarrollar (ver Figura 2-13).



Figura 2-13: Comparativo del control clásico y control avanzado

Tomando en cuenta estas características de los sistemas y analizando el comportamiento del sistema actual, se decide aplicar el sistema de control avanzado, para lo cual se analizaron los sistemas existentes, analizando sus características y aplicaciones logrando de esta manera determinar el control necesario para aplicarlo en el proceso.

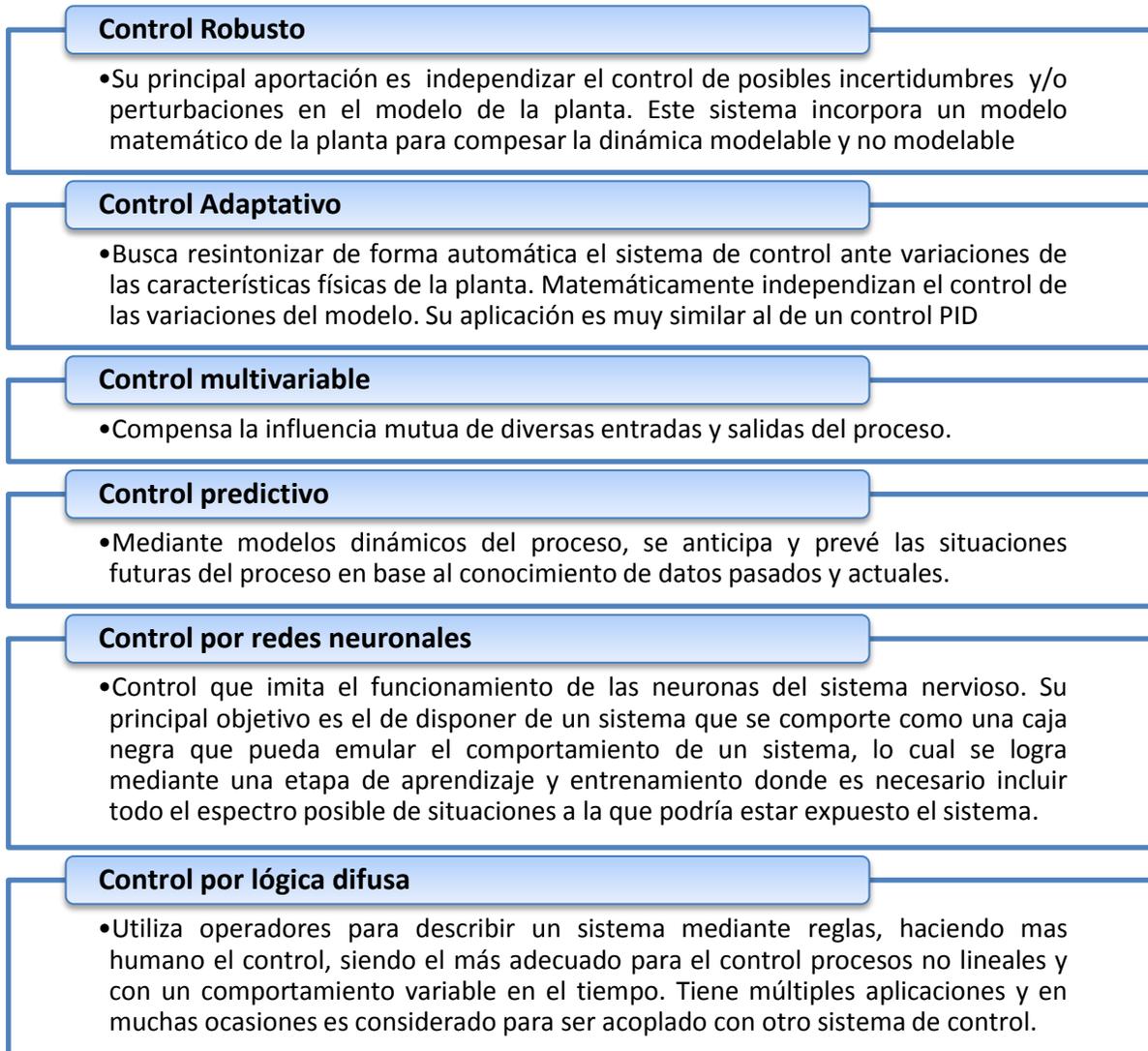


Figura 2-14: Características de los sistemas de control avanzado

Tomando en consideración las características mencionadas, se determinó que la aplicación del sistema de control por lógica difusa ofrece ventajas sobre el proceso de secado de café que se pretende controlar, tomando en cuenta que se tiene conocimiento sobre el proceso, y que no existe un modelo matemático que describa el mismo.

## 2.4. Sistema de control difuso

Es un tipo de controlador lógico capaz de resolver problemas relacionados con la incertidumbre de la información o del conocimiento [8]. La Lógica difusa fue investigada por primera vez alrededor de mediados de los años sesenta por el ingeniero Lotfy A. Zadeh en la Universidad de Berkeley (California). En un principio fue denominada como principio de incompatibilidad. El nuevo concepto no es más que la idea de que los



elementos pueden ser representados mediante un lenguaje lingüístico. Un paso importante para el desarrollo de la misma fue a los principios de la década de los años setenta con la creación de diferentes grupos de universidades japonesas con la creación del primer controlador difuso para una máquina de vapor o crear un controlador de inyección de química en depuradoras de agua. En la década de los años ochenta la investigación se orientó hacia las redes neuronales para identificar y optimizar sus parámetros. Aunque la mayoría de las aplicaciones de la lógica difusa se ha orientado a sistema de control, actualmente se ha incursionado en el reconocimiento de patrones visuales o la identificación de segmentos de ADN [23].

### 2.4.1. Operaciones sobre conjuntos difusos.

En la década de los años veinte J. Lukasiewicz desarrolló los principios de la lógica multivaluada, cuyos enunciados pueden tener valores de verdad comprendidas entre el 0 (FALSO) Y EL 1 (CIERTO) de la lógica binaria clásica. La lógica multivaluada permite asignar diferentes grados de certeza; posteriormente en el año de 1965 fue aplicada a la teoría de conjuntos, por Lotfy A. Zadeh, estableciendo la posibilidad de que los elementos pudieran tener diferentes grados de pertenencia a un conjunto [29].

En la lógica difusa, las operaciones entre conjuntos se plantean en forma de operaciones difusas. Según la lógica clásica un elemento pertenece o no pertenece al conjunto sin embargo lo que hace es poner un grado de pertenencia al conjunto. Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso para cada valor que pueda tomar la variable  $x$ , la función característica  $\mu_A(x)$  proporciona el grado de pertenencia de ese valor  $x$  al conjunto difuso  $A$

Así aplicando estas operaciones sobre dos conjuntos difuso  $A$  y  $B$  con funciones de membresía  $\mu_A$  y  $\mu_B$  serían:

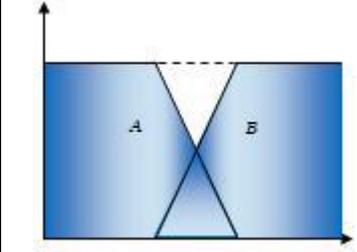
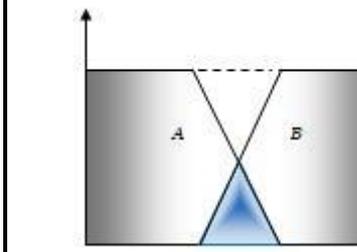
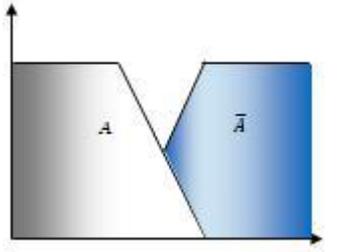
| Unión   | Intersección  | Complemento   |
|---|---|---|
| $\mu_A \cup_B = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$                  | $\mu_A \cap_B = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$                  | $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$   |
|  |  |  |

Figura 2-15: Operaciones en lógica difusa



#### 2.4.2. Ventajas y desventajas de la lógica difusa.

El sistema de control de lógica difusa puede presentar las siguientes ventajas y desventajas [29].

- a) Simplicidad, ya que no requiere constructores matemáticos complejos (no es preciso conocer la expresión algebraica exacta que gobierna el funcionamiento del sistema).
- b) Con los sistemas basados en la lógica difusa se pueden evaluar mayor cantidad de variables, entre otras, variables lingüísticas, no numéricas, simulando el conocimiento humano.
- c) Se relaciona entradas y salidas, sin tener que entender todas las variables, permitiendo que el sistema pueda ser más confiable y estable, que uno con un sistema de control convencional.
- d) Se puede simplificar la asignación de soluciones previas a problemas sin resolver
- e) Es posible obtener prototipos rápidamente ya que no requiere conocer todas las variables acerca del sistema antes de empezar a trabajar siendo su desarrollo más económico que el de sistemas convencionales, porque son más fáciles de designar facilitando también las tareas de prueba y mantenimiento.
- f) Se simplifica, también la adquisición y representación del conocimiento y unas pocas reglas abarcan gran cantidad de complejidades.
- g) Su posible combinación con tecnologías clásicas ya establecidas y con otras más modernas, como las redes neuronales.

Por lo anterior, que por un lado puede ser una ventaja y por otro posible riesgo, los sistemas basados en la lógica difusa requieren mayor simulación y una excelente depuración y prueba antes de pasar a ser operaciones.

#### 2.4.3. Problemas en el diseño de controladores difusos.

Las técnicas difusas de control vienen siendo utilizadas en muchos y complejos problemas de control. La formación de las bases del conocimiento es uno de los problemas centrales ya que no pueden realizarse de forma automática a través de los métodos usuales, siendo basadas fundamentalmente en conocimientos heurísticos y muchas veces subjetivos.

El enfoque tradicional para el diseño difuso suele ser muy laborioso y muy demorado por las pruebas necesarias y en muchos casos, específicas a cada aplicación. Suele ocurrir que la obtención de la base de reglas se hace a través de la práctica de los operadores expertos en el proceso a modelar aunque no siempre se dispone de la ayuda de un experto del proceso a controlar.



Por otra parte, los sistemas multivariables suelen ser todavía un desafío para los diseñadores, salvo en aplicaciones triviales elaboradas sobre uno o dos conjuntos difusos.

Se podría resumir que la utilización de la lógica difusa es aconsejable para procesos muy complejos, es decir cuando se carece de un modelo matemático simple o para procesos altamente no lineales, o si el procesamiento del conocimiento experto puede ser desempeñado [29].

#### **2.4.4. Implementación de sistemas difusos.**

Un sistema de lógica difusa puede implementarse como un programa ejecutable por un microprocesador convencional (o microcontrolador), o podrá realizarse en hardware específico o simplemente como un programa ejecutado en un sencillo microcontrolador de 8 bits.

El diseño de un controlador basado en lógica difusa supone establecer un compromiso entre diversos criterios de diseño, velocidad, precisión y flexibilidad principalmente. 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.

Una vez decididas las prestaciones del diseño requeridas, se ha de utilizar una herramienta de desarrollo para el diseño del sistema y seleccionar la plataforma de implementación adecuada. Las herramientas de desarrollo suelen utilizar un lenguaje de descripción para independizar el diseño de la plataforma [8]. (Ver Figura 2-16).

Un sistema de lógica difusa puede implementarse como un programa ejecutable por un microprocesador convencional (o microcontrolador), o podrá realizarse en hardware específico o simplemente como un programa ejecutado en un sencillo microcontrolador de 8 bits.



### 2.4.5. Funcionamiento de un sistema de control difuso.

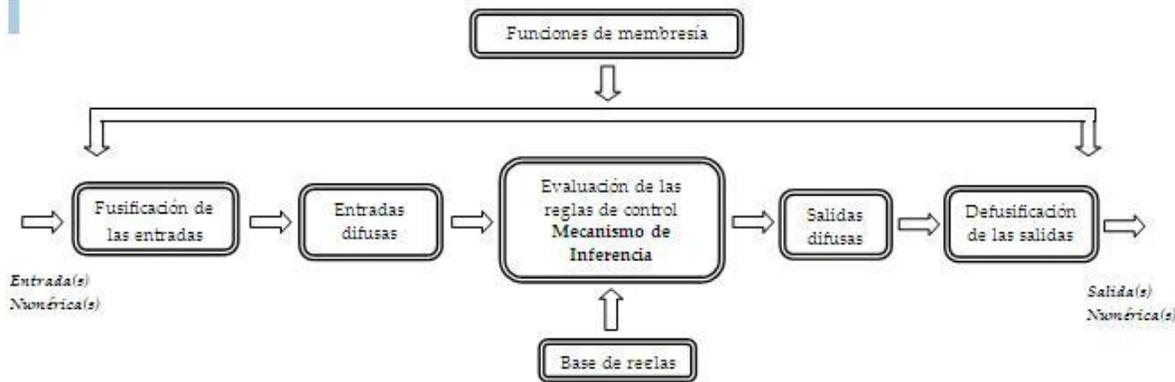


Figura 2-16: Funcionamiento de un control difuso

El controlador lógico difuso genera acciones de control a partir de un conjunto de reglas que representan el conocimiento heurístico del proceso a ser controlado.

La estructura genérica de un controlador lógico difusa consta de un conjunto de reglas de control difuso, un mecanismo de inferencia y las interfaces hacia el proceso a controlar, un proceso fusificador para la entrada del controlador y defusificador para la salida del mismo [16]. A continuación se describirá cada una de las etapas [8], [29].

#### 2.4.5.1. Fusificación de las entradas.

La Fusificación de una entrada es el proceso por el cual se toma el valor numérico de la entrada (variable lingüística) y se le asigna un grado de pertenencia respecto a un conjunto difuso o función de membresía previamente definida, generando un valor difuso.

El universo de los valores de la entrada es dividido en zonas utilizando los conjuntos difusos a las cuales son asignadas etiquetas representativas de dicha zona (valor lingüístico).

Al trabajar con conjuntos difusos hay que establecer unas funciones de membresía de los elementos a los diferentes conjuntos, lo cual permite determinar a partir del valor de un elemento  $x$  que pertenece al universo de entrada, un grado de pertenencia  $u(x)$  al conjunto, siendo este un valor real normalizado entre 0 (no pertenece en absoluto) y 1 (pertenece al 100%). El grado de pertenencia es la seguridad o certidumbre de que un elemento del universo pertenezca a un conjunto difuso.

Las funciones de membresía deben definirse a partir de la experiencia o la intuición o simplemente utilizando el sentido común y suelen ser de forma: singleton, triangular, trapezoidal, gaussiana; algunas de las funciones de membresía más utilizadas en los conjuntos difusos se presentan en la Tabla 2-1



| Ecuación  | Tipo        | Gráfica |
|---|-------------|---------|
| $\mu_{A(x)} = \begin{cases} 1, & x_{entrada} = a \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$   | Singleton   |         |
| $\mu_{A(x)} = \begin{cases} 1, & x_{entrada} = b \\ \frac{x_{entrada} - a}{b - a}, & \text{si } a \leq x_{entrada} < b \\ \frac{x_{entrada} - c}{b - c}, & \text{si } b \leq x_{entrada} \leq c \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$                      | Triangular  |         |
| $\mu_{A(x)} = \begin{cases} 1, & \text{si } b \geq x_{entrada} \leq c \\ \frac{x_{entrada} - a}{b - a}, & \text{si } a \leq x_{entrada} < b \\ \frac{x_{entrada} - d}{c - d}, & \text{si } c \leq x_{entrada} \leq d \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$ | Trapezoidal |         |
| $\mu_{A(x)} = e^{-\frac{x_{entraba} - b^2}{2\sigma^2}}$   | Gaussiana   |         |

Tabla 2-1: Funciones de membresía de un conjunto difuso

Para calcular el grado de pertenencia  $u$  ante un valor de entrada  $x$ , se tienen dos estrategias de cálculo que difieren en el algoritmo de solución, ambas son plenamente aplicables.



➤ Algoritmo de punto extremos

Este algoritmo resuelve utilizando los valores  $a$  y  $c$ , en ambos extremos de la función de pertenencia. La función es dividida en dos partes el intervalo  $[a, b]$  y el intervalo  $[b, c]$ , cada uno de estos cálculos permite cálculos individuales de la pendiente y del grado de pertenencia respectivo. Si la entrada  $x$  esta en el intervalo  $[a, b]$ , factiblemente se calcula el grado de pertenencia  $u$ .

“Si  $x$  no esta entre  $a$  y  $c$ ,  $x$  no tiene grado de pertenencia  $u$ ”.

“Si  $x$  esta entre  $a$  y  $b$ , calcular el grado de pertenencia  $u$ ”. Mediante:

$$u(x) = \frac{u_{\text{máximo}}}{(b - a)}(x - a) \quad 2-10$$

“Si  $x$  esta entre  $b$  y  $c$ , calcular el grado de pertenencia  $u$ ”. Mediante:

$$u(x) = \frac{u_{\text{máximo}}}{(c - b)}(c - x) \quad 2-11$$

Donde el valor de  $\mu_{\text{máximo}}$ , es una constante determinada por la palabra máxima finita del controlador, igual a  $2^{n-1}$  en la particularidad del diseño en este estudio se tiene que  $\mu_{\text{máximo}} = 255$  por tratarse de un controlador de 8 bits. Ver sección 4.6

➤ Algoritmo del punto medio.

Es viable calcular el grado de pertenencia considerando únicamente el valor del punto medio  $b$  de la función. Para aplicarlo se utilizan las siguientes expresiones:

“Si  $x$  no esta entre  $a$  y  $c$ ,  $x$  no tiene grado de pertenencia  $u$ ”.

“Si  $x$  esta entre  $a$  y  $b$ , hacer  $\text{delta}=b-x$  y calcular el grado de pertenencia  $u$ ”. Mediante:

$$u(x) = u_{\text{máximo}} - \frac{u_{\text{máximo}}}{(b - a)}(b - x) \quad 2-12$$

“Si  $x$  esta entre  $b$  y  $c$ , hacer  $\text{delta}=x-b$  calcular el grado de pertenencia  $u$ ”. Mediante:

$$u(x) = u_{\text{máximo}} - \frac{u_{\text{máximo}}}{(c - b)}(c - x) \quad 2-13$$

2.4.5.2. *Etapa de inferencia, evaluación de las reglas de control.*

El proceso de inferencia es una toma de decisión que determina las salidas difusas correspondientes a las entradas fusificadas. Esta toma de decisiones está basada en las sentencias de la forma **SI** antecedente **ENTONCES** consecuente que integran al conjunto de reglas de control difuso. Básicamente el proceso de inferencia involucra dos conceptos la implicación difusa y la regla composicional de inferencia. Si se tienen dos estados  $A$  y  $S$  entonces el consecuente difuso  $C$  puede ser inferida por:  $C = (A, B)^{\circ}R$



Donde "0" representa el operador composicional u operador de inferencia Este razonamiento difuso es llamado la regla composicional de inferencia para gobernar el comportamiento del sistema el diseñador debe establecer una serie de reglas de la forma *SI... ENTONCES* para indicar la acción a realizar del conjunto al que pertenece la entrada del sistema.

*SI (x es A) ENTONCES... (y será C).*

Un algoritmo de lógica difusa que describe la respuesta de un controlador PID es:

*IF y(t) es A AND  $\dot{y}(t)$  es B AND u(t) es C THEN  $\dot{y}(t)$  es D, donde:*

*u(t) = Señal de entrada*

*y(t) = Señal de salida*

*$\dot{y}(t)$  = Señal de salida derivada*

*$\ddot{y}(t)$  = Señal de salida de segunda derivada*

Este tipo de representación del conocimiento, caracterizada como "conocimiento superficial", es muy apropiado en contextos lingüísticos debido a que expresa el conocimiento humano empírico y heurístico en nuestro lenguaje de comunicación. La expresión en la forma anterior es comúnmente referida como "forma basada en la regla". Con un conjunto de expresiones en la forma *SI... ENTONCES* (reglas difusas) el controlador lógico difuso puede definir una acción de control para valores de entrada dados. Esta acción se determina dependiendo de las entradas observadas, las cuales representan el estado del proceso a controlar. El antecedente corresponde a los valores de las variables del proceso y el consecuente con la acción deducida partiendo del estado actual del proceso [7].

Una vez establecidos los conjuntos se pueden crear las reglas de control que determinen el comportamiento que debe tener el parámetro de acuerdo a la variable a controlar, dando como resultado reglas de control; a cada regla de control se le asocia un valor denominado peso que en un principio coincide con el grado de pertenencia de la entrada  $x$  al conjunto indicado en el antecedente, este proceso es el que permitirá establecer el grado de pertenencia de la salida  $y$  del sistema al conjunto indicado en el consecuente de la regla.

#### 2.4.5.2.1. Peso asociado a las reglas de control.

Para calcular el peso asociado a cada una de estas reglas se aplican los operadores producto y suma lógica difusa

**Regla i:** Si  $[(x_1 \text{ es } A_j) \text{ y } (x_2 \text{ es } B_i)]$  entonces (y será  $C_i$ )

**Regla j:** Si  $[(x_1 \text{ es } A_j) \text{ o } (x_2 \text{ es } B_i)]$  entonces (y será  $C_i$ )



Regla:

$$\begin{aligned} \text{peso de la regla } i &= \min [(u_{Ai(x1)}, u_{Bi(x2)})] \\ \text{peso de la regla } j &= \max [(u_{Ai(x1)}, u_{Bi(x2)})] \\ u_{Ci(y)} &= \text{peso de la regla } i = \min [(u_{Ai(x1)}, u_{Bi(x2)})] \\ u_{Cj(y)} &= \text{peso de la regla } j = \max [(u_{Ai(x1)}, u_{Bi(x2)})] \end{aligned}$$

Si se cuentan con combinaciones de ambas operaciones, se aplicará el criterio por partes.

$$\text{Si } [(x_1 \text{ es } A_i) \text{ y } (x_2 \text{ es } B_i)] \text{ entonces } (y \text{ será } C_i)$$

Entonces;

$$\begin{aligned} \text{peso de la regla} &= \max [\min [(u_{Ai(x1)}, u_{Bi(x2)}, u_{Ai(x3)})]] \\ u_{Cj(y)} &= \text{peso de la regla } j = \max [\min [(u_{Ai(x1)}, u_{Bi(x2)}, u_{Ai(x3)})]] \end{aligned}$$

En el caso de sistemas con más de una salida el grado de pertenencia de la salida a un conjunto se corresponderá con el mayor peso de todas las reglas en cuyo consecuente aparezca el conjunto.

**Regla i:** Si ... Entonces ( $y_1$  será C) y ( $y_2$  será D)

**Regla j:** Si ... Entonces ( $y_1$  será C) y ( $y_2$  será E)

$$\begin{aligned} \text{peso de la regla } i &= \min [(u_{Ai(x1)}, u_{Bi(x2)})] \\ \text{peso de la regla } j &= \max [(u_{Ai(x1)}, u_{Bi(x2)})] \\ u_{C(y1)} &= \max [\text{Peso regla } i, \text{Peso regla } j] \\ u_{D(y2)} &= \text{Peso de la regla } i \\ u_{E(y2)} &= \text{Peso de la regla } j \end{aligned}$$

Estas reglas componen lo que se denomina base de reglas del sistema. Su evaluación consiste en determinar que regla (o reglas) se activarán ante un determinado valor de entrada.

#### 2.4.5.2.2. Totalidad de las reglas de control.

La totalidad de las reglas de control implica que el controlador debe generar acción de control para cualquier estado de entrada al sistema, por lo que un algoritmo de control difuso debe ser capaz de producir una acción de control adecuada para cada estado que tome el proceso.

La totalidad requiere que los conjuntos difusos se traslapen, cubriendo todas las posibles duplas de estado del proceso/acción de control; por lo que la unión de los conjuntos debe ser diferente de cero.



Para la resolución de las reglas de inferencia existen diversos métodos de implicación difusa, sin embargo los más importantes son el método del mínimo o mandani y el método del producto o de Larsen [13].

- a) El método del mínimo o de Mandani: se almacena en una relación difusa  $R$  donde se elige el grado de pertenencia mínima:

$$u_{Ri(x_1, x_2)} = \min[(u_{A(x_1)}, u_{B(x_2)})] \quad 2-14$$

- b) El método del producto o de Larsen. Se almacena en una relación difusa  $R$  que realiza el producto de los grados de pertenencia respectivos:

$$u_{Ri(x_1, x_2)} = [(u_{A(x_1)}, u_{B(x_2)})] \quad 2-15$$

Ambos métodos de implicación aplican posteriormente el método de máximo, para encontrar un valor resultante total para referenciar una sola función de membresía del consecuente

#### 2.4.5.3. Defusificación de las salidas.

La defusificación de las salidas consiste en obtener un valor numérico para cada una de las salidas del sistema a partir de los conjuntos difusos a los que pertenecen. Este valor numérico es utilizado por el controlador lógico difuso para manipular el proceso que se está controlando. La interfaz de defusificación será la encargada de generar el escalar que es el valor real que se entregará a la salida del controlador.

Entre las técnicas de Defusificación se tienen las siguientes.

##### 2.4.5.3.1. Método centro de gravedad (COG) o centro de área o centroide (COA)

Este método se basa en el cálculo de una posición para la cual el área bajo la gráfica de la función de membresía el conjunto difuso de control es igualmente dividida. En general, dado un conjunto difuso  $C$  definido en el intervalo  $[z_1, z_2]$  la Defusificación  $Z^*$  por centro de gravedad, la cual esta dada por la expresión algebraica.

$$z = \frac{\int_{z_1}^{z_2} z * u_C(z) dz}{\int_{z_1}^{z_2} u_C(z) dz} \quad 2-16$$

Una versión modificada del método del centro de gravedad es el método de Promedio de Pesos, también conocidos como defusificador del promedio de centros o centros de sumas. Procesa de forma separada a todos los conjuntos de control definidos en el universo de trabajo de la variable de salida y establecidos en las reglas de control.



La acción de control en el método del promedio de pesos se calcula considerando las contribuciones de las reglas individuales, y esta dada por la siguiente expresión matemática:

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu C_i(\bar{z}) * \beta_i}{\sum_{i=1}^n \mu C_i(\bar{z})} \quad 2-17$$

El valor de  $\mu C_i(\bar{z})$  proviene de la fase de Inferencia y representa el grado de membresía al cual se trunca el conjunto  $i$ ,  $\beta_i$  indica el centro de gravedad del conjunto  $i = 1, 2 \dots n$

#### 2.4.5.3.2. Defusificador de criterio el máximo.

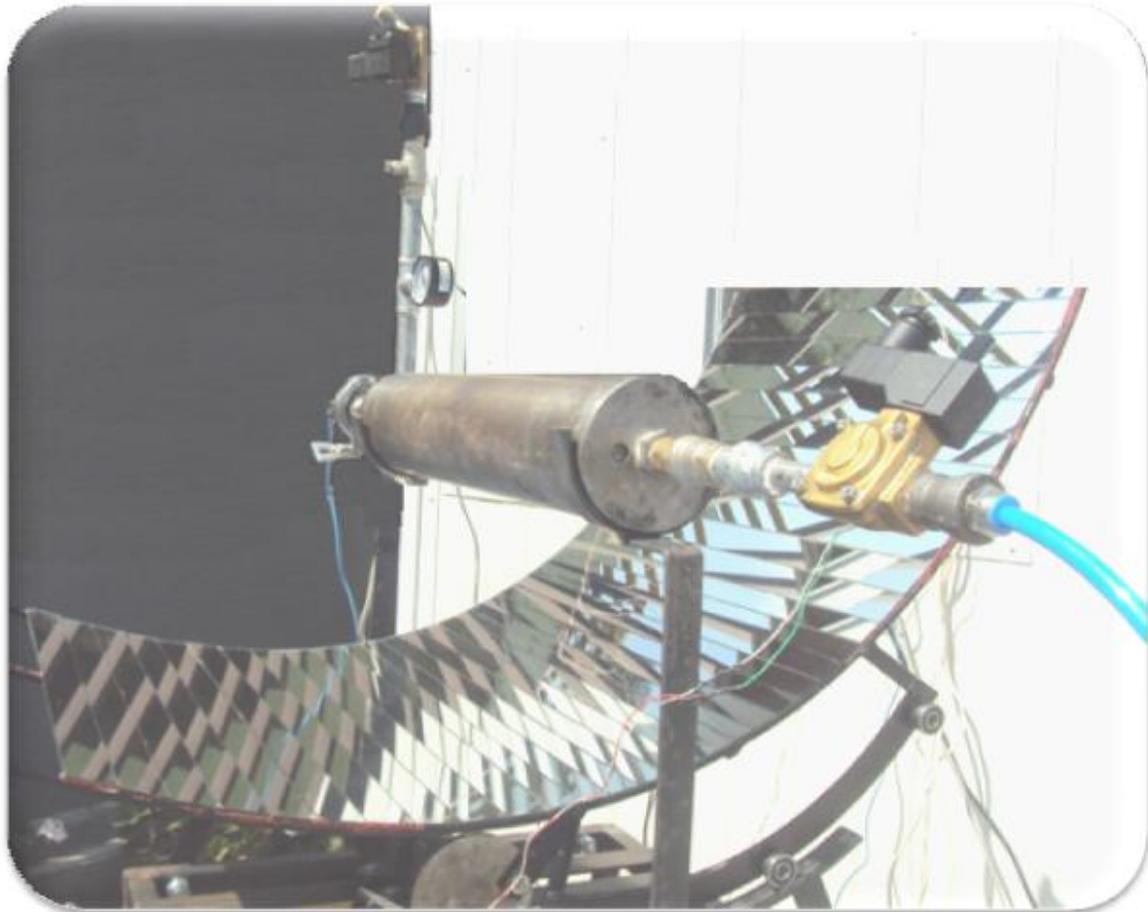
La salida escalar es el valor numérico del punto donde la función de pertenencia del conjunto difuso de la salida asume su valor máximo. Si la altura B contiene un solo punto se define  $Z^*$  en forma única; si por el contrario más de un punto se pueden especificar tres defusificadores de naturaleza diferente:

- Defusificador del valor más pequeño del máximo. Este método indica que se debe seleccionar como escalar  $Z^*$  de salida, al menor valor (primero) de la mayor función de pertenencia consecuente inferida.
- Defusificador del valor más grande del máximo. Se debe seleccionar como escalar  $Z^*$  de salida, al mayor valor (primero) de la mayor función de pertenencia consecuente inferida.
- Defusificador del valor promedio del máximo. Esta aproximación requiere que se elija como escalar  $Z^*$  de salida, el valor promedio de la mayor función de pertenencia consecuente inferida, tal y como lo sugiere la siguiente ecuación.

$$z^* = \frac{\int z dz}{\int dz} \quad 2-18$$



# CAPÍTULO 3



## DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En este capítulo se describe la función y diseño, del prototipo de la máquina secadora de café, de igual forma se explica la instrumentación realizada, características de los sensores y su acondicionamiento para la adquisición y monitoreo de las señales así como la tarjeta utilizada para la adquisición de datos.



### 3. Descripción del proceso a controlar

El secado es una operación básica ampliamente utilizada para la conservación de alimentos. Consiste básicamente en reducir la humedad contenida inicialmente en el producto para disminuir su cantidad de agua, evitando así la proliferación de microorganismos y prolongando su vida útil, y en muchos casos, es una etapa necesaria para proceder al siguiente proceso, como es el caso del café. Posterior a su corte, despulpado y lavado del café procede una de las etapas más críticas que garantizan un producto de calidad, para continuar con el tostado, el café debe contar con un porcentaje de humedad relativa del 12% [19], y que sea homogéneo, libre de contaminantes externos que no afecten el sabor, textura, ni color del grano.

#### 3.1. Sistema a controlar

El diseño del prototipo fue realizado aplicando la técnica de diseño QFD, utilizando las técnicas adecuadas para generación de conceptos y necesidades del cliente el cual fue desarrollado en el trabajo de tesis *“Concentración de energía solar para el secado de café pergamino”* por el M. en I. Raúl Valderrábano Ramírez [35], asegurando que el proceso se encuentre operando adecuadamente, utilizar una fuente de energía renovable, aplicando las ventajas tecnológicas actuales. En el presente trabajo se realizó la instrumentación del sistema de acuerdo a las necesidades, requerimientos y diseño desarrollado del prototipo para la implementación del sistema de control por lógica difusa.

El sistema utilizado para el secado de café utiliza energía solar proveniente de un colector solar tipo parabólico; el aire es tomado de la atmósfera donde sus elementos nocivos son eliminados haciéndolo pasar por un filtro para garantizar la calidad del producto. Este diseño se presenta como una alternativa para obtener café con un contenido de humedad final uniforme, libre de contaminantes y reducir el tiempo de secado.

El sistema está conformado por dos componentes importantes.

- a) Fuente de energía térmica.
- b) Máquina de secado.

En la Figura 3-1 Se encuentra un esquema general del proceso con las principales componentes e instrumentación efectuada.

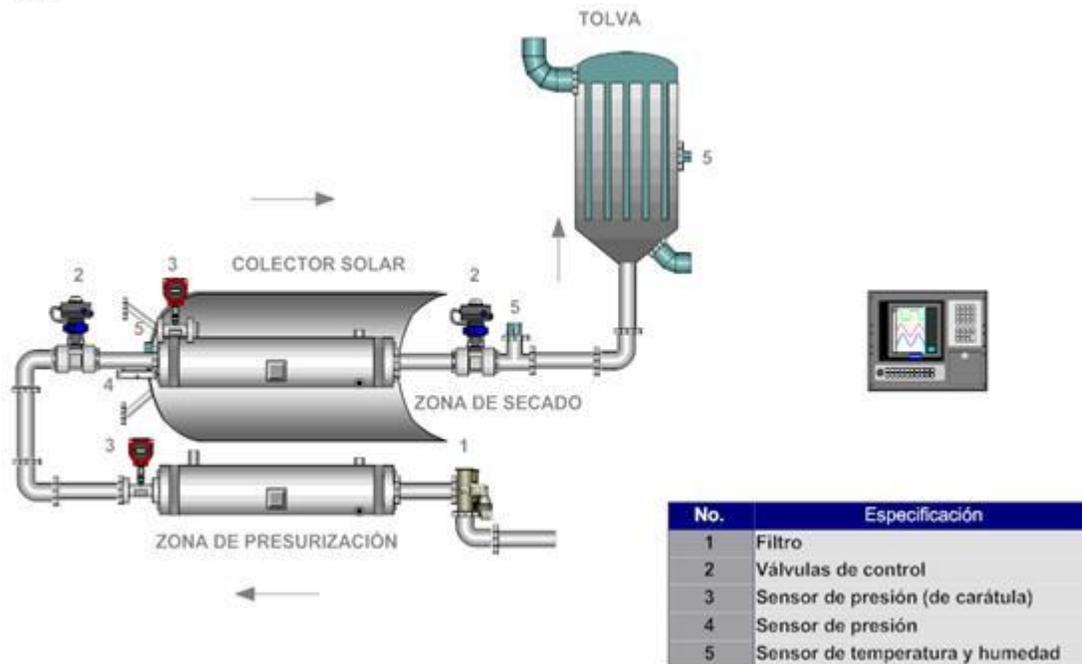


Figura 3-1: Esquema general del proceso

La fuente de energía térmica está generada por medio de un colector solar tipo cilindro parabólico

La máquina secadora a su vez está constituida por la zona de presurización, zona de calentamiento y zona de secado.

A continuación se detallará el comportamiento de cada una de las etapas que conforman el sistema.

### 3.1.1. Cámara de presurización

Es la etapa inicial del proceso donde se toma aire en condiciones atmosféricas y se comprime para posteriormente ser llevado a la cámara de calentamiento, la circulación de aire se realizará mediante diferencias de presiones, sin embargo actualmente se esta reemplazando dicha cámara por un compresor.

### 3.1.2. Cámara de calentamiento:

El aire procedente de la cámara de presurización pasa previamente por una unidad de mantenimiento, con el objetivo de eliminar cierto porcentaje de humedad, olor y algún otro componente contaminante; seguidamente este es transportado a la cámara de calentamiento donde el aire es sometido a temperaturas mayores a 100 °C. En esta etapa se monitoreadas las variables de: temperatura, presión y humedad de tal forma que cuando



se obtengan los valores esperados se permitirá el paso del aire caliente a través del depósito del producto. Aquí el aire aumentará su valor de un % humedad relativa, al pasar por el producto, debido a que absorbe una determinada cantidad de agua del producto.

### 3.1.3. Fuente de energía térmica.

La fuente de energía térmica proviene de un colector solar tipo cilindro parabólico el cual logra generar temperaturas mayores a los 300°C, permitiendo la captación solar durante un rango aproximadamente de 8 horas diarias. El colector está orientado hacia el foco central que es la cámara de calentamiento, garantizando la debida recepción de radiación solar para garantizar el calentamiento del aire en la cámara y de esta manera alcanzar los niveles de temperatura interna necesarios con el objetivo de que la temperatura de salida de la cámara de secado hacia la tolva sea la esperada para lograr un secado óptimo y homogéneo del grano.

### 3.1.4. Tolva.

Es un dispositivo donde será introducido el grano y se le suministrará aire caliente para su secado. El diseño actual no cuenta con el contenedor del producto, pero si se realizaron análisis enfocados al método de secado aprovechando la velocidad y cantidad de aire suministrada [35]. En la Figura 3-2 se observa el prototipo de la máquina secadora de café.

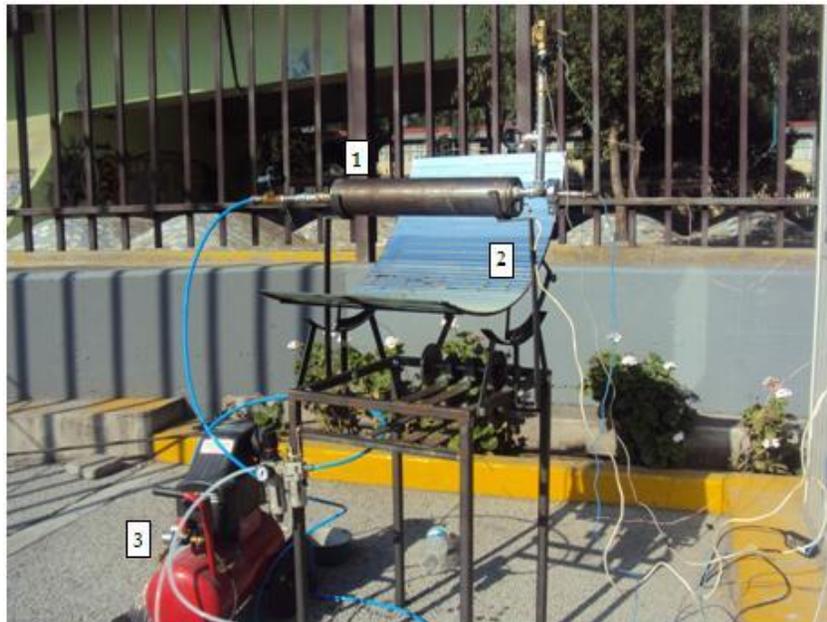


Figura 3-2: Prototipo Actual



### 3.2. Instrumentación

La temperatura, presión y humedad relativa son los parámetros críticos que influyen en el proceso (hay otras variables que tienen incidencia sobre el mismo, sin embargo no se consideran para el presente estudio), los cuales requieren ser monitoreados. Es ahí donde entra en juego el desarrollo del sistema de control.

Para el monitoreo, y adquisición de las señales de estos parámetros, se requiere disponer de los dispositivos requeridos por lo que se hará uso de transductores los cuales son dispositivos usados en mediciones que hacen corresponder una magnitud de entrada a una magnitud de salida según una relación determinada<sup>9</sup>. En este caso se utilizan dos transductores de temperatura y humedad para controlar estas variables a la entrada y salida de la cámara de secado, y un transductor de presión para el análisis interno de la presión en la cámara de secado. La selección de los mismos se realizó tomando en cuenta las características más relevantes como son [2]:

#### Características estáticas

- **Campo de medida:** Es el rango de valores de la magnitud de entrada comprendido entre el máximo y el mínimo detectables por un sensor.
- **Resolución:** Es el menor cambio en la variable del proceso capaz de producir una salida perceptible en el instrumento.
- **Precisión:** Cuanto mayor es la precisión menor es la dispersión de los valores de la medición alrededor del valor medido. Puede ser el caso que el valor no es exacto, pero la dispersión es pequeña, en este caso el instrumento es preciso, pero no exacto.
- **Repetibilidad:** Capacidad de un instrumento de repetir la salida cuando se llega a la medición en sucesivas ocasiones bajo exactamente las mismas condiciones.
- **Linealidad:** Es la constante de proporcionalidad que relaciona los incrementos de señal de entrada en el campo de medida.
- **Sensibilidad:** Variación en la salida del instrumento por unidad de variación de la variable del proceso (entrada), en otras palabras es la ganancia del instrumento.

#### Características dinámicas

- **Estabilidad:** Característica que indica la desviación de la salida del sensor al variar ciertos parámetros exteriores distinto del cual se pretende medir, por ejemplo: una condición ambiental.

---

<sup>9</sup> ISO/IEC Guide 99:2007; International vocabulary of metrology –Basic and general concepts and associated terms (VIM)

- **Velocidad de respuesta:** Es la capacidad que presenta para que la señal de salida siga sin retraso las variaciones de la señal de entrada.

Tomando también en cuenta su aplicación (es decir el acondicionamiento del mismo para su utilización) y costo. También fue necesario la selección de las válvulas de accionamiento para permitir la entrada y salida del aire utilizado para el secado. Para la interfaz de comunicación se utilizó la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6009, así mismo fueron desarrollados los circuitos electrónicos que permitieron el acondicionamiento de los sensores y válvulas para su debido funcionamiento. La instrumentación del sistema puede verse en la Figura 3-3.



Figura 3-3: Instrumentación de la cámara de secado

| Numeración | Dispositivo  |
|------------|--|
| 1          | Sensor de temperatura y humedad HMZ-433A1                            |
| 2          | Sensor de presión PSI-100  |
| 3          | Válvulas solenoides  |
| 4          | Tarjeta de Adquisición de datos DAQ USB 6009                         |
| 5          | Circuitos electrónicos para acondicionamiento de la señal y válvulas |
| 6          | Hardware utilizado   |

Tabla 3-1: Descripción de los componentes utilizados en la instrumentación

A continuación se explica a detalle la selección de cada uno de los componentes necesarios para la instrumentación.



### 3.2.1. Sensor de temperatura y humedad

Para el monitoreo de este parámetro se utilizó el dispositivo HMZ-433A1 el cual consiste en un sensor y circuito integrado que provee un comportamiento lineal ante la medición del parámetro de temperatura y humedad para un rango de y de -20 a 200°C y de 0 a 100% respectivamente.



Figura 3-4: Sensor de temperatura y humedad HMZ433A1

#### 3.2.1.1. Características

| Características | Dispositivo  |
|-----------------|--|
| Campo de medida | Rango nominal de temperatura: -20°C a 200°C<br>Rango nominal de Humedad: 0 a 100%<br>Temperatura de almacenamiento: -20°C a 170°C  |
| Resolución      | Mediante pruebas experimentales se determinó que el sensor lee valores con un rango de diferencia de 0.01, esto representa la mínima diferencia entre los valores próximos que el sensor es capaz de distinguir.   |
| Precisión       | $\pm 0.2$ °C, $\pm 5$ % HR   |
| Linealidad      | Ver sección 3.2.1.3  |
| Estabilidad     | La desviación de salida del sensor ante variaciones de parámetros exteriores esta regulado mediante la ecuación determinada del ajuste de datos que permite una adquisición continua de los mismos dentro del rango establecido. ( será explicado en la sección 3.2.1.3) |

Tabla 3-2: Características determinantes para la selección del sensor.

El factor costo fue determinante dado que el costo de este dispositivo comparado con otros existentes en el mercado es relativamente simbólico, sin embargo se tuvieron que realizar adaptaciones para poder introducir el sensor dentro del cilindro y evitar la presencia de fugas (ver sección 3.2.1.4).

#### 3.2.1.2. Funcionamiento

El rango de alimentación del dispositivo es de de 0 a 5 Volts, el sensor está provisto de 4 pines con la siguiente estructura.



- Pin 1 Alimentación de 5Volts DC.
- Pin 2 Salida de humedad
- Pin 3 Tierra
- Pin 4 Salida de la temperatura

Para su debido funcionamiento fue necesario acoplarlo con el siguiente arreglo: Adaptar un capacitor de  $0.1 \mu f$ , para disminuir el ruido y mejoramiento de la señal adquirida, y un potenciómetro para regular y ajustar el valor de la resistencia adecuada para el ajuste de la señal de salida de la temperatura según las aplicación del sensor contenida en su hoja de especificaciones.

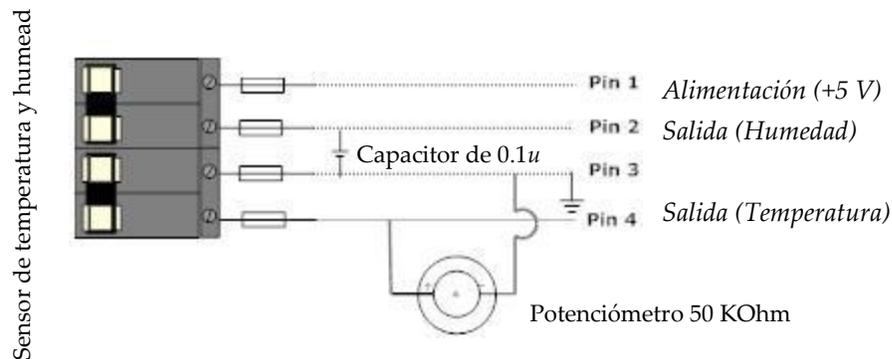


Figura 3-5 Arreglo del circuito

3.2.1.3. *Adquisición de la señal.*

El dispositivo detecta las variaciones del comportamiento de la temperatura y humedad enviando una señal de respuesta en forma de variaciones de voltaje (a través de los pines 2 y 4) que está comprendida en un rango de 0 a 3.3 Volts, una de las ventajas que ofrece este sensor es el comportamiento lineal de la respuesta ante la incidencia del fenómeno de la temperatura y humedad. La hoja de especificaciones brinda el rango comprendido de cada variable de acuerdo a las variaciones de voltaje, cuyos valores se presentan a continuación:

|                              |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Humedad (% RH)</b>        | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
| <b>Salida de voltaje (V)</b> | 0.66 | 0.99 | 1.32 | 1.65 | 1.98 | 2.31 | 2.64 | 2.97 |

(a)

|                         |     |      |      |    |      |      |      |      |     |     |
|-------------------------|-----|------|------|----|------|------|------|------|-----|-----|
| <b>Temperatura (°C)</b> | 0   | 10   | 20   | 30 | 40   | 50   | 60   | 70   | 80  | 90  |
| <b>Resistencia KΩ</b>   | 161 | 98.7 | 62.3 | 50 | 40.4 | 26.8 | 18.1 | 12.6 | 5.1 | 0.9 |

(b)

Tabla 3-3: Valores de Referencia (a) Humedad y (b) Temperatura



En el caso de la temperatura fue necesario ajustar los valores de la resistencia con ayuda del potenciómetro para contemplar los valores arriba de los 100°C, ya que esta tabla fue utilizada como referencia para los valores ahí contenidos.

Para el monitoreo de la señal fue necesario dar un procesamiento para hacer su conversión de volts a porcentaje de humedad y grados centígrados respectivamente.

- a) Se procedió a graficar cada uno de los valores de referencia con su respectivo valor y variable.

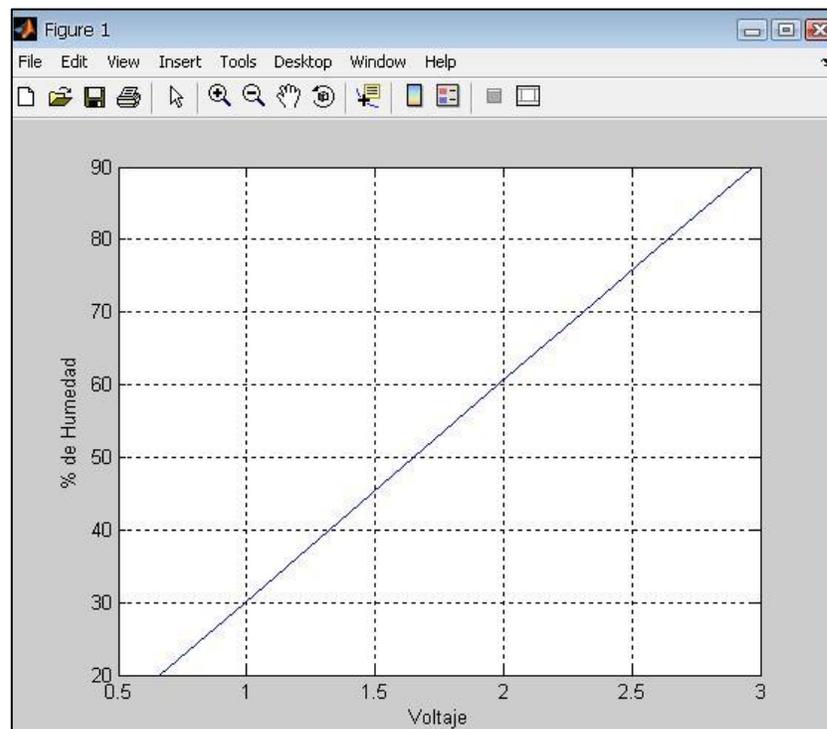


Figura 3-6. Gráficas de la relación voltaje-% de humedad.

Donde se observa el comportamiento lineal de la relación voltaje –humedad (Figura 3-6)

- b) Con la ayuda de la herramienta de Matlab: Basic Fitting es posible hacer la construcción gráfica obteniendo una aproximación lineal del comportamiento de la humedad versus voltaje, representada por la siguiente expresión.

$$\% \text{ de Humead} = 30.303(\text{Voltaje}) \quad 3-1$$

Con un valor residual de  $4.72e^{-14}$  indicando que hay una mínima dispersión de datos entre los reales y los graficados con la expresión encontrada anteriormente. Este comportamiento se observa en las gráficas de la Figura 3-7.



Esta ecuación nos permite obtener el valor del porcentaje de humedad en relación a la variación del voltaje; posteriormente será introducida al programa generado en LabVIEW para brindar el tratamiento a la señal. Ver sección 4.8.1.4.

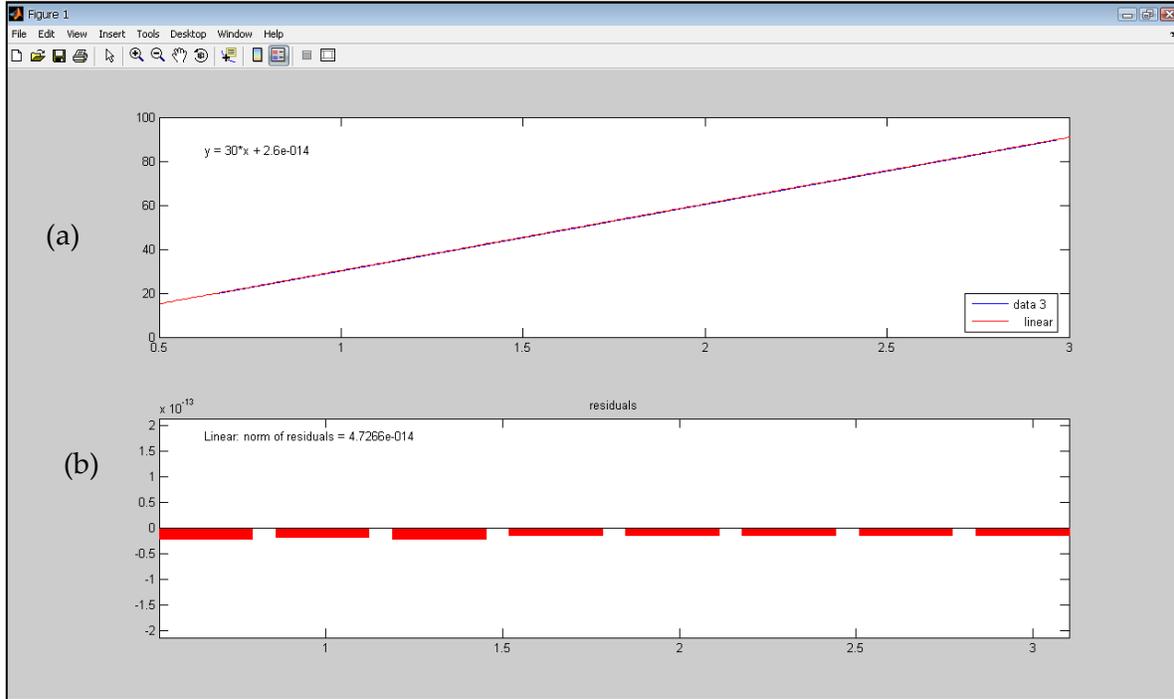


Figura 3-7: (a) Expresión lineal que representa el comportamiento de la humedad (b) dato de los residuos de la expresión encontrada.

En el caso del comportamiento de la temperatura se realizó el mismo procedimiento anterior, tomando de referencia los datos de la variación de la resistencia y variación de temperatura para ajustar el sensor; con auxilio de otros dos sensores de temperatura OS36-01 y Termopar tipo k, el sensor fue calibrado logrando verificar los valores obtenidos, logrando una relación voltaje temperatura con auxilio de la tarjeta de adquisición de datos USB- 6009.

Obteniendo los siguientes valores de las pruebas realizadas.

A un valor de resistencia = 24.5 KOhm

|                  |       |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temperatura (°C) | -11.1 | 26.7 | 42.8 | 69.9 | 91.4 | 102.2 | 113.0 | 123.8 | 134.6 | 145.4 | 156.2 | 161.6 |
| Voltaje (volts)  | 1     | 1.7  | 2    | 2.5  | 2.9  | 3.1   | 3.3   | 3.5   | 3.7   | 3.9   | 4.1   | 4.2   |

Tabla 3-4: Relación voltaje-temperatura



- a) Se procedió a graficar cada uno de los valores de referencia con su respectivo valor y variable.

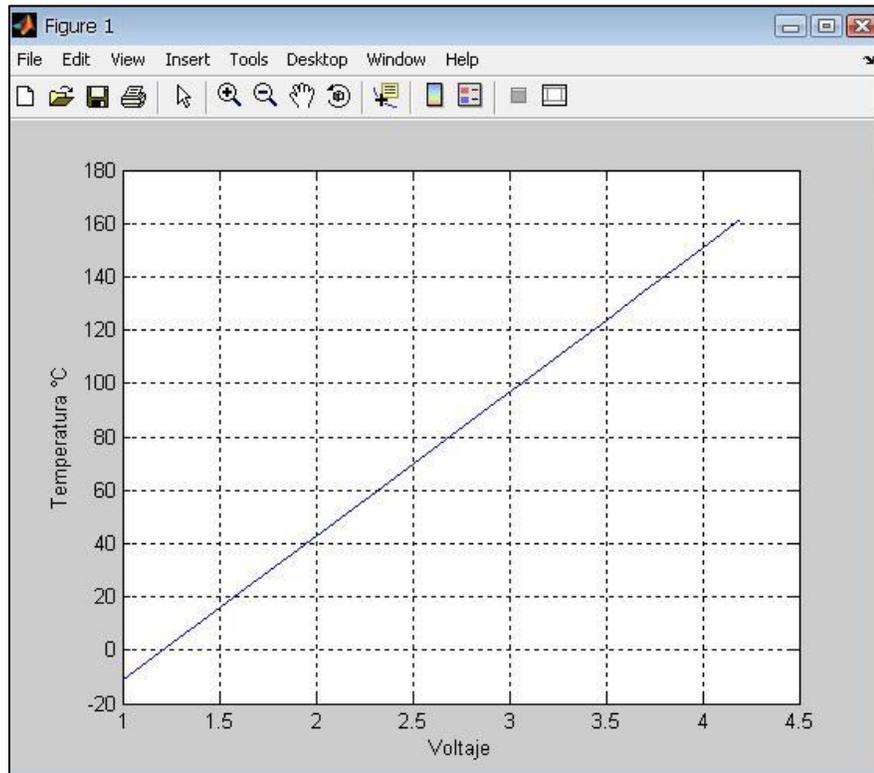


Figura 3-8: Gráficas de la relación voltaje - temperatura.

- b) Con la ayuda de la herramienta de Matlab: *Basic Fitting* es posible hacer la construcción gráfica obteniendo una aproximación lineal del comportamiento de la Temperatura versus voltaje, representada por la siguiente expresión.

$$\text{Temperatura}^{\circ}\text{C} = 53.961(\text{Voltaje}) - 65.042 \quad 3-2$$

Con un valor residual de 0.098604 indicando que hay una mínima dispersión de datos entre los reales y los graficados con la expresión encontrada anteriormente. Este comportamiento se puede observar en las gráficas de la Figura 3-9.

Esta ecuación nos permite obtener el valor de la temperatura en relación a la variación del voltaje; posteriormente será introducida al programa generado en LabVIEW para brindar el tratamiento a la señal. Ver sección 4.8.1.4

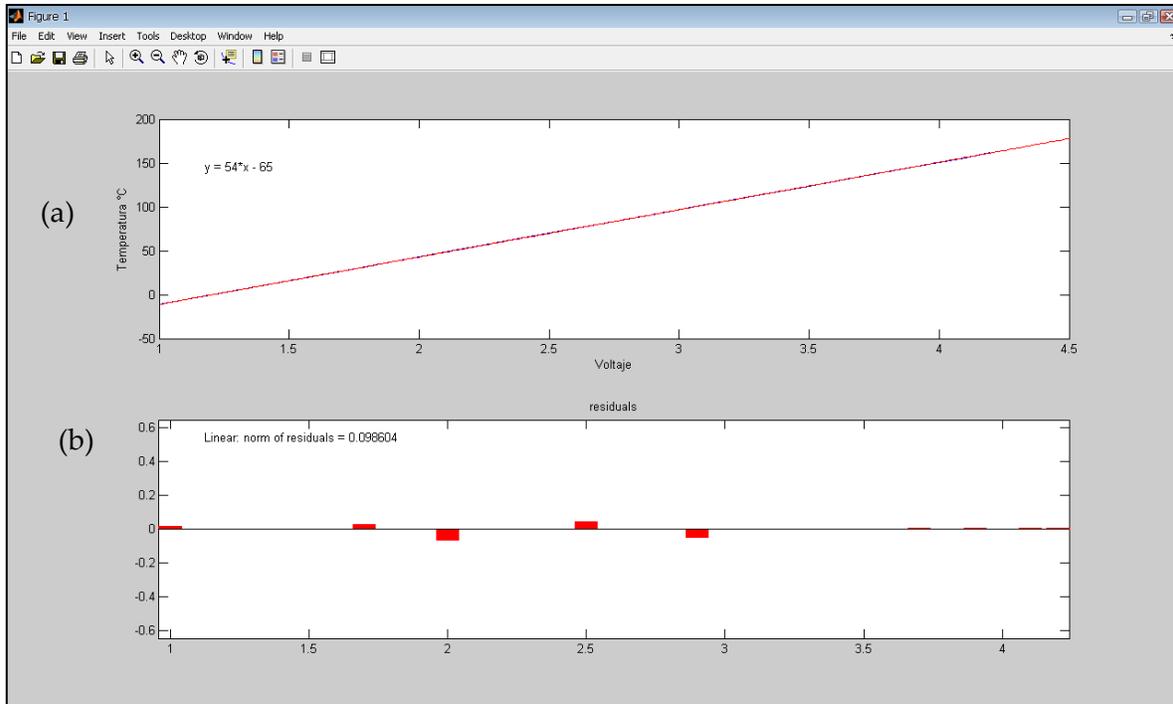


Figura 3-9: (a) Expresión lineal que representa el comportamiento de la humedad (b) dato de los residuos de la expresión encontrada.

### 3.2.1.4. Acoplamiento del sensor.

Dado que el dispositivo debe ir introducido en el tubo de calentamiento para poder sensar la condición de temperatura y humedad sin la presencia de fugas (esto con el objetivo de que se conserve la presurización dentro del mismo); fue necesario realizar un encapsulado con resina epóxica y catalizador, el cual fue introducido junto con los cables de conexión en una tuerca hexagonal de  $\frac{3}{4}$  de pulgadas, esto con la finalidad de que una vez endurecido y con la rosca ya hecha se pudiese adaptar sin problemas en la tapa del cilindro.

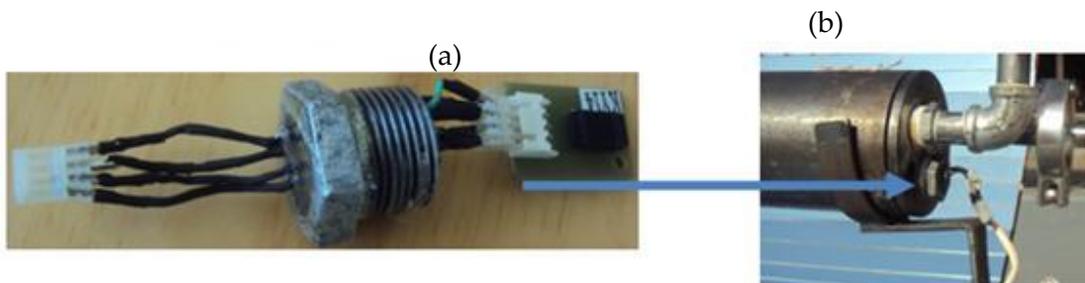


Figura 3-10 (a) sensor encapsulado y (b) ubicación del sensor en la cámara de calentamiento.



### 3.2.2. Sensor de presión

Para el monitoreo de este parámetro se utilizó el dispositivo PSI-100 el cual consiste en un sensor y circuito integrado que provee un comportamiento lineal ante la medición del parámetro de la presión, comprendido en un rango desde 0 a 100 psi (0-7 atm).



Figura 3-11 Sensor de presión PSI-100

#### 3.2.2.1. Características

| Características | Dispositivo   |
|-----------------|---|
| Campo de medida | Rango nominal: 100 psi  |
| Precisión       | $\pm 0.25\%$  |
| Linealidad      | Tiene una salida lineal de corriente continua   |
| Sensibilidad    | $\pm 0.01\%$  |
| Estabilidad     | Mediante pruebas experimentales se determinó que el sensor actúa de manera ideal ante condiciones externas. |

Tabla 3-5: Características del sensor de presión PSI-100

Este dispositivo representa una opción económica de adquisición en comparación con otros dispositivos que se pueden encontrar actualmente en el mercado.

#### 3.2.2.2. Funcionamiento.

El dispositivo debe ser alimentado en un rango de 0 a 10 volts, la salida está contemplada hasta un rango hasta 10 milivolts. Cuenta con un total de 4 pines con la siguiente disposición:

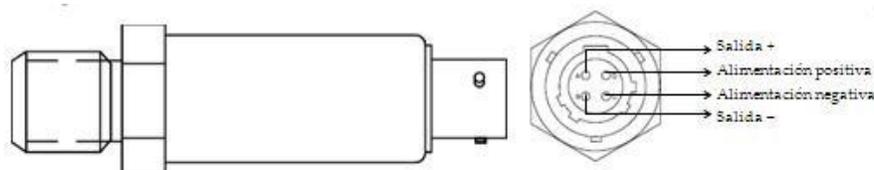


Figura 3-12: Esquema de conexión del sensor de presión



El dispositivo PSI-100 cuenta con una salida lineal por lo que para asegurar la confiabilidad y esclarecimiento de datos se verificaron las mediciones con el sensor PS-10,000 SERIES, realizando mediciones paralelas, se realizó la conversión de milivolts a volts dentro del programa y, a partir de ahí, establecer la relación voltaje-presión, dado que es una proporcionalidad lineal no fue necesario una ecuación que funcionara como modelo para el ajuste de datos.

### 3.2.3. Adquisición de datos.

La adquisición de datos consiste en la toma de muestras de un conjunto de señales físicas (sistema analógico) del mundo real, para convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se generan datos que puedan ser manipulados por una computadora, y otro dispositivo electrónico (sistema digital) [37].

El flujo de datos necesarios para la comunicación entre la computadora y las señales del sistema es realizado por la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) NI USB-6009<sup>10</sup>, esta proporciona conexión a ocho canales de entradas analógicas (AI), dos canales de salida analógica (AO), 12 canales de entrada- salida digital (DIO) y un contador de 32 bits de alta velocidad con interfaz USB.



Figura 3-13: Tarjeta de adquisición de datos DAQ.

La tarjeta DAQ está distribuida con canales, cada canal puede ser configurado de forma individual como entrada o salida de acuerdo a las necesidades del usuario.

#### 3.2.3.1. Características del funcionamiento de la DAQ.

- a) Voltaje de entrada +4.1 VCD/+5.25 VCD (80mA/500mA).
- b) Voltaje de salida +5 V/+4.85 V (200 ma).
- c) Voltaje de salida +2.5 V (1 ma).
- d) Temperatura ambiente de 0° C a 55° C.

A través de la tarjeta de adquisición de datos el sistema de inspección, realiza la adquisición y generación de los sensores instalados en la cámara de calentamiento.

---

<sup>10</sup> Ver especificaciones en anexos.



En el proceso de adquisición de datos se utiliza la DAQ, se involucra la recopilación de información de una forma automatizada, para manejar las entradas y salidas de datos, los datos adquiridos se visualizan, analizan y almacenan en la PC por medio de Ladview<sup>11</sup>. Lo antes expuesto brinda la posibilidad de realizar el monitoreo y adquisición en tiempos iguales a la dinámica del proceso, teniendo un rápido acceso a la información y a la toma de decisiones del sistema de calentamiento.

### 3.2.4. Válvulas de activación.

Para controlar automáticamente el flujo de aire a la entrada y salida del aire a la cámara de calentamiento fue necesario utilizar dos válvulas de solenoide la cual es operada electrónicamente y puede ser controlada por interruptores eléctricos simples. Para tal fin fue utilizada la válvula de dos vías normalmente cerrada, es una de las más comunes, la cual controla el flujo en una sola línea.

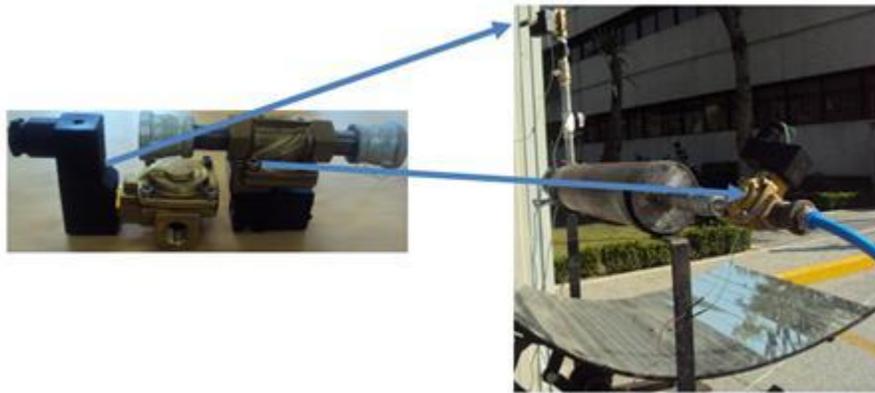


Figura 3-14: Válvulas solenoides y posición en la cámara de calentamiento

#### 3.2.4.1. Características

- Construcción de la válvula: Modelo diafragma de mando asistido de dos vías VDX2140.
- Válvula: Normalmente cerrada
- Tensión nominal: 24 VDC
- Conexión de rosa: 3/8 de pulgada
- Presión de prueba: 5 Mpa
- Diferencia mínima de presión trabajo ( $\text{kgf/cm}^2$ ): 0.02
- Consumo de 2.5 watts (0.1 Amperes).

<sup>11</sup> Entorno gráfico de programación.

### 3.2.4.2. Funcionamiento

El objetivo de las válvulas es permitir el paso de entrada y salida de aire a la cámara de calentamiento, las cuales son activadas mediante una señal de 5 volts proveniente de la tarjeta de adquisición de datos.

Para su debido funcionamiento fue necesario desarrollar una tarjeta que permitiera el acople y acondicionamiento proveniente de la tarjeta para ser enviada a las válvulas y que estas pudiesen activarse en el momento indicado.

El diagrama electrónico del arreglo para su activación se puede ver en la Figura 3-15.

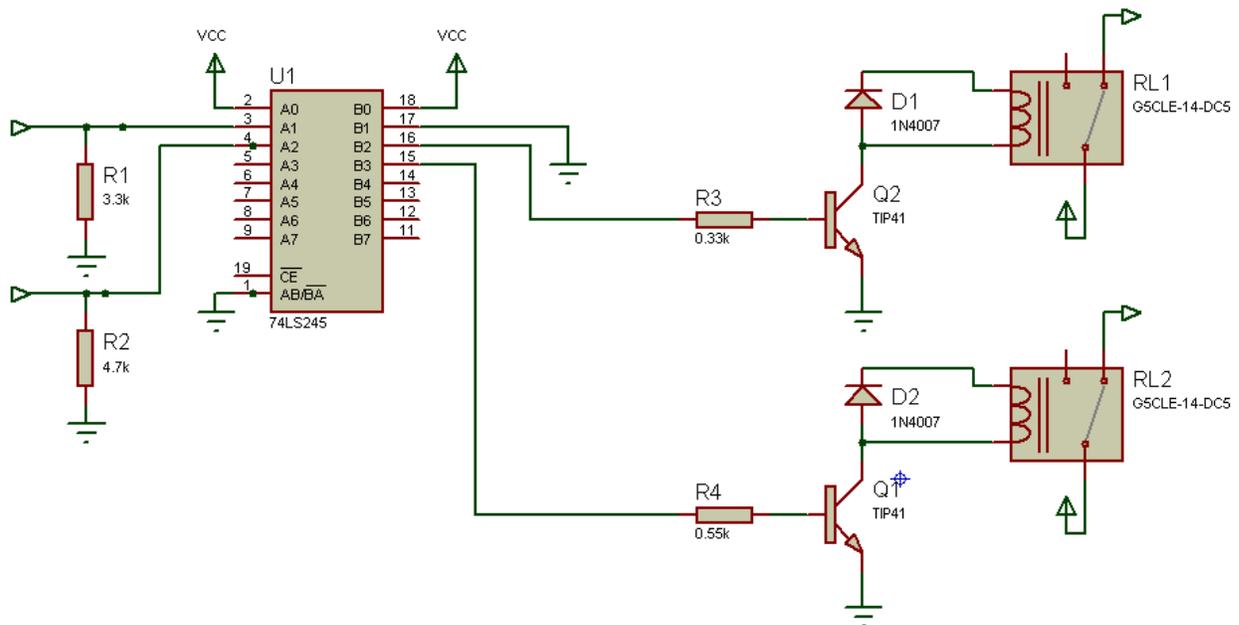


Figura 3-15: Diagrama electrónico del circuito de activación de las válvulas

### 3.2.5. Otros componentes

Fueron utilizados otros dos dispositivos cuya función principal fue la de un complemento al proceso. Los dos componentes se describen a continuación.



### 3.2.5.1. *Filtro para aire comprimido*

Fue necesario para que el aire se encontrara libre de agentes que pusieran en riesgo el producto al entrar en contacto para su selección se tomaron en cuenta características como presión, temperatura de operación y capacidad de filtrado [35].



Figura 3-16: Filtro utilizado para aire comprimido

### 3.2.5.2. *Manómetro gauge*

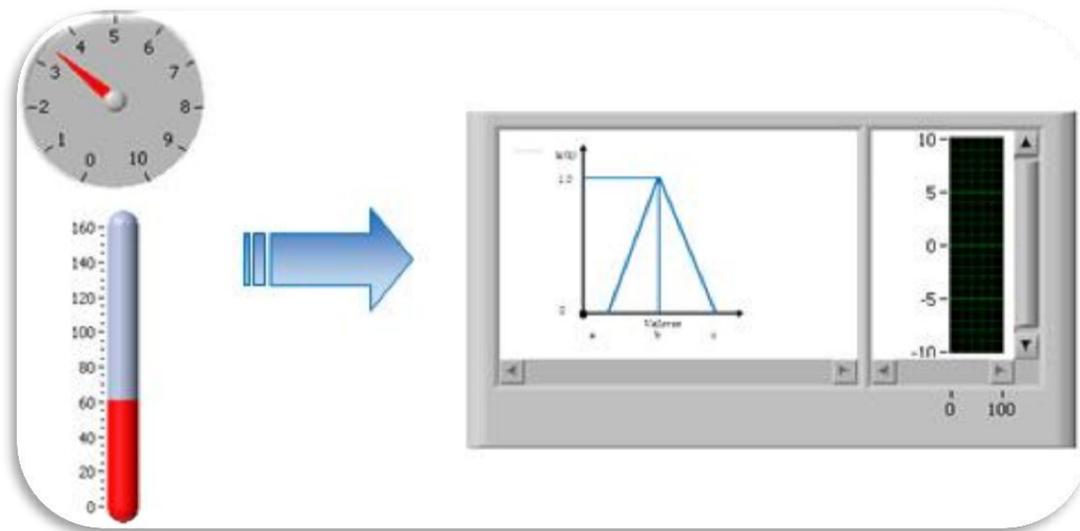
Se utilizó como complemento para monitorear la presión en la cámara de calentamiento. El cual funcionó como complemento para la verificación de los datos obtenidos.



Figura 3-17: Manómetro utilizado



# CAPÍTULO 4



## DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL

En este capítulo se presentan las técnicas de diseño utilizadas para generar el concepto del sistema de control a utilizar, una vez obtenido esto se desarrollan cada una de las etapas del sistema de control difuso el cual fue ejecutado en la plataforma de ambiente gráfico de LabVIEW.



## 4. Diseño y desarrollo del sistema de control.

Para desarrollar el sistema de control que permitiera la regulación de las variables fue necesario analizar y comprender el concepto del diseño actual lo que se traduce en la construcción del prototipo y de esta manera retomando los requerimientos y exigencias implementar el sistema de control, por lo que primeramente se analizó la generación del concepto.

### 4.1. Análisis y conceptualización del proyecto.

El desarrollo de un producto o servicio surge primordialmente de una necesidad y en base a externar los requerimientos que el producto deba satisfacer, es como empieza a crearse un concepto funcional del diseño [21].

Para la generación del concepto se tomó como referencia el trabajo de tesis: *“Concentración de energía solar para el secado de café pergamino”* realizado por el M. en I. Raúl Valderrábano Ramírez [35], donde por medio de la aplicación de la matriz del QFD determinó los requerimientos del cliente y los parámetros necesarios para el diseño del prototipo donde determinó como función general:

“Disminuir la humedad del café en un rango entre 56 y 60% a un rango entre 10 y 12% en tiempos menores a los sistemas actuales conservando la calidad del producto y utilizando una fuente de energía económica explotable al 100% y amigable con el medio ambiente”.

Esto puede verse representado en la Figura 4-1 [35].

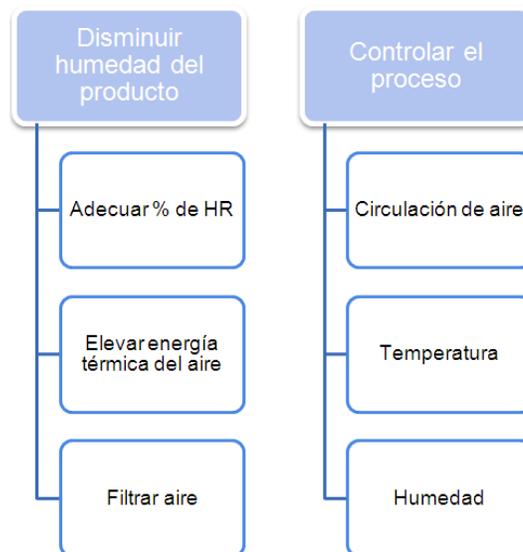


Figura 4-1: Funciones y subfunciones del diseño



La aplicación de la matriz QFD es una propuesta metódica, flexible desarrollada en 1972 por Yoji Akao, la cual ha tenido múltiples aplicaciones en el ramo industrial, su metodología se basa en la evaluación matricial de los diferentes enfoques del diseño del producto.

Una vez conocido el objetivo y función del prototipo se procede a desarrollar el software del sistema de control en base a la idea conceptual y requerimientos establecidos anteriormente.

Para la creación y validación del software se utilizó el método en espiral propuesto por Barry Boehm, es de tipo evolutivo, el cual consta de una serie de ciclos divididos en 4 tareas; cuando se han cumplido los objetivos de un ciclo se pasan al siguiente y finalmente se realizan pruebas para comprobar que el sistema cumple con los requisitos programados [18]. Su desarrollo se puede observar en la Figura 4-2.

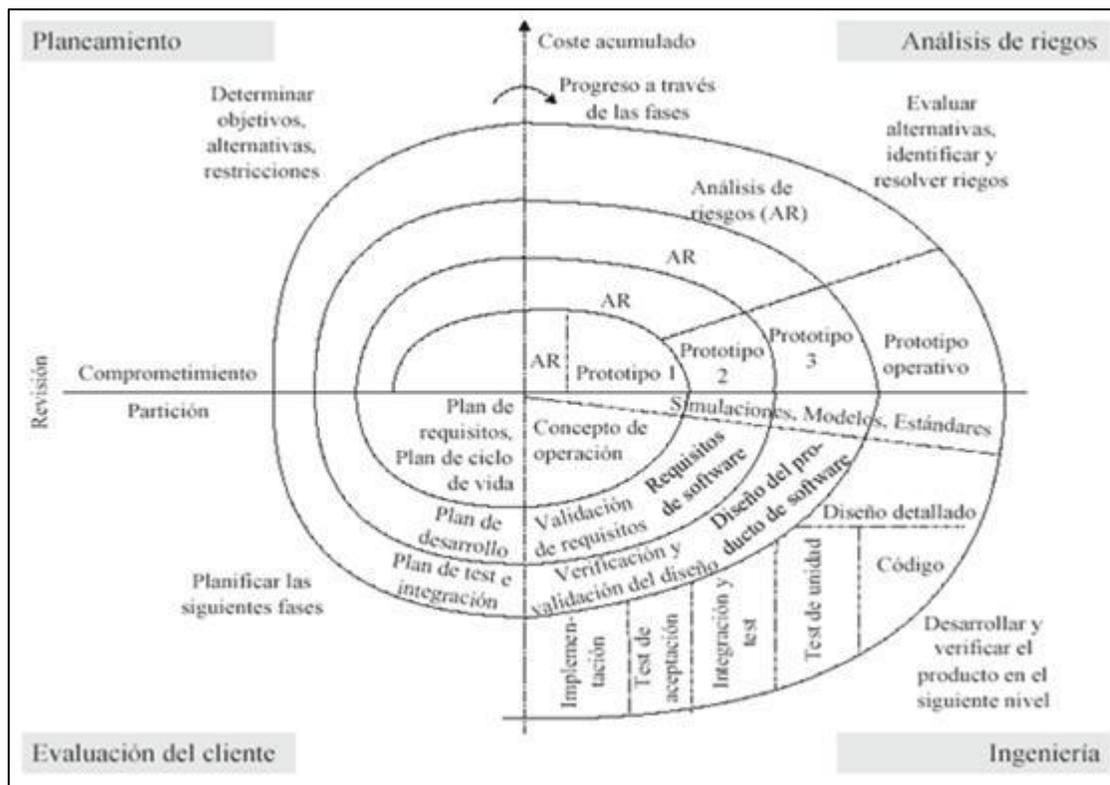


Figura 4-2 Modelo de espiral

Se tomó como referencia el trabajo de tesis: *“Monitoreo de una celda dinamométrica en el proceso de pruebas de automotores de VW”* realizado por el M. en I. José Alberto López Islas [21], donde aplicó la herramienta de modelo de espiral para el análisis y diseño del programa de monitoreo de señales de una celda dinamométrica. Los parámetros fueron contemplados desde la realización de prototipos, corrección de errores, pruebas en campo



y por último la validación del programa, dando resultados satisfactorios ya que al finalizar cada iteración se tiene una versión del producto permitiendo responder mejor ante variaciones del diseño original.

Tomando como referencia ambos métodos y realizando una conjunción entre los beneficios y resultados obtenidos de su aplicación se aplicó un modelo para el desarrollo del sistema de control difuso, cuya finalidad principal es:

**“Mantener un rango de temperatura interna en la cámara de calentamiento mayor a 160°C garantizando un flujo de salida necesario a la temperatura deseada, controlando la entrada y salida del aire a la cámara de secado con una presión interna menor a 7 Kg/cm<sup>2</sup> (para que sea considerado como gas ideal), con el objetivo de obtener una temperatura final adecuada para el secado del grano a una humedad relativa del 12%.”**

En la figura siguiente (Figura 4-3) se presenta el modelo del proyecto a seguir [21].

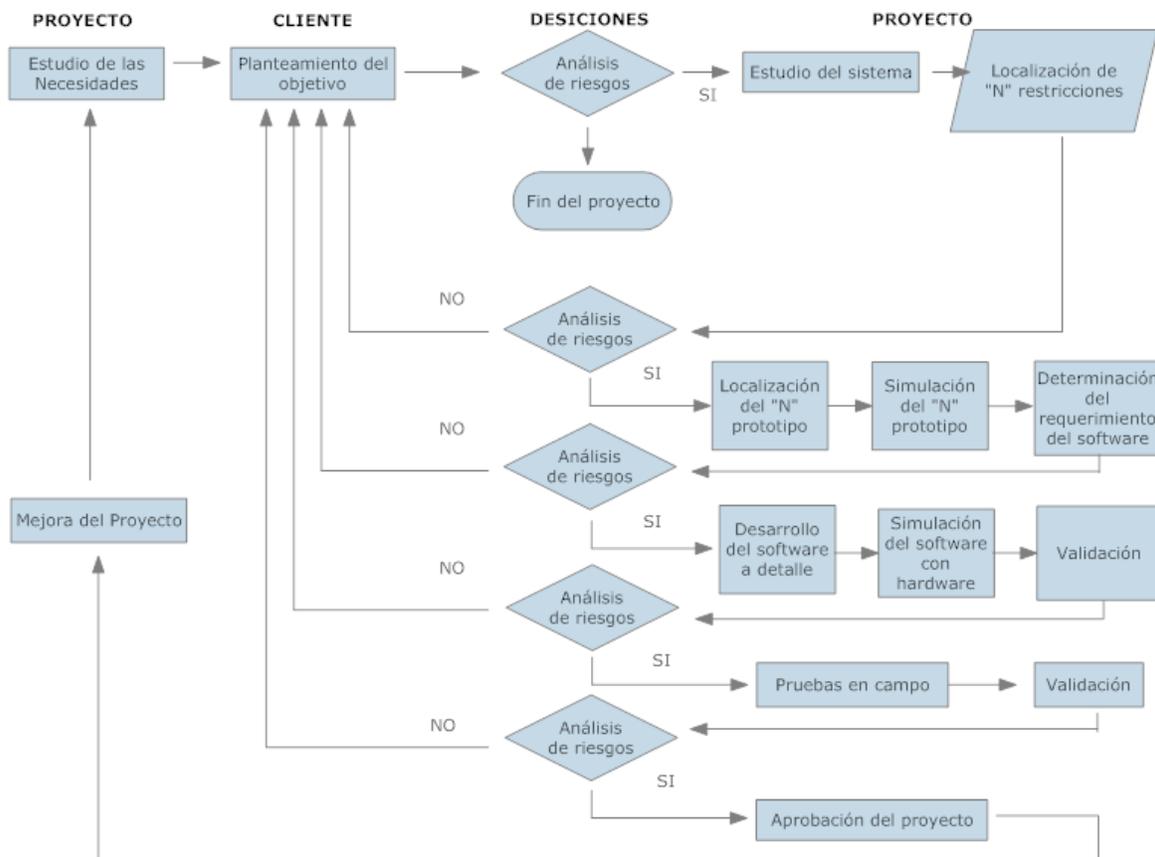


Figura 4-3: Modelo del proyecto a seguir

## 4.2. Desarrollo del sistema de control difuso

La etapa inicial en el diseño y aplicación de un controlador difuso es la recopilación de la información acerca del proceso a controlar, esta información constituirá la base de conocimiento del sistema el cual está integrado por los datos técnicos de los actuadores y sensores involucrados en el proceso.

El control difuso ejecuta las acciones apropiadas para controlar la entrada de aire a la cámara de secado y la salida de aire caliente hacia la siguiente etapa que lo constituye la tolva, donde estará el producto a secar; por lo que es necesario asociar todas las fuentes de conocimiento sobre el proceso para diseñar el control donde se requieren tomar en cuenta las siguientes características: (ver Figura 4-4)

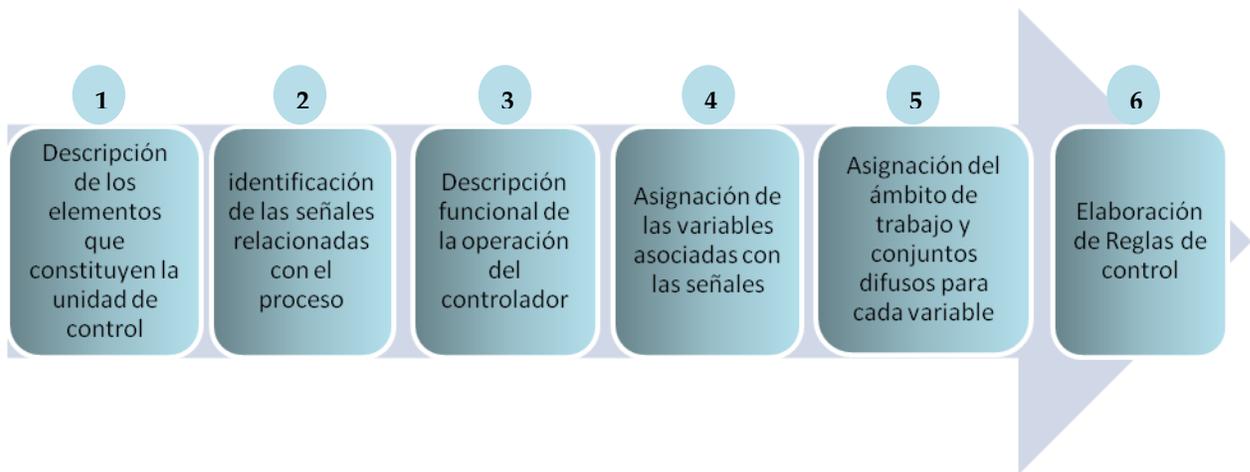


Figura 4-4: Consideraciones para el diseño del sistema de control.

### 4.2.1. Señales del sistema.

Las señales tomadas en cuenta para el controlador son de dos tipos: de estado y de acción.

Las señales de estado son proporcionadas por los sensores del sistema, e indican el estado actual del mismo, las cuales son proporcionadas por el sensor de temperatura, humedad y presión.

Las señales de acción se emplean para activar a los diferentes actuadores que cambian las condiciones del sistema, señal utilizada para la activación de las válvulas para la entrada y salida del aire. (Señal del tipo encendido y apagado).

### 4.2.2. Variables del sistema

A partir del sistema actual se asignan las variables de entrada y salida del controlador. Estas variables se asocian con las señales de los sensores y actuadores utilizados:



### 4.2.3. Temperatura

Variable de entrada al controlador que indica el nivel de referencia de la temperatura de la zona de calentamiento. Por la naturaleza del proceso una vez alcanzado el rango de temperatura entre los 160 y 225 °C internos del tubo, es la temperatura adecuada para el secado del producto. El rango de temperatura fue obtenido primeramente por medio de experimentación donde la cámara de calentamiento fue sometida a pruebas junto con el colector solar, realizando mediciones de temperatura y humedad a la salida de la cámara determinando que en el rango de 160-225 °C en la cámara de calentamiento permitiría que la temperatura de la salida del aire estará comprendida entre 60 y 70 °C; temperatura necesaria para la disminución del porcentaje de humedad y secado del producto.

### 4.2.4. Presión.

Variable de entrada al controlador cuya señal indica el valor de referencia de la presión, considerando para este caso un intervalo entre 5 y 7 bar (5-7 kg/cm<sup>2</sup>) para alcanzar la presurización deseada. El aire es comprimido para aprovechar su incremento de conductividad térmica, y sus parámetros se deben de mantener por debajo de 7 bar (7 kg/cm<sup>2</sup>) para garantizar que se comporte como un gas ideal lo que ayuda a predecir el comportamiento experimental del gas siendo sometido a bajos niveles de presión y altas temperaturas.

### 4.2.5. Flujo másico.

Es la variable de salida del controlador que actúa sobre el estado de la válvula de entrada y salida del tanque de calentamiento. Para lo cual fue utilizado dos válvulas del tipo Abierto/Cerrado (2/2) que toma valores de 0 a 5 volts.

## 4.3. Descripción funcional del controlador.

Las acciones que un controlador lógico difuso genera para controlar el proceso dependen básicamente del conocimiento adquirido en torno a la operación manual de los mecanismos propios para el control del mismo. Este conocimiento se expresa en lenguaje natural y debe proporcionar una idea clara del objeto específico de control, así como el funcionamiento conciso de los actuadores involucrados en el proceso.

Utilizando la nomenclatura establecida en la sección (2.4.5.2 etapa de inferencia, evaluación de las reglas de control) para las señales que intervienen en el sistema, la descripción funcional en lenguaje natural que indica los requerimientos de operación del controlador de entrada y salida de aire. El programa generado en LabVIEW es el encargado de mandar las señales a las válvulas para su activación, mediante la adquisición de las señales de los sensores de presión y temperatura.



A continuación se presentan los requerimientos de activación de para válvula 1

Donde (P): presión interna del tubo. (T): Temperatura interna del tubo.

**Si**  $5 \text{ bar} < (P) < 7 \text{ bar}$  **y**  $160 \text{ C}^\circ < (T) < 225\text{C}^\circ$ ; **entonces** Válvula 1 se abre.

**Si**  $(P) < 5 \text{ bar}$  **y**  $(T) < 160 \text{ C}^\circ$ , **entonces** Válvula 1 se abre.

**Si**  $(P) > 5 \text{ bar}$  **y**  $(T) > 160 \text{ C}^\circ$ , **entonces** Válvula 1 se cierra.

**Si**  $(P) < 5 \text{ bar}$  **y**  $(T) > 160 \text{ C}^\circ$ , **entonces** Válvula 1 se abre.

**Si**  $(P) < 5 \text{ bar}$  **y**  $(T) > 160 \text{ C}^\circ$ , **entonces** Válvula 1 se abre.

A continuación se presentan los requerimientos de activación de para válvula 2.

**Si**  $5 \text{ atm} < (P) < 7 \text{ bar}$  **y**  $160 \text{ C}^\circ < (T) < 225\text{C}^\circ$ ; **entonces** Válvula 2 se abre.

**Si**  $(P) < 5 \text{ bar}$  **y**  $(T) > 160 \text{ C}^\circ$ , **entonces** Válvula 2 se cierra.

**Si**  $(P) < 5 \text{ bar}$  **y**  $(T) < 160 \text{ C}^\circ$ , **entonces** Válvula 2 se cierra.

**Si**  $(P) > 5 \text{ bar}$  **y**  $(T) > 160 \text{ C}^\circ$ , **entonces** Válvula 2 se abre.

**Si**  $(P) > 5 \text{ bar}$  **y**  $(T) > 250 \text{ C}^\circ$ , **entonces** Válvula 2 se cierra.

#### 4.4. Etiquetas de los conjuntos difusos.

Cada variable que se emplea para modelar el funcionamiento del controlador toma valores de un rango definido. Este rango constituye el universo de trabajo de la variable y depende del ambiente de la misma. A lo largo del universo de trabajo de una variable se establecen el dominio y las etiquetas lingüísticas de los conjuntos difusos relacionados con la misma.

Para asignar los conjuntos difusos a las variables que intervienen en el diseño del control se consideran los siguientes parámetros [29].

- a) El número de funciones de membresía deben ser lo suficientemente amplia para contemplar el ruido que se presenta en la medida.
- b) El traslape entre las funciones de membresía es deseable y necesaria, ya que de otra manera, el controlador puede correr dentro de estados pobremente definidos lo que redundará en una mala definición de la salida.
- c) Se recomienda iniciar con funciones de membresía triangulares. Todas las funciones de membresía para una entrada o salida particular deben ser triángulos simétricos del mismo ancho. La parte más a la izquierda y a la derecha deben ser rampas.



d) También se deben considerar traslapes de al menos 50%. El ancho deber ser inicialmente seleccionado para que cada valor del universo es un miembro de al menos dos funciones de membresía, excepto para los elementos de los extremos.

Al utilizarlas nos permite tener ciertas ventajas.

- a) La ejecución es muy simple
- b) Es posible manejar las señales de control en sus valores extremos.
- c) Puede ser una manera intuitiva de escribir reglas.

Considerando las variables, reglas anteriores y la teoría de inferencia y evaluación de las reglas de control de la sección 2.4.5.2. se proponen 7 conjuntos difusos con funciones de membresía triangulares para las variables de temperatura, mientras que para la variable de presión se proponen 6 funciones de membresía y para la variable de salida se proponen dos funciones del tipo Singleton ya que únicamente toma dos valores de entrada o salida.

A continuación se presentan las etiquetas (valores lingüísticos) asociados a los conjuntos difusos de cada variable y posteriormente se presenta la afinación a las funciones de membresía.

#### 4.4.1. Conjuntos para la variable temperatura (T).

Los valores de la variable Temperatura interna del cilindro puede fluctuar desde un rango de temperatura ambiente (lo cual está en dependencia de la zona, y estación) hasta un rango aproximado de 260 C°, sin embargo se estima que la temperatura necesaria para un secado homogéneo del producto se encuentra en el rango de 160 C° y 225 C°, un rango menor a este intervalo no garantiza que la temperatura de salida sea la adecuada para el secado del producto; por lo tanto se establecen diferentes conjuntos en relación al rango entre los niveles involucrados en el proceso.

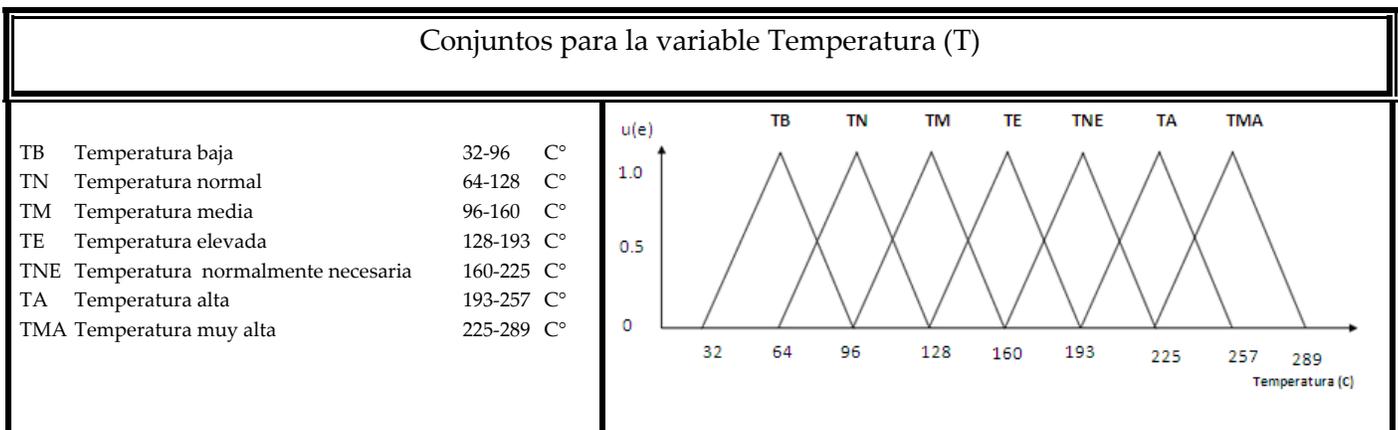


Figura 4-5: Conjuntos para la variable temperatura.



#### 4.4.2. Conjuntos para la variable presión (P)

Los valores de la variable Presión interna del cilindro puede fluctuar desde un rango de 0 a 7 bar; sin embargo se estima que la presión necesaria para un secado homogéneo del producto y lograr la presurización del aire en la cámara de secado se encuentra en el rango 5 a 7 bar. Un rango menor a este intervalo no puede garantizar la suficiente cantidad de flujo másico a ser entregado para el secado de café y un rango mayor el aire no cumple con las condiciones de gas ideal. Los conjuntos establecidos para el rango de presión involucrado en el proceso se presentan a continuación.

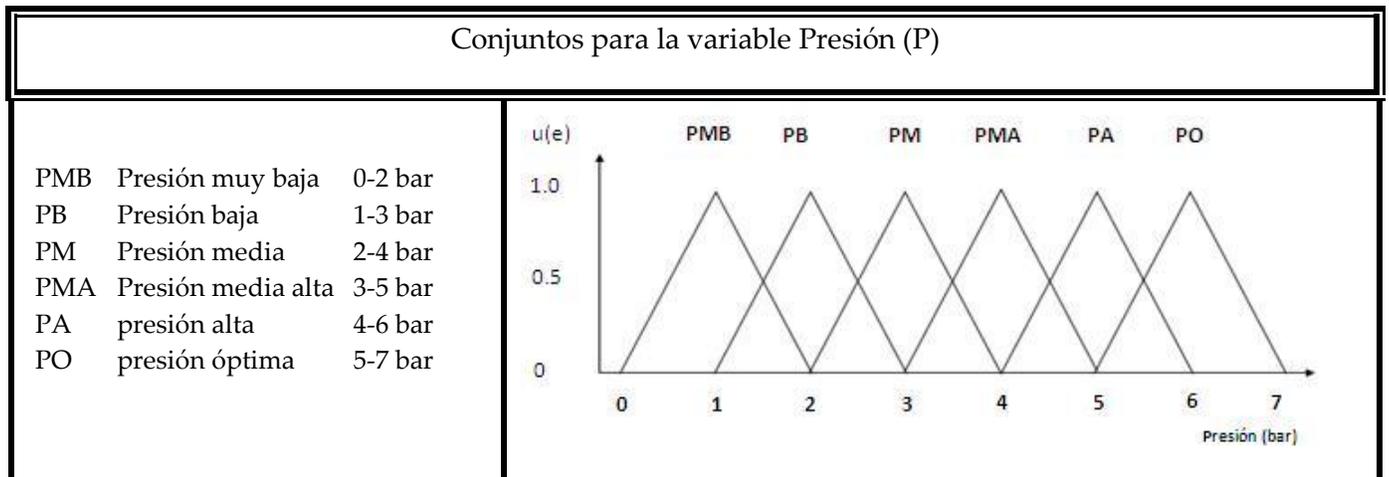


Figura 4-6: Conjuntos difusos para la variable Presión

#### 4.4.3. Conjuntos para la variable salida (Flujo másico).

Debido a que la válvula de desagüe automática del tanque de proceso es del tipo “Abierto/Cerrado”, la variable válvula solo puede tener dos conjuntos, el primero denominado: “Singleton nominal bajo” que agrupa los valores que se aseguran una condición de estado “Cerrada” en la válvula. El segundo conjunto denominado “Singleton nominal alto” que agrupa los valores que aseguran una condición de estado “Abierta” en la válvula. Se consideraron valores de 0 y 5 (representativos del voltaje proveniente de la *DAQ*) para la activación del cambio de estado ya sea abierto o cerrado. Recordando que singleton se refiere cuando el sistema puede tomar valores cerrados y condicionales de si y no.

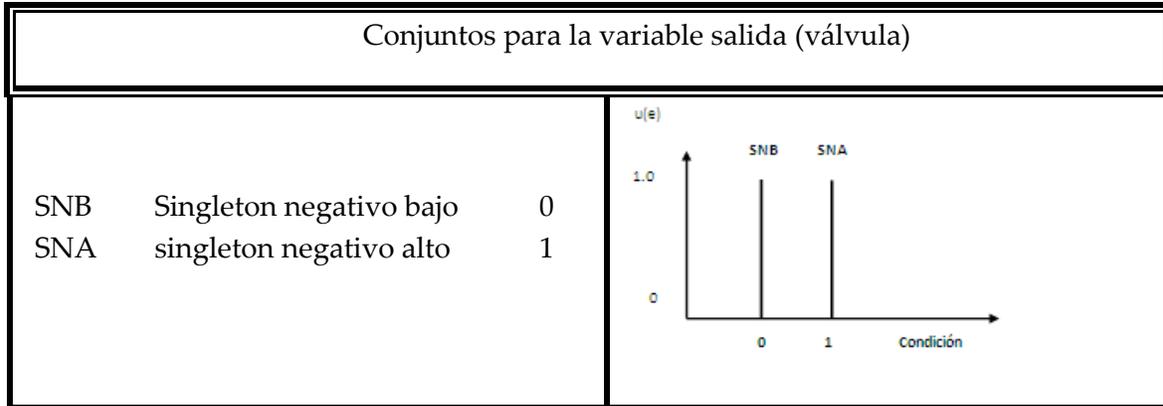


Figura 4-7: Conjuntos difusos para la variable de salida

#### 4.5. Reglas de control.

El conjunto de reglas de control representa los lineamientos de operación que debe seguir el controlador, tomando como base la descripción funcional del proceso a controlar. Las reglas de control establecen en que momento se debe apagar y cuando se debe activar la válvula de pase. Estos cambios se efectúan al evaluar el rango de parámetros óptimos tanto de temperatura como de presión para lograr el óptimo secado.

Una de las formas para representar las reglas de control es mediante una matriz cuyas entradas representan los diferentes conjuntos de las variables de entrada al controlador (temperatura y presión) y las salidas representan el estado de las variables de salida del controlador (estado de abierto y cerrado de las válvulas). A continuación se presenta el arreglo en forma matricial.

**Válvula            Condiciones**

V1 Válvula uno    **C** Cerrada    = **SNB(singleton normalmente bajo)**

V2 Válvula dos    **A** abierta      = **SNA(singleton normalmente alto)**

|         |     | Válvula 2   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------|-----|-------------|---|---|---|---|---|---|---|
|         |     | Temperatura |   |   |   |   |   |   |   |
| Presión | PMB | C           | C | C | C | C | C | C | C |
|         | PB  | C           | C | C | C | C | C | C | C |
|         | PM  | C           | C | C | C | C | C | C | C |
|         | PMA | C           | C | C | C | C | C | C | C |
|         | PA  | C           | C | C | C | A | C | C | C |
|         | PO  | C           | C | C | C | A | A | A | A |

|         |     | Válvula 1   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------|-----|-------------|---|---|---|---|---|---|---|
|         |     | Temperatura |   |   |   |   |   |   |   |
| Presión | PMB | A           | A | A | A | A | A | A | A |
|         | PB  | A           | A | A | A | A | A | A | A |
|         | PM  | A           | A | A | A | A | A | A | A |
|         | PMA | A           | A | A | A | A | A | A | A |
|         | PA  | A           | A | A | A | C | A | A | A |
|         | PO  | C           | C | C | C | C | C | C | C |

Figura 4-8: Matriz de reglas de control para válvula 1 y 2.

De igual forma pueden ser representado en proposiciones de la forma **Si** premisa **Entonces** consecuente. En este caso la premisa está constituida por el estado de las variables de entrada y el consecuente por el estado de las variables de salida, donde



analizando las matrices anteriores se obtendrá 42 reglas de control para cada una de las válvulas, donde estas permiten obtener la condición de “Totalidad en el conjunto de Reglas” asegurando que para cualquier combinación de las condiciones de estado existe una acción de control correspondiente.

## 4.6. Funciones de membresía

### 4.6.1. Funciones de membresía de los conjuntos de la variable temperatura.

En la sección 4.4.1 se establecieron los conjuntos para las variable Temperatura donde los rangos oscilan desde una temperatura interna inicial del tubo aproximadamente de 32 C° hasta un valor máximo de 288 C° estableciéndose un total de 7 funciones de membresía tipo triangular. Con un rango de 32 valores entre cada función de membresía.

Si se desean establecer los valores de las variables en números en formato binario, se necesita establecer la sensibilidad del controlador, misma que se deriva del proceso de conversión A/D por lo general es más común utilizar un controlador de 8 bits.

$$S = \frac{T_{max} - T_{ref}}{2^n - 1} \quad 4-1$$

$$S = \frac{[288 - 32]^\circ C}{2^{8 \text{ bits}} - 1}$$

$$S = 1.0039 \frac{^\circ C}{bit}$$

Donde se tiene una relación aproximada de 1:1, es decir por cada valor de temperatura un valor de 1 bits, se contempla iniciar con 32 C° = 0 bits y así sucesivamente hasta complementar el conjunto. El rango de 32 valores se toma como referencia de:

$$Rango = \frac{No. de Bits}{No. de funciones de membresía + 1} \quad 4-2$$

$$S = \frac{255}{7 + 1}$$

$$S = 32 \text{ bits}$$

Se le agrega el +1 dado a la simetría de la función de membresía y la conjunción con el valor de la pendiente, es decir uno de los valores forma parte de la pendiente y a la vez forma parte de uno de los extremos del triángulo, este valor se recorre, agregando un espacio extra.

La relación establecida se presenta en lo referente al rango y el número de bits de la variable temperatura se presentan en la siguiente tabla:



| Nomenclatura          |     | C°      | Bits    |
|-----------------------|-----|---------|---------|
| Temperatura baja      | TB  | 32-96   | 0-32    |
| Temperatura normal    | TN  | 64-128  | 32-96   |
| Temperatura media     | TM  | 96-160  | 64-128  |
| Temperatura elevada   | TE  | 128-193 | 96-159  |
| Temperatura necesaria | TNE | 160-225 | 128-191 |
| Temperatura alta      | TA  | 193-257 | 159-223 |
| Temperatura muy alta  | TMA | 225-289 | 191-255 |

Tabla 4-1: Relación de rangos y bits del conjunto de la variable temperatura

#### 4.6.2. Funciones de membresía de los conjuntos de la variable presión

De manera análoga realizamos el mismo procedimiento para obtener el formato binario con la variable Presión, tomando en cuenta que anteriormente se establecieron las 6 funciones de membresía, con 36 valores en cada rango de la función.

Aplicamos la misma fórmula para determinar el formato binario:

$$S = \frac{P_{ref}}{2^n - 1} \quad 4-3$$

$$S = \frac{[7]^\circ C}{2^{8 \text{ bits}} - 1}$$

$$S = 1.0.027451 \frac{\text{bar}}{\text{bit}}$$

Donde se tiene una relación aproximada de 0.027 bar/bits, es decir por cada valor de 1 bit se puede considerar un valor aproximado de 0.027451 bar. Se contempla iniciar con un parámetro de 36 bits=1 bar, y así sucesivamente hasta complementar el conjunto. El rango de 36 valores se toma como referencia de:

$$Rango = \frac{No. de Bits}{No. de funciones de membresía + 1} \quad 4-4$$

$$S = \frac{256}{6 + 1}$$

$$S = 36 \text{ bits}$$

Se le agrega el +1 dado a la simetría de la función de membresía y la conjunción con el valor de la pendiente

La relación establecida se presenta en lo referente al rango y número de la variable temperatura se presenta en la siguiente Tabla 4-2



| Nomenclatura       |     | Bar | Bits    |
|--------------------|-----|-----|---------|
| Presión muy baja   | PMB | 0-2 | 0-73    |
| Presión baja       | PB  | 1-3 | 36-109  |
| Presión media      | PM  | 2-4 | 73-146  |
| Presión media alta | PMA | 3-5 | 109-182 |
| presión alta       | PA  | 4-6 | 146-219 |
| presión óptima     | PO  | 5-7 | 182-255 |

Tabla 4-2: Relación de rangos y bits del conjunto de la variable Presión

#### 4.7. Controlador difuso.

De acuerdo a lo analizado en la sección anterior, se procede a analizar el diseño del sistema de control a partir de las entradas (Presión y Temperatura), las cuales generan la salida de activación de las válvulas.

En el funcionamiento del mismo se distinguen tres partes fundamentales, una primera etapa de fusificación de los valores de entrada, otra de evaluación de reglas de control difusas (inferencia) y una última de defusificación para obtener valores concretos de salida.

Para el desarrollo del programa de control se recurrió a la herramienta de programación de ambiente gráfico LabVIEW, que incorpora los principales elementos de nuestras variables de entrada y salida y el comportamiento de estado de (abierto y cerrado) de las válvulas que permitirán el acceso del aire a la siguiente fase del proceso.

El programa permite obtener la respuesta del controlador de acuerdo a las reglas y condiciones que serán explicadas a continuación en la descripción de las etapas del controlador difuso. En donde utiliza los datos proporcionados por el controlador para simular su influencia en el proceso a controlar.

El módulo de control interactúa con una serie de operaciones que se encargan de simular el comportamiento de la unidad de de proceso que en este caso es el control en la zona de calentamiento y estado de válvulas.

##### 4.7.1. Etapa de fusificación del controlador difuso.

La fusificación de una entrada es el proceso en el cual se toma el valor numérico de la entrada (Temperatura y presión) y se calcula el grado de pertenencia para cada conjunto difuso o función de membresía previamente definida, generando en su salida valores difusos  $u(e)$  utilizados posteriormente en la etapa de inferencia.

Lo anterior se expresa en la siguiente Figura 4-9

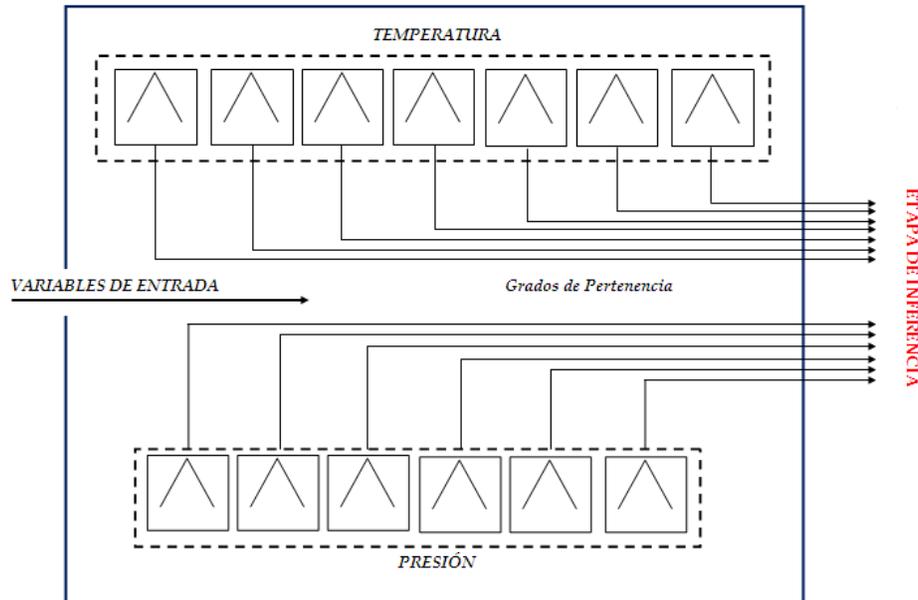


Figura 4-9: Etapa de Fusificación.

Como primera estancia es necesario captar las señales de los sensores de temperatura, humedad y presión, para lo cual fue necesario procesar la señal mediante un filtro promediador que consiste en un filtro de paso bajo. Fue necesario la implementación del filtro para proceder a la adquisición de las señales de las variables de entrada al programa principal.

#### 4.7.1.1. Filtro promediador.

La técnica de la media móvil o "*moving average*" es muy utilizada para obtener promedios sobre muestras a medidas que estas van ingresando. La idea del promedio consiste en tomar  $N$  *muestras*, sumarlas y dividir las por  $N$ . El promedio es "móvil" cuando se realiza el cálculo cada vez que se obtiene una nueva muestra tomando las  $N$  anteriores.

El promedio móvil se utiliza por sus características de filtrado del ruido superpuesto a la señal, que si es de característica aleatorias y de valor medio nulo, cuando se promedian varias mediciones, el ruido tiende a cancelarse. Y cuanto mayor sea la constante de promediación, mejor será el efecto de cancelación de ruido [38].

Matemáticamente puede expresarse la ecuación como:

$$Rango = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k) \quad 4-5$$

Donde:

$y(n)$  = Valor calculado

$N$  = Tamaño de la ventana

$x(n - k)$  = Señal de entrada, donde

$k$  = Índice para recorrer los valores a promediar

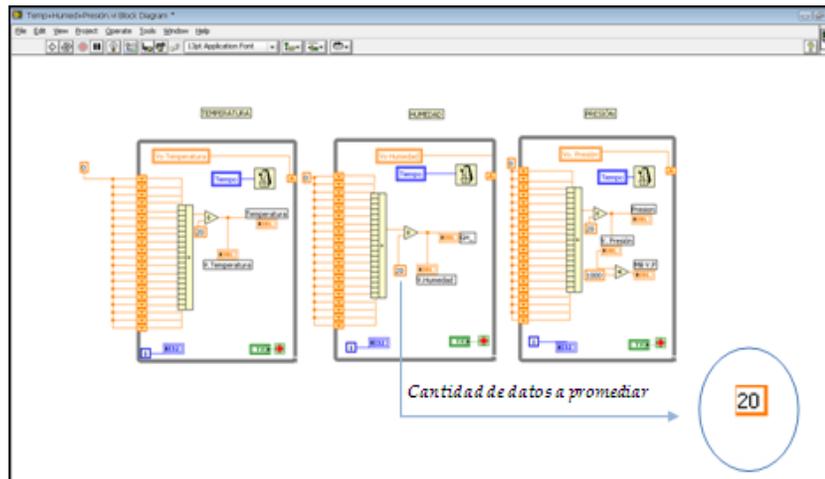


Figura 4-10: promedio móvil ponderado

En la Figura 4-10 se puede observar una de las ventanas del archivo promedio móvil simple, donde la señal es recibida de los sensores. Posteriormente la señal es retornada hacia la fase de fusificación. En la señal de entrada el dato avanza en cada paso del algoritmo una posición, en la secuencia de entrada. Para realizar el promedio se determinó que un valor de 20 muestras es suficiente para obtener una señal limpia y con disminución de ruido, lo cual fue determinado experimentalmente. Este archivo esta conformado por un bucle While que permite que éste funcione mientras el programa principal se este ejecutando.

Posteriormente a la adquisición de la señal es necesario encontrar los grados de pertenencia anteriormente citados para las funciones de membresía de ambas variables con la ayuda de las funciones de membresía presentadas en la Tabla 2-1. Las siguientes tablas: Tabla 4-3 y Tabla 4-4 muestran la ecuación a utilizar y los valores que se necesitan para sustituirlos en la ecuación tanto para la variable temperatura como presión respectivamente.



| Variable Lingüística       | Parámetros (a,b,c)                  | Función   |
|----------------------------|-------------------------------------|---|
| Temperatura Baja (TB)      | a= 32 C°<br>b= 64 C°<br>c= 96 C°    | $u(e) = \begin{cases} 1, T_{entrada} = b \\ \frac{T_{entrada} - (a)}{b - a} u(e) \text{ si } a \leq T_{entrada} < b \\ \frac{T_{entrada} - (c)}{b - c} u(e) \text{ si } b \leq T_{entrada} < c \\ 0 \text{ de otra manera} \end{cases}$ |
| Temperatura Normal (TN)    | a= 64 C°<br>b= 96 C°<br>c= 128 C°   |   |
| Temperatura Media (TM)     | a= 96 C°<br>b= 128 C°<br>c= 160 C°  |   |
| Temperatura Elevada (TE)   | a= 128 C°<br>b= 160 C°<br>c= 193 C° |   |
| Temperatura Necesaria (TN) | a= 160 C°<br>b= 193 C°<br>c= 225 C° |   |
| Temperatura Alta (TA)      | a= 193 C°<br>b= 225 C°<br>c= 257 C° |   |
| Temperatura Muy Alta (TMA) | a= 225 C°<br>b= 257 C°<br>c= 289 C° |   |

Tabla 4-3: Función de membresía y grado de pertenencia para la variable Temperatura.



| Variable Lingüística     | Parámetros (a,b,c)               | Función   |
|--------------------------|----------------------------------|---|
| Presión Muy Baja (PMB)   | a= 0 bar<br>b= 1 bar<br>c= 2 bar | $u(e) = \begin{cases} 1, P_{entrada} = b \\ \frac{P_{entrada} - (a)}{b - a} u(e) \text{ si } a \leq P_{entrada} < b \\ \frac{P_{entrada} - (c)}{b - c} u(e) \text{ si } b \leq P_{entrada} < c \\ 0 \text{ de otra manera} \end{cases}$ |
| Presión Baja (PB)        | a= 1 bar<br>b= 2 bar<br>c= 3 bar |   |
| Presión Media (PM)       | a= 2 bar<br>b= 3 bar<br>c= 4 bar |   |
| Presión Media Alta (PMA) | a= 3 bar<br>b= 4 bar<br>c= 5 bar |   |
| Presión Alta (PA)        | a= 4 bar<br>b= 5 bar<br>c= 6 bar |   |
| Presión Óptima (PO)      | a= 5 bar<br>b= 6 bar<br>c= 7 bar |   |

Tabla 4-4: Función de membresía y grado de pertenencia para la variable Presión

A continuación se muestra la estrategia para el cálculo de los grados de pertenencia con ayuda del software LabVIEW se simplifica la realización de estos cálculos.

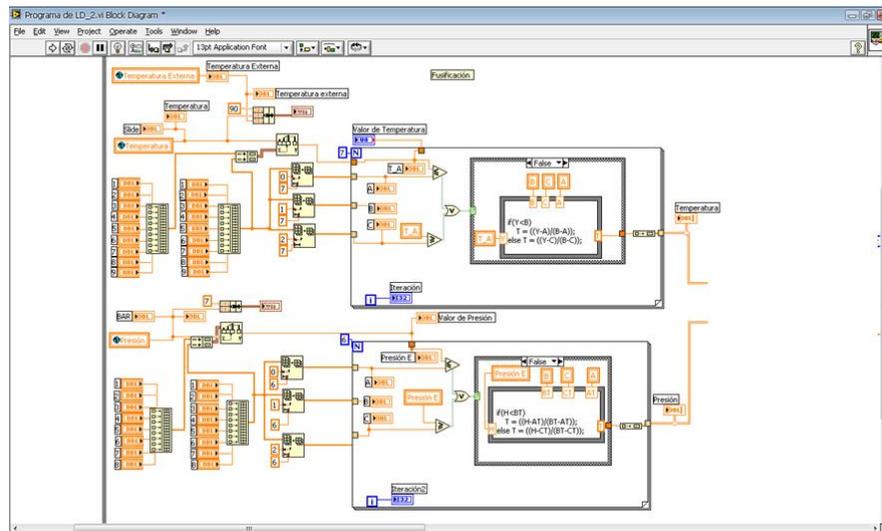


Figura 4-11: Diagrama de bloques de etapa de Fusificación

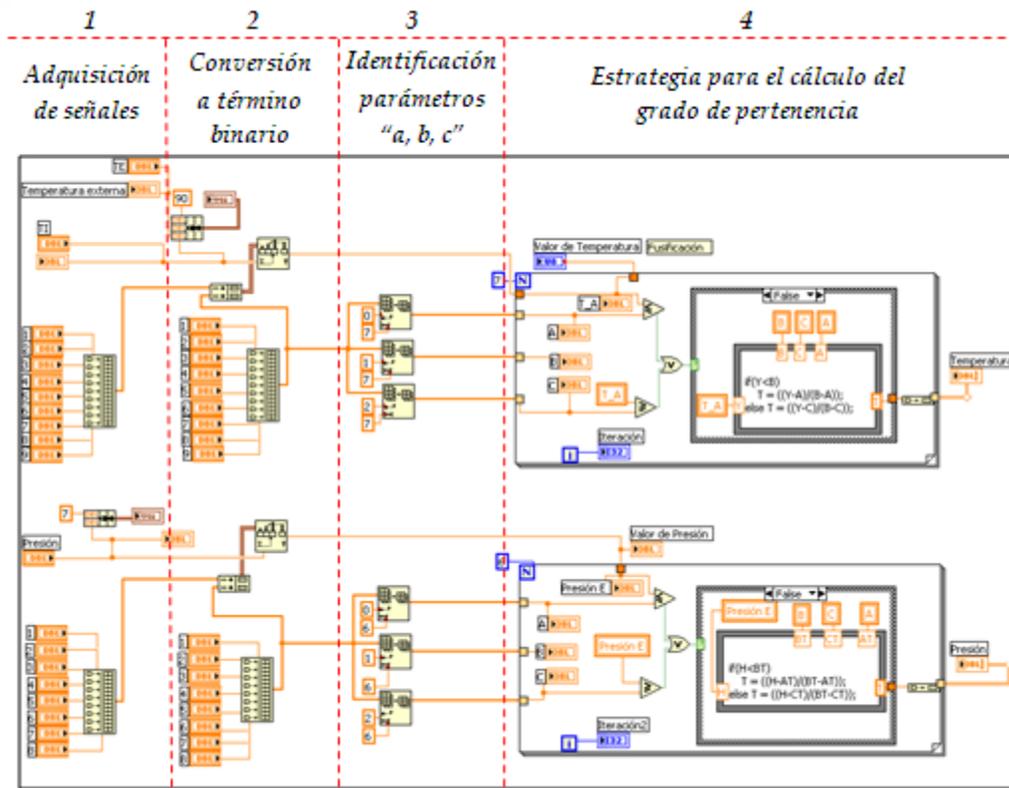


Figura 4-12: Pasos a contemplar en la etapa de Fusificación

El desarrollo de la etapa de Fusificación en el programa de LabVIEW se puede contemplar en 4 pasos.

#### 1.- Adquisición de señales

Se adquiere la señal una vez procesada por el filtro promediador. En esta etapa también se establecen los valores que contempla la función de membresía.

#### 2.- Conversión a término binario.

Como se detalló anteriormente es necesario llevar el conjunto de valores reales a un conjunto de términos binarios, en este caso se está considerando un controlador de 8 bits por lo que las unidades de medida de cada variable se consideran normalizadas en un rango de 0 a 255.

#### 3.- Identificación de los parámetros "a, b, c" de las funciones de membresía

Una vez obtenidos los valores en términos binarios se hace un arreglo matricial que contiene el conjunto de los valores de la función de membresía, para este caso se está utilizando la función tipo triangular, mediante el comando "Array" en el programa de LabVIEW permite establecer las matrices de los valores, se obtiene lo siguiente:

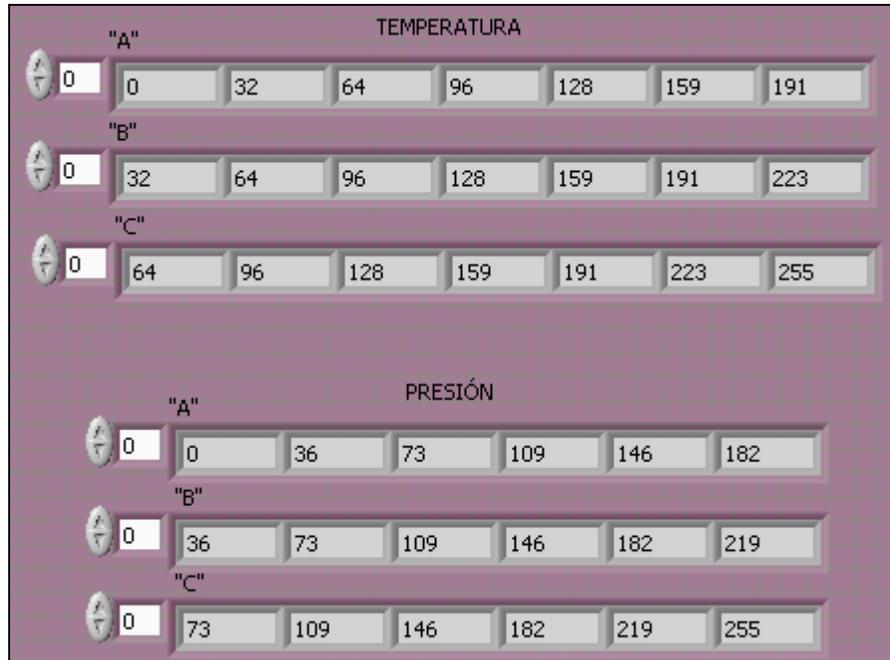


Figura 4-13: Matrices de los valores "a, b, c" de las funciones de membresía.

#### 4.- Estrategia para el cálculo del grado de pertenencia.

Una vez agrupado debidamente los valores de las funciones de membresía y la obtención del parámetro a medir (en este caso temperatura y presión) se procede a aplicar el método de obtención del grado de pertenencia a la función de membresía.

Se optó por aplicar el método de "Algoritmo de punto extremo" explicado en la sección 2.4.5.1. En donde se realizó la evaluación de los parámetros medidos, y mediante el cálculo realizado se obtiene el grado de pertenencia agrupándose en una matriz de 7 términos para la variable temperatura y 6 términos para la variable presión.

Un ejemplo de la realización de este cálculo para la variable temperatura sería el siguiente:

Suponiendo que la temperatura interna alcanza un valor de de 165 °C, el programa realiza la conversión de dato analógico a binario, obteniendo un dato de 132.997, (recordando que la relación es aproximadamente 1:1), el programa se encarga de agrupar los parámetros "a, b, c" de acuerdo al arreglo que se desea establecer, posteriormente pasa a la etapa de cálculo de grado de pertenencia, donde aplicando las ecuaciones obtenemos lo siguiente:

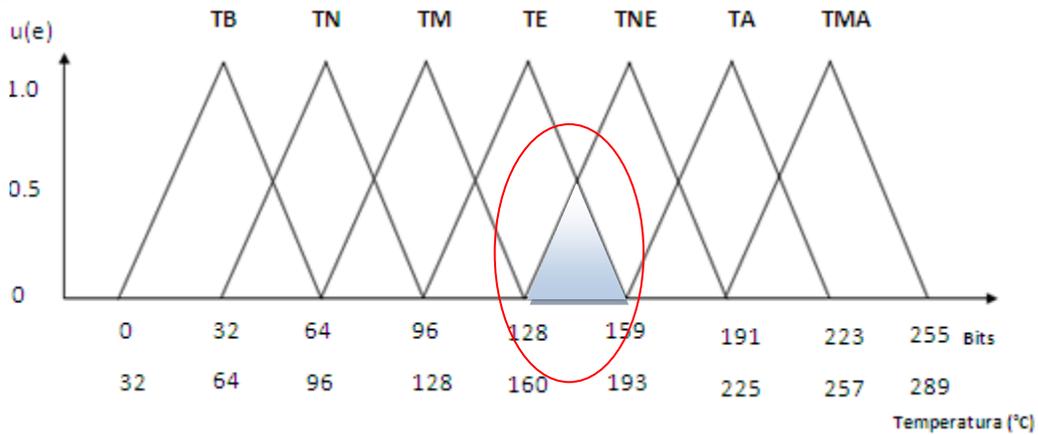


Figura 4-14 Representación de los valores de temperatura y conversión a bits.

$$T_{referencia} = 165^{\circ}\text{C} = 132.9 \text{ bits}$$

Se procede a evaluar cada condición de la ecuación presentada en la Tabla 4-3

- $0 \leq 132.9 < 32$     **FALSO**    y     $32 \leq 132.9 < 64$     **FALSO**
- $32 \leq 132.9 < 64$     **FALSO**    y     $64 \leq 132.9 < 96$     **FALSO**
- $64 \leq 132.9 < 96$     **FALSO**    y     $96 \leq 132.9 < 128$     **FALSO**
- $96 \leq 132.9 < 128$     **FALSO**    y     $128 \leq 132.9 < 159$     **VERDADERO**

Por lo tanto es el rango que se evalúa para esta sección

$$\frac{T_{entrada} - (c)}{b - c} = \frac{132.9 - (159)}{128 - 159} = 0.8484$$

Este valor corresponde al primer dato grado de pertenencia de la función de membresía, el cual se ubica en el cuadrante derecho del rango de TE (temperatura elevada).

La evaluación continua para las siguientes tres funciones de membresía.

- $128 \leq 132.9 < 159$     **VERDADERO**    y     $159 \leq 132.9 < 191$     **FALSO**

Por lo tanto es el rango que se evalúa para esta sección

$$\frac{T_{entrada} - (a)}{b - c} = \frac{132.9 - (128)}{159 - 128} = 0.1515$$

Este valor corresponde al segundo dato grado de pertenencia de la función de membresía el cual se ubica en el cuadrante izquierdo del rango de TNE (Temperatura necesaria).



$159 \leq 132.9 < 191$  **FALSO** y  $191 \leq 132.9 < 223$  **FALSO**  
 $191 \leq 132.9 < 223$  **FALSO** y  $223 \leq 132.9 < 255$  **FALSO**

Finalmente se completa la matriz de 7 valores.

|   |   |   |        |        |   |   |
|---|---|---|--------|--------|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0.8484 | 0.1515 | 0 | 0 |
|---|---|---|--------|--------|---|---|

De manera análoga se puede representar para la variable presión cuyo comportamiento sería el siguiente:

Suponiendo que internamente se obtiene una presión de 5.4 bar, el programa realiza la conversión de dato analógico a binario, obteniendo un dato de 196.8 bits, (recordando que la relación es de 0.027 bar/bits), el programa se encarga de agrupar los parámetros “a, b, c” de acuerdo al arreglo que se desea establecer, posteriormente pasa a la etapa de cálculo de grado de pertenencia, donde aplicando las ecuaciones obtenemos lo siguiente:

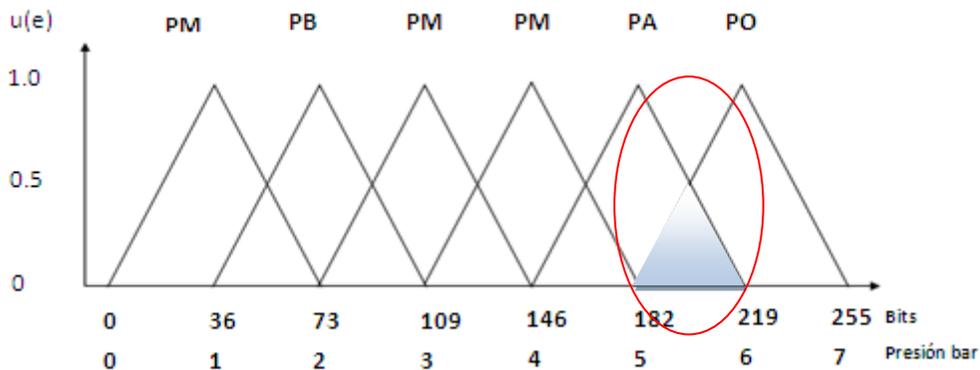


Figura 4-15: Representación de la variable presión y su conversión a términos de bits.

$$P_{referencia} = 5.4 \text{ bar} = 196.8 \text{ bits}$$

Se procede a evaluar cada condición de la ecuación presentada en la Tabla 4-4

$0 \leq 196.8 < 36$  **FALSO** y  $36 \leq 196.8 < 73$  **FALSO**  
 $36 \leq 196.8 < 73$  **FALSO** y  $73 \leq 196.8 < 109$  **FALSO**  
 $73 \leq 196.8 < 109$  **FALSO** y  $109 \leq 196.8 < 146$  **FALSO**  
 $109 \leq 196.8 < 146$  **FALSO** y  $146 \leq 196.8 < 182$  **FALSO**  
 $146 \leq 196.8 < 182$  **FALSO** y  $182 \leq 196.8 < 219$  **VERDADERO**

Por lo tanto es el rango que se evalúa para esta sección



$$\frac{P_{entrada} - (c)}{b - c} = \frac{196.8 - (219)}{182 - 219} = 0.6$$

Este valor corresponde el primer dato grado de pertenencia de la función de membresía, el cual se ubica en el cuadrante derecho de la presión alta.

La evaluación continua para las siguientes tres funciones de membresía.

182 ≤ 196.8 < 219 **VERDADERO** y 219 ≤ 196.8 < 255 **FALSO**

Por lo tanto es el rango que se evalúa para esta sección

$$\frac{P_{entrada} - (a)}{b - a} = \frac{196.5 - (182)}{219 - 182} = 0.4$$

Este valor corresponde al segundo dato grado de pertenencia de la función de membresía el cual se ubica en el cuadrante izquierdo de la presión óptima.

Finalmente se completa la matriz de 7 valores.

|   |   |   |   |     |     |
|---|---|---|---|-----|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0.6 | 0.4 |
|---|---|---|---|-----|-----|

Estos valores representan el grado de pertenencia de la función de membresía en la siguiente etapa se contempla el método de inferencia y lo que representan estos valores para la activación de los actuadores.

A continuación se presenta el diagrama de bloques que resume la realización de los cálculos anteriores realizado en el programa de LabVIEW, donde primeramente se realiza la comparación y posteriormente se aplica la ecuación, los cálculos son resumidos en un arreglo matricial.

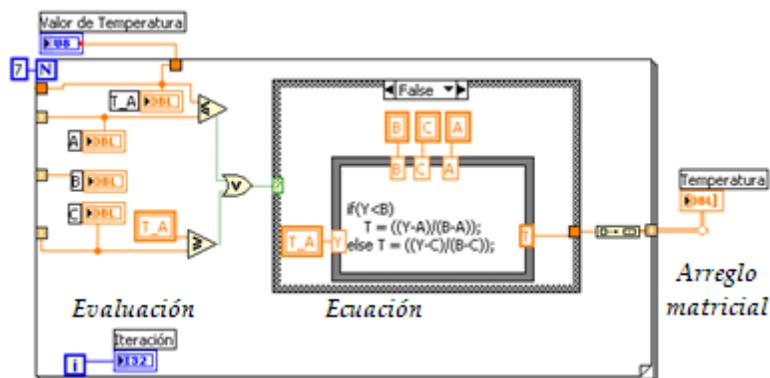


Figura 4-16: Cálculos para determinar el grado de pertenencia

#### 4.7.2. Etapa de inferencia del control difuso.

La etapa de inferencia consiste en la evaluación de las reglas difusas en relación a los grados de pertenencia provenientes de la unidad de fusificación [13].

En la sección 2.4.5.2 se analizaron las reglas de control y las etapas de inferencia donde uno de los métodos contemplados establece que un conjunto de salida se acota por el valor del grado de membresía más pequeño de los conjuntos de control que intervienen en la construcción de la regla de control. Sin embargo, la característica de totalidad en las reglas de control requiere de todas las combinaciones posibles entre los conjuntos de control que influyen en un conjunto de salida.

Para el control de apertura y cierre de la válvula se construyeron 42 reglas de forma matricial definidas en la sección 4.5 (reglas de control).

Para la interpretación de las reglas de inferencia se fue utilizado el método de Mamdani, (explicado en la sección 2.4.5.2) por su eficiencia y simplicidad donde combina los grados de pertenencia asociados a los valores de entrada a través del operador mínimo (MIN), suministrando un único conjunto fusificador como respuesta (Souza, Matsura, & Miranda, 2005).

A continuación se presenta un esquema general de los pasos en que constituye la etapa de inferencia.

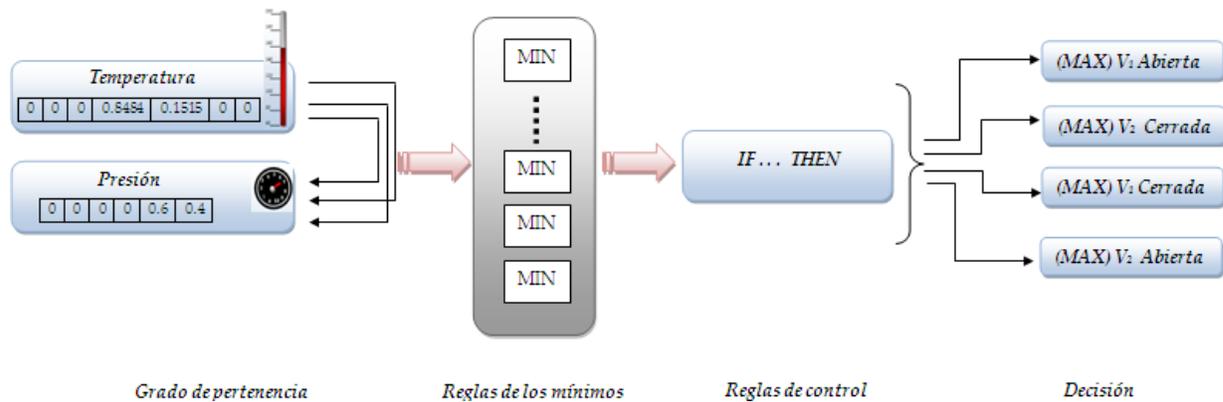


Figura 4-17: Etapas de la fase de Inferencia.

Este conjunto de etapas se presentan a continuación en el diagrama de bloques desarrollado en el ambiente gráfico de LabVIEW.

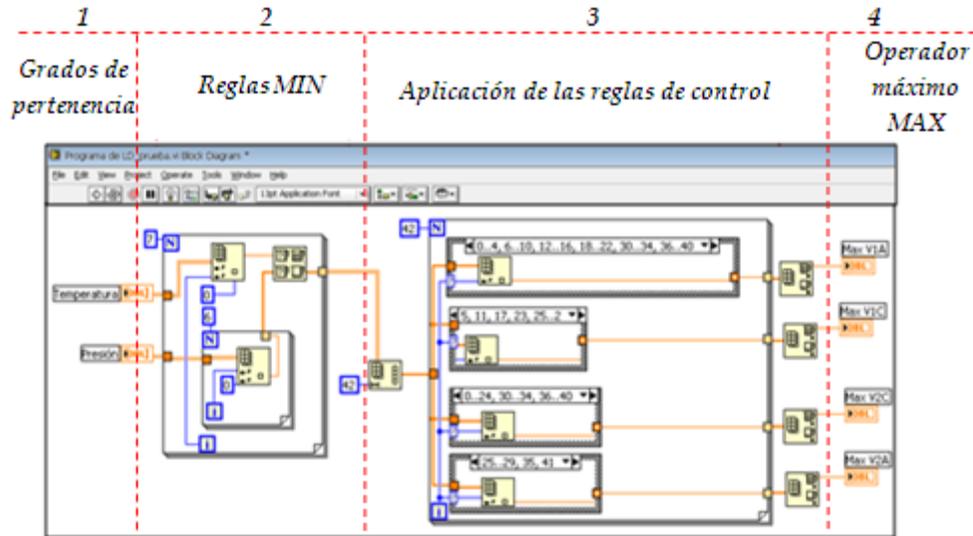


Figura 4-18: Diagrama de bloques de la etapa de Inferencia

El desarrollo de la etapa de Inferencia en el programa de LabVIEW se puede contemplar en 3 pasos.

#### 1.- Grados de Pertenencia

Aquí se establecen los rangos que se obtuvieron de la etapa de fusificación donde se obtiene un conjunto de 7 valores para el caso de la temperatura y 6 valores para el caso de la presión y se acota por el valor del grado de membresía más pequeño, sin embargo la característica de la totalidad de las reglas de control requiere de todas las combinaciones posibles entre los conjuntos de control que influyen en el control de salida.

#### 2.- Reglas MIN

Una vez obtenidos los valores de pertenencia de las funciones de membresía correspondiente se procede a hacer las combinaciones de los términos y seleccionar el mínimo, esto es desarrollado con ayuda del ciclo *For* para garantizarnos que se realicen todas las combinaciones. Mediante el comando *Index Array* es posible desagrupar las combinaciones de los conjuntos término a término para su comparación y finalmente con auxilio del comando *Max & Min* es seleccionado el mínimo término. Dando como resultado una matriz de 42 términos.

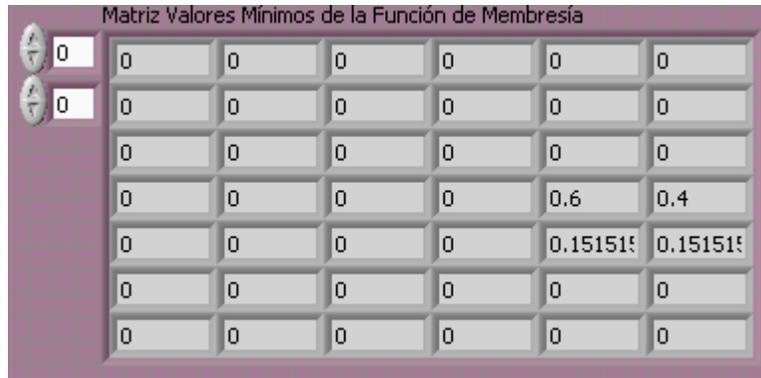


Figura 4-19: Matriz de evaluación términos mínimos de las funciones de Membresía

Como se puede observar dando continuidad al ejemplo planteado el término **0.8484** ya no se encuentra en la matriz, esto con el objetivo de únicamente obtener los mínimos valores al compararlos término a término.

3.- Aplicación de las reglas de control.

Una vez que se han obtenido los valores de la matriz, estos son evaluados mediante las reglas de control para determinar el estado de cada término de la matriz.

Continuando con el ejemplo los valores obtenidos y sus posiciones son las siguientes:

| <i>Grado de Pertenencia</i> | <i>Posición en la matriz</i> |
|-----------------------------|------------------------------|
| <b>0.6</b>                  | <b>22</b>                    |
| <b>0.4</b>                  | <b>23</b>                    |
| <b>0.1515</b>               | <b>28</b>                    |
| <b>0.1515</b>               | <b>29</b>                    |

Al evaluar estos valores conforme a las reglas de control que determinan el estado de Abierto o cerrado de las válvulas, se procede a seleccionar el elemento mayor del conjunto. Por ejemplo:

El grado de pertenencia **0.4** , cuya posición es el número **23**, el grado de pertenencia **0.1515**, cuya posición es **28**, y el grado de pertenencia **0.1515**, cuya posición es **29** comparten un mismo estado: "**válvula 1 Cerrada**", de los cuales se selecciona el **mayor**, en este caso = **0.4** para el estado de la válvula 1 Cerrada.



Obteniéndose los siguientes resultados:

| <i>Grado de Pertenencia</i> | <i>Posición en la matriz</i> | <i>Estado</i>     |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------|
| 0.6                         | 22                           | Válvula 1 Abierta |
| 0.4                         | 23                           | Válvula 1 Cerrada |
| 0.6                         | 22                           | Válvula 2 Cerrada |
| 0.1515                      | 29                           | Válvula 2 Abierta |

Es ahí donde es seleccionado el valor máximo de cada relación; estos valores pasarán a la última etapa que es la etapa de defusificación.

#### 4.7.3. Etapa de defusificación del control difuso

La interfaz de defusificación calcula el valor real que afectará al sistema bajo control dependiendo de los datos provenientes de la etapa de inferencia.

Los valores a los cuales se truncan los conjuntos de salida se procesan para obtener el valor que mejor representa a la unión de todos los conjuntos de salida para cada variable. La estrategia que se utiliza para esta etapa es el método de “Promedio de Pesos” referenciado en ecuación 2-17

Dicha ecuación implica la multiplicación de los grados calculados provenientes de la etapa de inferencia por su respectivo peso, dichos resultados se suman obteniéndose el dividendo, posteriormente se suman los grados calculados de la etapa de inferencia para integrar el divisor realizándose la división. La salida es un valor numérico que afecta directamente el estado de abierto o cerrado de las válvulas.

Para fines de esta evaluación el número de funciones de pertenencia de salida de la variable de activación son dos: “abierta” y “cerrada” los pesos referidos son 0 y 5 volts dado que es la referencia de activación.

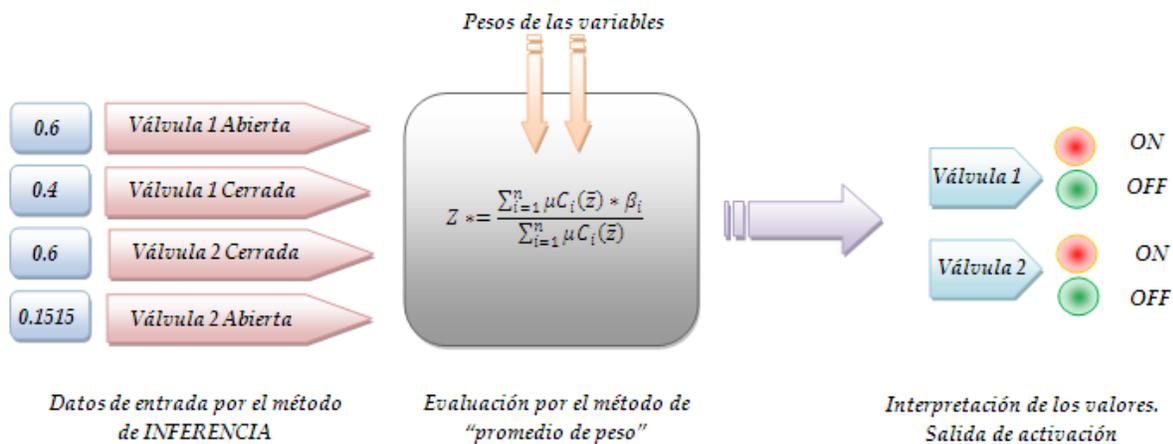


Figura 4-20 Etapas del proceso de Defusificación



En la Figura 4-20 se muestra el conjunto de etapas que constituyen la etapa de defusificación, y a continuación se presenta el diagrama de bloques desarrollado en el programa LabVIEW para dicha aplicación.

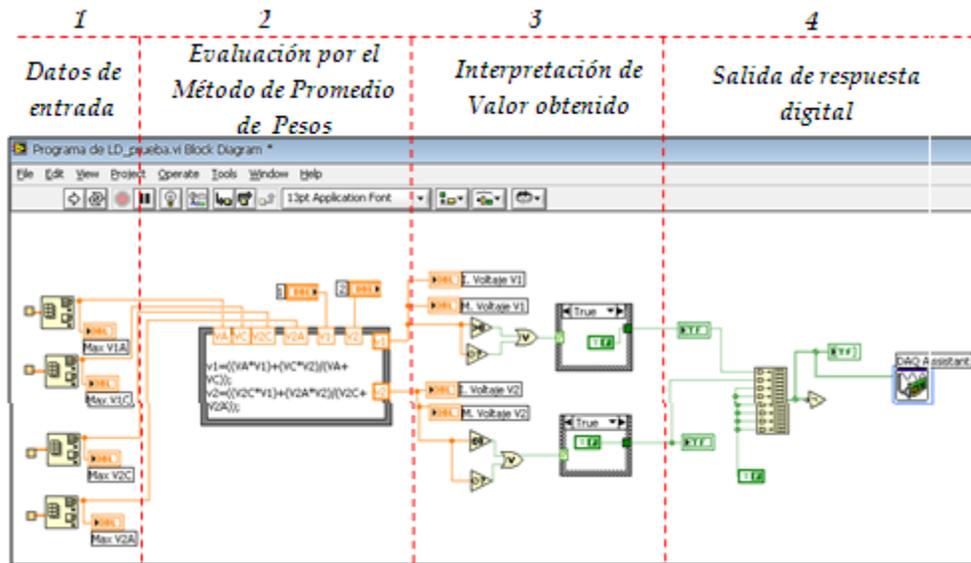


Figura 4-21: Diagrama de bloques de la etapa de Defusificación

El desarrollo de la etapa de Defusificación en el programa de LabVIEW, se puede contemplar en 3 pasos.

1.- Evaluación por el método de promedios de pesos.

Una vez que se han obtenido los valores procedentes de la etapa de Inferencia se procede a la evaluación por el método de promedio de pesos donde son considerados los pesos referidos a 0 y 5, los cuales son asociados al voltaje de salida para la activación de las válvulas y su cambio de estado ya sea abierta o cerrada, de ahí se derivan los pesos considerados.

Considerando el ejemplo que se ha estado desarrollando y con la aplicación de la ecuación 2-17.

Se procede a evaluar y obtener los valores.

**Estado de Válvula 1:**

**Valores:** 0.6 para válvula abierta y 0.4 para válvula cerrada

Es importante resaltar que la acción de esta válvula va de un estado abierto a un estado cerrado, dado a la intersección de las funciones, mientras esté en un cuadrante que



contemple ambos estados, tendrá cierto porcentaje de grados de pertenencia para ambas situaciones, por lo tanto se considerará los siguientes pesos a las variables: "0" para el estado abierto y "5" para el estado cerrado de esta manera, al incursionar en el rango de cerrado, generará cierto valor correspondiente al voltaje de activación, es decir el valor *mayor que cero* activará la válvula para cerrarse, y un rango *menor o igual que cero* activará la válvula para abrirse.

Por lo tanto sustituyendo en la Ecuación anterior se tiene:

$$Z^* = \frac{(0.6 * 0) + (0.4 * 5)}{(0.6 + 0.4)}$$
$$Z^* = 2$$

El valor obtenido representa la condición de activación de la válvula.

#### **Estado de Válvula 2:**

**Valores:** 0.6 para válvula cerrada y 0.1515 para válvula abierta

En este caso la acción de la válvula 2 va de un estado cerrado a un estado abierto, dado a la intersección de las funciones, mientras esté en un cuadrante que contemple ambos estados, tendrá cierto porcentaje de grados de pertenencia para ambas situaciones, por lo tanto se considerará los siguientes pesos a las variables: "0" para el estado cerrado y "5" para el estado abierto de esta manera, al incursionar en el rango de abierto, generará cierto valor correspondiente al voltaje de activación, es decir el valor *mayor que cero* activará la válvula para abrirse, y un rango *menor o igual que cero* activará la válvula para cerrarse.

Por lo tanto sustituyendo en la Ecuación anterior se tiene:

$$Z^* = \frac{(0.6 * 0) + (0.1515 * 5)}{(0.6 + 0.1515)}$$
$$Z^* = 1.0086$$

El valor obtenido representa la condición de activación de la válvula.

#### 2.- Interpretación de los resultados y respuesta de activación

En esta etapa son evaluados los resultados obtenidos una vez aplicada la ecuación Ec. 2-17.



De acuerdo a las características del cambio de estado de las válvulas, su condición de abierta y cerrada se determinó mediante las siguientes condiciones.

➤ *Válvula 1*

*Si la variable de salida  $Z * = 0$  entonces pasará al estado de abierto.*

*Si la variable de salida  $Z * > 0$  entonces pasará al estado de cerrado.*

➤ *Válvula 2*

*Si la variable de salida  $Z * = 0$  entonces pasará al estado de cerrado.*

*Si la variable de salida  $Z * > 0$  entonces pasará al estado de abierto.*

Como se explicó anteriormente los valores de 0 y 5 ( pesos de las variables) representan el cambio de estado de las válvulas.

**Por lo tanto, del análisis anterior se deduce que las válvulas a una Temperatura de 165 ° C y a una presión de 5.4 Bar, su estado será el siguiente**

|                  |                        |                  |                        |
|------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| <i>Válvula 1</i> | <i>Estado: Cerrada</i> | <i>Válvula 2</i> | <i>Estado: Abierta</i> |
|------------------|------------------------|------------------|------------------------|

Mediante un indicador booleano, se establece la condición de ambas válvulas, esta señal es recibida en la tarjeta de adquisición de Datos DAQ la cual lo traduce a salidas de 0 o 5 volts, esta señal mediante un arreglo es convertida a 24 volts, y enviada físicamente a las válvulas.

#### **4.8. Interfaz con el usuario.**

Para realizar la interacción entre el operador (usuario) con el software creado para la inspección, monitoreo y control de las variables se desarrolla el programa de simulación donde se puede considerar en dos partes.

La primera etapa es *“Adquisición de señales”*, la segunda etapa esta constituida por el *“Sistema de control difuso”*.

##### **4.8.1.Etapa 1: Adquisición de señales.**

Está conformada por la recepción de datos provenientes de los sensores, el tratamiento que se le brinda a la señal (ecuaciones que modelan su comportamiento) (sección 3.2.1.3), la aplicación del filtro promediador (sección 4.7.1.1), y la generación de un reporte en Excel con el objetivo de poder realizar un análisis de los datos en el tiempo de muestreo que se desee.

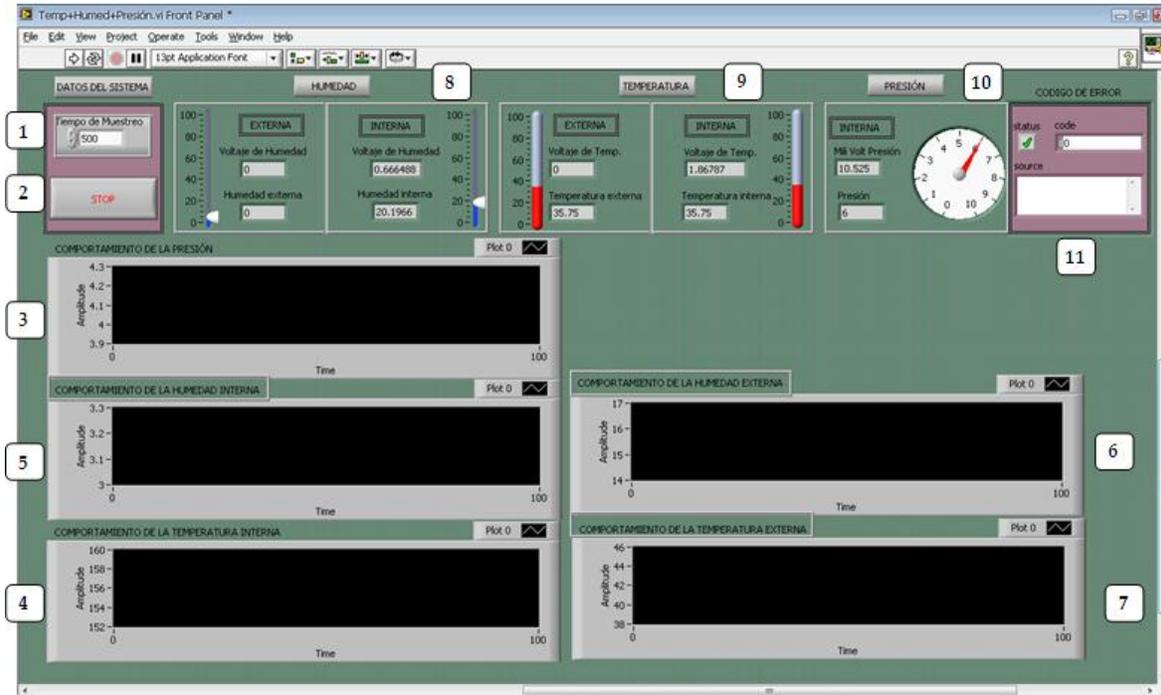


Figura 4-22: Panel frontal de la Interfaz para la adquisición de las señales

| Número    | Elemento                                  | Descripción  |
|-----------|---|--|
| 1         | Tiempo                                    | Permite manipular al usuario el tiempo de ejecución del simulador  |
| 2         | Paro                                      | Termina el funcionamiento del controlador, o funciona igual como paro de emergencia.   |
| 3,4,5,6,7 | Gráfica de Presión, Temperatura y Humedad | Muestra mediante gráficos el comportamiento de las variables de Presión, Temperatura interna, Humedad interna, Temperatura de salida y Humedad de salida respectivamente.                                |
| 8,9,10    | Visualización de variables                | Muestra las señales adquiridas de los sensores en su unidad analógica (volts y mV), así como su conversión a su unidad de medida: Presión (Bar, atm.), Temperatura (grados centígrados, C°), Humedad (%) |
| 11        | Error de código                           | Establece un mensaje de alerta si hay algún error en el momento que se genera el reporte en un archivo de Excel del monitoreo de las variables   |

Tabla 4-5: Descripción de los componentes de la Interfaz gráfica.



#### 4.8.1.1. *Tiempo*

El tiempo de muestreo fue determinado mediante la experimentación y ajustado de acuerdo al comportamiento del sistema, determinando que un tiempo de muestreo de 500 milisegundos, es decir una muestra por cada medio segundo que pasa, ofrece un comportamiento aceptable, dentro del rango de respuesta esperado.

#### 4.8.1.2. *Paro*

Es un controlador que gobierna todo el subVI (subsistema dentro del programa general) desde el cual se puede estipular continuar o parar el sistema de adquisición de señales.

#### 4.8.1.3. *Gráfica*

Permite una visualización completa del monitoreo de las variables, durante el transcurso de su adquisición.

#### 4.8.1.4. *Variables*

Aquí se presenta el monitoreo y adquisición de datos de las variables de: Humedad, Temperatura y Presión, se presenta tanto el dato de Voltaje como su equivalencia correspondiente.

En la siguiente figura se representa el esquema general de la programación de esta etapa de interfaz (Figura 4-23).

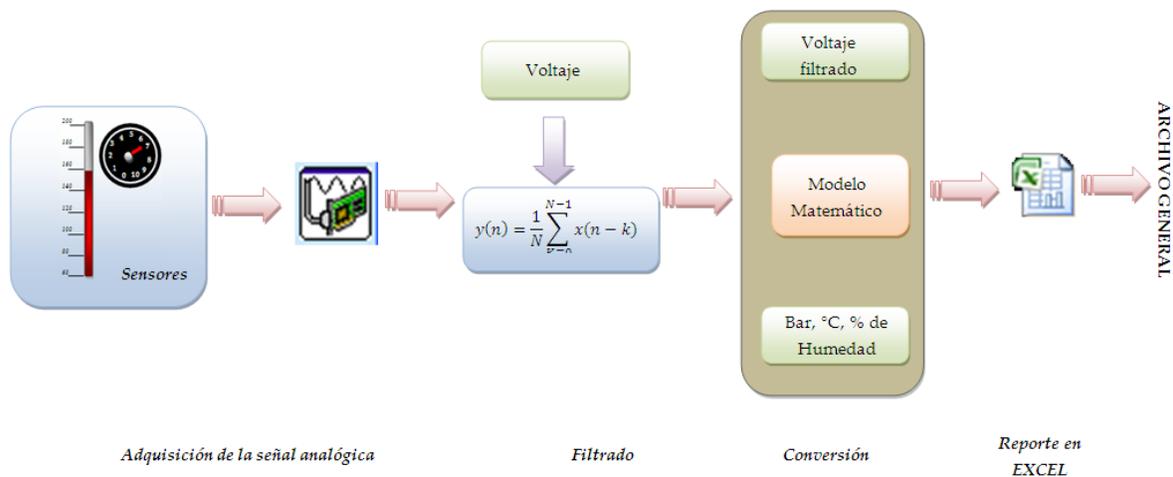


Figura 4-23: Algoritmo de desarrollo de la interfaz: “Adquisición de señales”

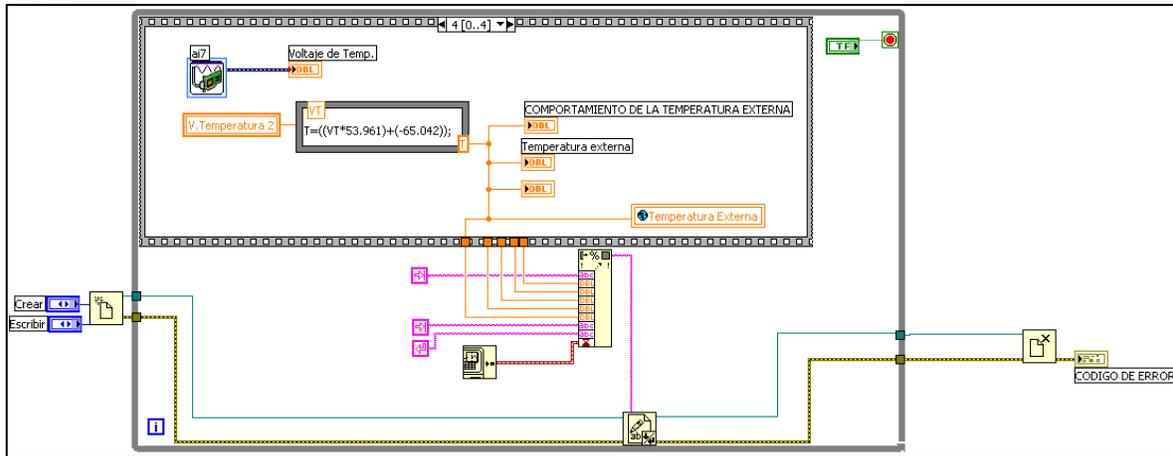


Figura 4-24: Adquisición de señal de la variable Temperatura

En la Figura 4-24 se muestra el diagrama de bloques construido para adquirir la señal procedente de la entrada analógica de la tarjeta de adquisición de datos y posteriormente se le aplica el filtrado por el método del promedio móvil ponderado. La respuesta es enviada nuevamente para aplicarle el modelo explicado en la sección 3.2.1.3, la señal ya limpia y evaluada es enviada mediante una variable global (las cuales son usadas para compartir información entre diferentes subVI ejecutándose desde la misma máquina) al programa general del sistema de control.

Esta analogía es realizada para cada una de las variables, cada una recibe el mismo procesamiento de adquisición, filtrado, adaptación con el modelo matemático y enviada al programa general.

#### 4.8.1.5. Archivo de Información

Cada monitoreo de las variables es resguardado en un archivo de hoja en Excel en el momento que se desee para consultar los datos en un momento determinado, esta herramienta es de gran utilidad para realizar muestreos aleatorios del comportamiento del sistema en momentos de interés. En la Figura 4-24 en la parte de abajo, se puede observar el código desarrollado para tal acción.

El elemento 11 de la Tabla 4-5 muestra si existe algún error en la adquisición del archivo de Excel.

Una vez adquirida y procesada la señal esta es enviada al programa general del sistema de control difuso para aplicar el algoritmo de control donde se desarrollan las etapas de fusificación, inferencia y defusificación.



#### 4.8.2. Etapa 2: Sistema de control difuso

Esta conformada por cada una de las etapas del control difuso, en la Interfaz gráfica se observa el monitoreo de cada una de las variables, las gráficas con sus respectivos límites de seguridad, tanto de niveles máximos como mínimos y el estado en que se encuentra cada una de las válvulas.

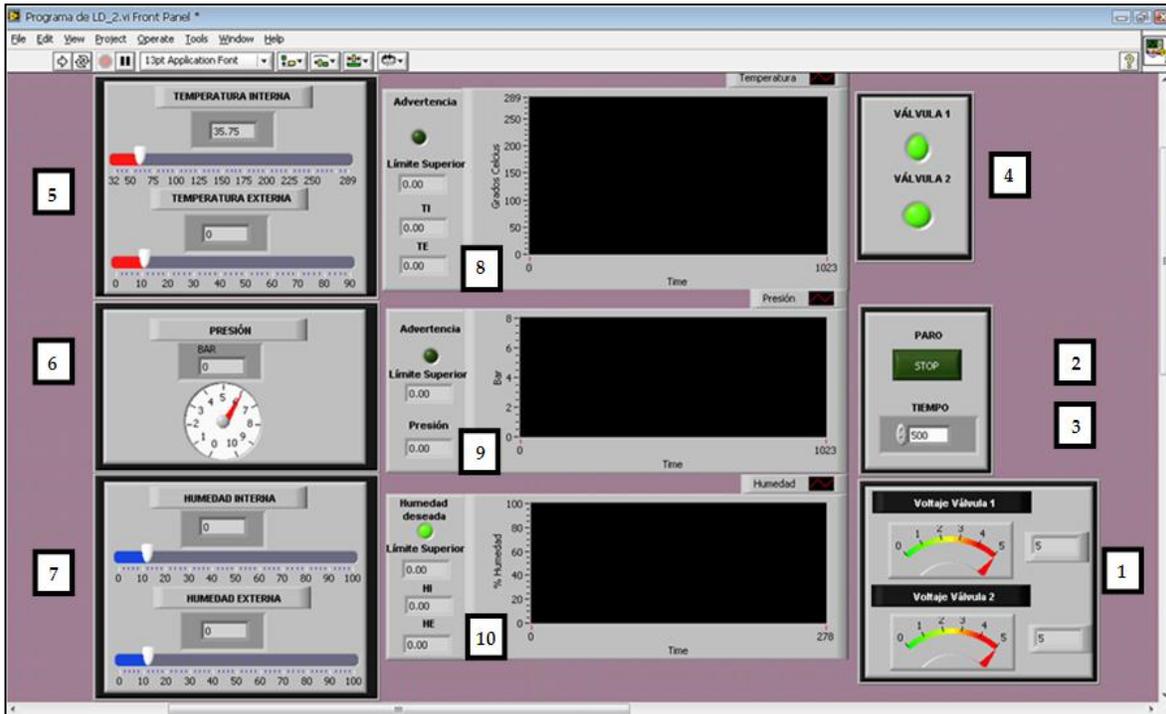


Figura 4-25: Panel frontal de la interfaz gráfica del programa de control.

La descripción de los componentes numerados de la interfaz gráfica es detallada a continuación.

| Número | Elemento | Descripción   |
|--------|----------|---|
| 1      | Voltaje  | Representa un medidor analógico que refleja el voltaje aplicado a las válvulas.                           |
| 2      | Paro     | Termina el funcionamiento del controlador, o funciona igual como paro de emergencia.                      |
| 3      | Tiempo   | Permite manipular al usuario el tiempo de ejecución del simulador.  |
| 4      | Válvulas | Muestra el estado de las válvulas (1 y 2) de acuerdo a las condiciones actuales de presión y temperatura. |



|   |  |   |
|---|--|---|
| 5 | Temperatura                                | Muestra el comportamiento de la variable temperatura.   |
| 6 | Presión                                    | Muestra el comportamiento de la variable de presión.  |
| 7 | Humedad                                    | Muestra el comportamiento de la variable humedad.   |
| 8 | Gráfica de temperatura, presión y humedad. | Muestra mediante gráficos el comportamiento de las variables respectivamente. Cada gráfica cuenta con un nivel de advertencia si se llegase a sobrepasar los límites de referencia establecidos para cada variable. |

Tabla 4-6: Descripción de los componentes numerados en la interfaz gráfica.

#### 4.8.2.1. *Monitoreo de las variables*

Al igual que la otra interfaz también se realiza un monitoreo de las variables, con la salvedad que en este caso se presenta un margen de seguridad de los valores máximos y mínimos, estos rangos están conectados al botón de paro general par evitar cualquier contingencia.

#### 4.8.2.2. *Estado de los actuadores*

De igual forma se presenta visualmente el estado de las válvulas, la cantidad de voltaje que recibe, esto con el objetivo de verificar el funcionamiento de las mismas.

Representa la visualización general del comportamiento del sistema desde el cual se puede tomar decisiones inmediatas con la información brindada.

# CAPÍTULO 5



## ANÁLISIS, VALIDACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se presenta el procedimiento de experimentación, así como la validación de los modelos determinados de las variables del sistema (presión y temperatura), de igual forma se realiza la caracterización del funcionamiento del sistema traducido a Kg. de café secado.



## 5. Análisis y validación

### 5.1. Evaluación experimental

Se realizaron diferentes pruebas experimentales a lo largo de los meses de marzo-octubre, en un periodo de 8 horas continuas, donde permitió realizar los diferentes aspectos de mejora al programa de control y ajustes de diseño del sistema. Finalmente se realizó una integración general pero aun con la ausencia de producto. Los datos relevantes y de interés fueron registrados en un formato de pruebas<sup>12</sup> para su seguimiento y posterior análisis de los datos obtenidos del monitoreo.

| PROTOCOLO DE PRUEBAS                               |                         |                      |                 |
|--|-------------------------|----------------------|-----------------|
| Fecha:   | <u>20 de octubre</u>    |                      |                 |
| Hora de Inicio                                     | <u>08:00 a.m.</u>       | Hora de Finalización | <u>16:00 pm</u> |
| Datos del producto                                 |                         |                      |                 |
| Contenido de humedad inicial del café:             | <u>65</u> %             |                      |                 |
| Temperatura inicial del café:                      | <u>22</u> °C            |                      |                 |
| Contenido de humedad promedio al final del secado: | <u>12</u> %             |                      |                 |
| Cantidad de grano a secar:                         | <u>-</u> °C             |                      |                 |
| Datos del Lugar                                    |                         |                      |                 |
| Altitud  | <u>2,240</u> m.s.n.m    |                      |                 |
| Temperatura ambiente                               | <u>22</u> °C            |                      |                 |
| Humedad relativa ambiente                          | <u>43</u> %             |                      |                 |
| Datos del aire de en la cámara de calentamiento    |                         |                      |                 |
| Presión interna máxima                             | <u>7</u> atm            |                      |                 |
| Temperatura interna máxima                         | <u>171.9</u> °C         |                      |                 |
| Humedad relativa                                   | <u>3</u> %              |                      |                 |
| Datos del aire en contacto con el aire             |                         |                      |                 |
| Rango de Presión                                   | <u>4</u> y <u>6</u> atm |                      |                 |
| Temperatura de salida                              | <u>70</u> °C            |                      |                 |
| Humedad relativa a la salida                       | <u>12--10</u> %         |                      |                 |

<sup>12</sup> Los datos contenidos son de una de las pruebas realizadas el día 20 de octubre, los datos del producto se obtuvieron de otras experimentaciones realizadas.



Una vez realizado los ajustes necesarios en materia de control y puntos de diseño se obtuvo el comportamiento experimental y la respuesta del sistema con la aplicación del control.

## 5.2. Comportamiento experimental.

El comportamiento del sistema se analizó en tres etapas.

- Etapa uno: Entrada de aire al sistema.
- Etapa dos: Calentamiento de la cámara.
- Etapa tres: Accionamiento del control para la salida del aire.

Para analizar la dinámica del proceso una vez obtenido el comportamiento experimental de las gráficas fue analizado por métodos gráficos basado en la curva de reacción del proceso por el método de Ziegler Nichols que propone un sistema de primer orden y para lograr un mejor ajuste se utilizó el método de Strejc donde se puede obtener un sistema de orden mayor.

El objetivo es analizar el desempeño del sistema, determinando el tipo de entrada hacia el mismo, en este caso se analizaron los dos sistemas (temperatura y presión) mediante la entrada tipo escalón por la incidencia del sistema ante las perturbaciones repentinas, facilitando de esta manera el análisis matemático y experimental del comportamiento, donde es necesario calcular el tiempo de asentamiento ( $\tau_s$ ) de la respuesta del sistema determinado por el 95% de la ganancia ( $k$ ), así como la respuesta transitoria y respuesta en estado estable, determinando de esta manera una función de transferencia que mejor se ajuste al proceso.

Se realizó el análisis utilizando el primer método de Ziegler Nichols, donde a partir del comportamiento experimental de la respuesta de un proceso a una entrada escalón, que generalmente tiene forma de "S" y puede ser caracterizado por dos constantes, tiempo de retardo  $L$  y la constante de tiempo. Así la función de transferencia del sistema se aproxima por una función de primer orden con una ganancia  $K$  y una constante de tiempo  $\tau$ , ver Ec. 5-1.

$$G_{(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad 5-1$$

Por otra parte el método propuesto por Strejc puede utilizarse para identificar un modelo de polos múltiples, sobretodo en el caso particular donde las constantes de tiempo del sistema sean aproximadamente iguales de esta forma el sistema queda representado por la siguiente ecuación:



$$G(s) = \frac{Ke^{-ls}}{(ts + 1)^n}$$

Donde  $e^{-ls}$  representa el retardo<sup>13</sup> que puede tener el sistema y  $n$  el grado de la expresión.

A continuación se presenta el análisis para la variable temperatura y presión.

### 5.2.1. Análisis primera etapa: entrada del aire al sistema

En esta etapa se considera la entrada del aire a la cámara de secado la cual proviene de la cámara de presurización (actualmente se está utilizando un compresor) antes de ser suministrado a la cámara de secado éste pasa por una unidad de mantenimiento eliminando cierto porcentaje de humedad. La válvula uno permite la entrada de aire hasta alcanzar una presión aproximada de 7 bar ( kg/cm<sup>2</sup>), la temperatura de entrada que es la temperatura ambiente, permanece constante en ese trayecto al igual que la humedad de entrada.

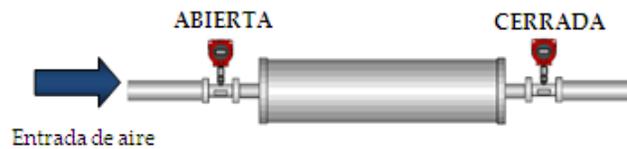


Figura 5-1: Etapa uno del sistema.

El comportamiento de la entrada de la presión a la cámara de calentamiento se muestra en la Figura 5-2.

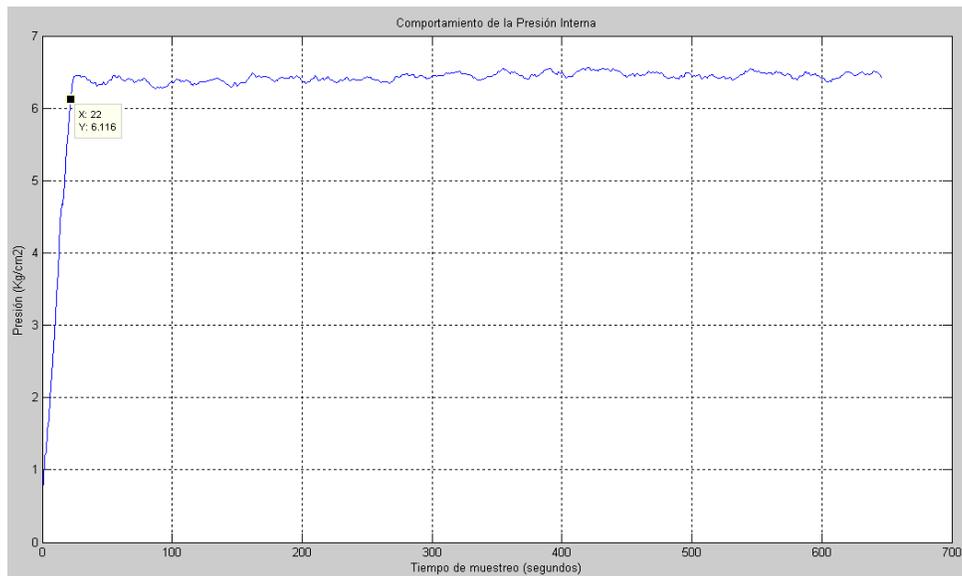


Figura 5-2: Comportamiento de la presión

<sup>13</sup> Es el intervalo de tiempo que transcurre desde que se aplica una entrada hasta que la salida alcanza su valor estacionario



Experimentalmente se obtuvieron los parámetros del sistema:

| Parámetro | Valor (experimental)  | Definición          |
|-----------|-----------------------|---------------------|
| $k$       | $6.439\text{kg/cm}^2$ | Ganancia.           |
| $\tau$    | $6.6\text{ segundos}$ | Constante de tiempo |

Tabla 5-1 Parámetros del sistema

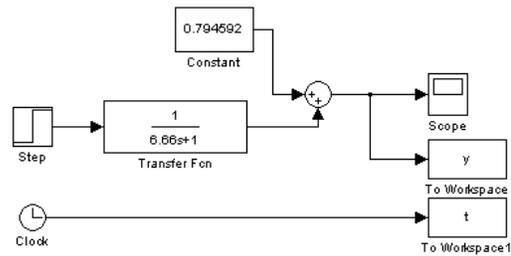
Donde se puede observar que la presión alcanza su valor de estado estable a los 20 segundos.

Con ayuda del software Matlab facilita la interpretación de los datos y obtener una función de transferencia que represente el sistema, obteniendo su simulación en Simulink.

```

1  % Comportamiento de la entrada de la presión en la cámara de calentamiento
2  -  clc
3  -  P=[Datos(:,5)];
4  -  N=[Datos(:,4)];
5  -  plot(N,P)
6  -  hold on
7  -  xlabel('Tiempo de muestreo (segundos)')
8  -  ylabel('Presión (Kg/cm2)')
9  -  Title('Comportamiento de la Presión Interna')
10 - %Gráfica de la Presión
11 - %Análsis temporal
12 - k=6.439 % valor de la ganancia
13 - k1=(0.95*k)% Valor de la ganancia para determinar ts
14 - ts=34 %obtenido donde el valor de 0.95k
15 - tao=ts/3 % valor de Tao
16 - N=[k] % Numerador
17 - D=[tao,1]%Denominador
18 - G=tf(N,D)% Función de transferencia
19 - plot(t,y,'r')
20 - grid on

```



(a)

(b)

Figura 5-3 (a) Código en Matlab y (b) diagrama de bloques función de transferencia

De acuerdo a la Ec. 5-1, la función de transferencia que describe el sistema es la siguiente:

$$G(s) = \frac{6.4392}{6.66s + 1} \tag{5-3}$$

Posteriormente se procede a analizar el comportamiento de la función de transferencia encontrada con los datos obtenidos experimentalmente.

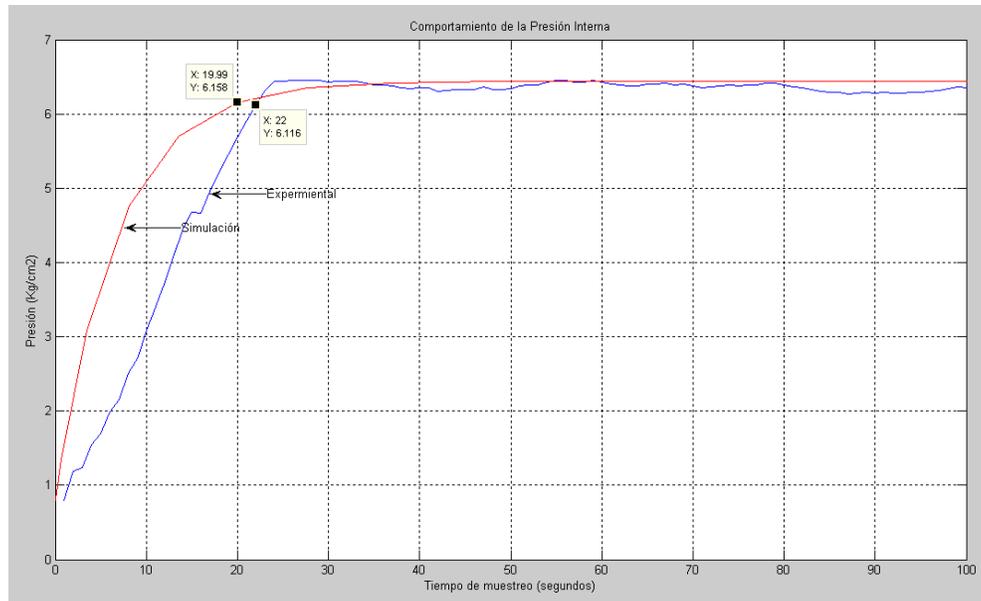


Figura 5-4 Comportamiento experimental y simulado (Presión)

| Parámetro  | Comportamiento experimental | Modelo de primer orden Ec. 5-3 |
|--|-----------------------------|--------------------------------|
| Tiempo de Respuesta en estado estable cuando la presión alcanza el valor de 6.1085 bar, el cual corresponde a un valor de ganancia igual al 95% de K | 22 segundos                 | 19 segundos                    |

Tabla 5-2: Parámetros de comparación

Al obtener los tiempos de respuesta en estado estable de ambas gráficas (ver Figura 5-4) es posible observar que la gráfica de la simulación se estabiliza 3 segundos más rápido que la experimental, se puede determinar el error de variación entre el comportamiento de la simulación de la Función de transferencia de primer orden (Ec. 5-3) y el comportamiento experimental:

$$\text{Error Tiempo en Estado estable} = 19 - 22 = 3 \text{ segundos, por lo tanto } = \frac{3}{22} * 100 = \mathbf{13.63\%}$$

Como se puede observar, el modelo se ajusta al tiempo de respuesta, sin embargo el tiempo transitorio difiere en cuanto al comportamiento experimental, por lo que se procedió a identificar un segundo modelo de mayor ajuste mediante el método propuesto por Strejc, por lo que se procedió a determinar los nuevos valores en el tiempo del cambio de salida y entrada ( $T_u$  y  $T_a$ ) así como el tiempo de retardo.

En la aplicación del método de Strejc al igual que en el de Nichols Ziegler, se traza una recta tangente a la curva de reacción, a diferencia de que los parámetros presentan más



exactitud por los ajustes de la variación que puede presentar la tangente trazada y sobre todo porque se esta tomando de referencia tres puntos sobre la curva.

Estos valores pueden verse en la figura a continuación.

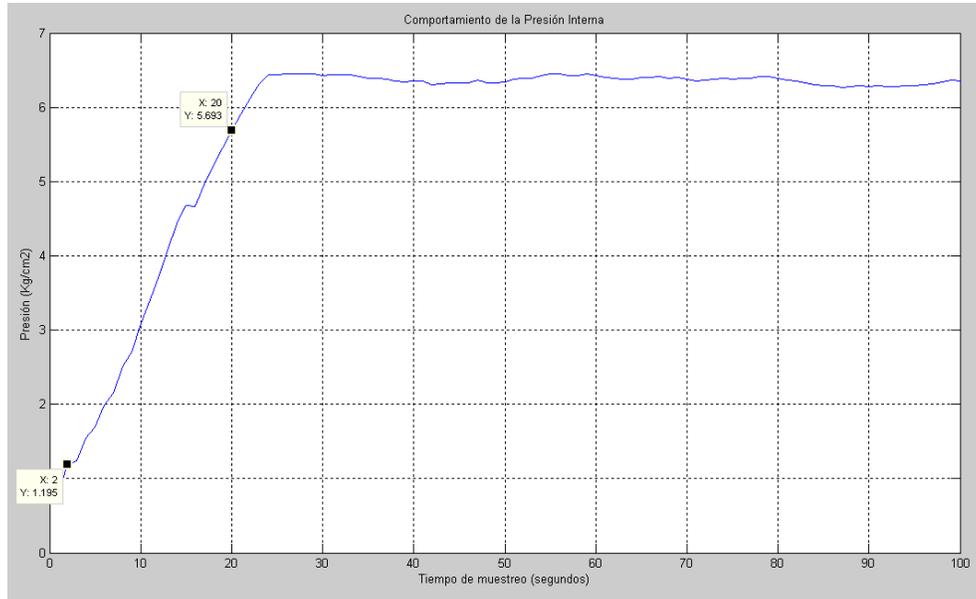


Figura 5-5: Valores a considerar para aplicar el método de Strejc.

Se aplicó el método de Strejc para determinar los valores de los tiempos donde se produce el cambio de entrada y la salida de la temperatura. Ver Figura 5-5.

De esta forma determinamos valores correspondientes:

$$T_u = 2 \text{ Seg}$$

$$T_a = 20 \text{ Seg}$$

| $n$ | $T_a/\tau$ | $T_u/\tau$ | $T_u/T_a$ |
|-----|------------|------------|-----------|
| 1   | 1          | 0          | 0         |
| 2   | 2.718      | 0.282      | 0.104     |
| 3   | 3.695      | 0.305      | 0.218     |
| 4   | 4.463      | 1.425      | 0.319     |
| 5   | 5.119      | 2.1        | 0.410     |
| 6   | 5.699      | 2.811      | 0.493     |
| 7   | 6.226      | 3.547      | 0.570     |
| 8   | 6.711      | 4.307      | 0.642     |
| 9   | 7.164      | 5.081      | 0.709     |
| 10  | 7.590      | 5.869      | 0.773     |

Tabla 5-3: Parámetros de Strejc

Con ayuda de los parámetros de Strejc [26], Tabla 5-3 se determina el valor  $n$  que corresponde al orden de la función.



Donde determinamos que el orden de la función es de segundo orden analizando la relación:

$$\frac{T_u}{T_a} = 0.1$$

Para calcular el valor de  $\tau$  se promedian los valores de las relaciones.

$$\frac{T_a}{\tau} = 7.3584$$

$$\frac{T_u}{\tau} = 7.0922$$

Donde finalmente obtenemos un valor correspondiente de  $\tau = 7.2253$ .

Y la función de transferencia obtenida que representa el comportamiento dinámico del proceso es:

$$G(s) = \frac{6.4392}{(7.2253s + 1)^2}$$

5-4

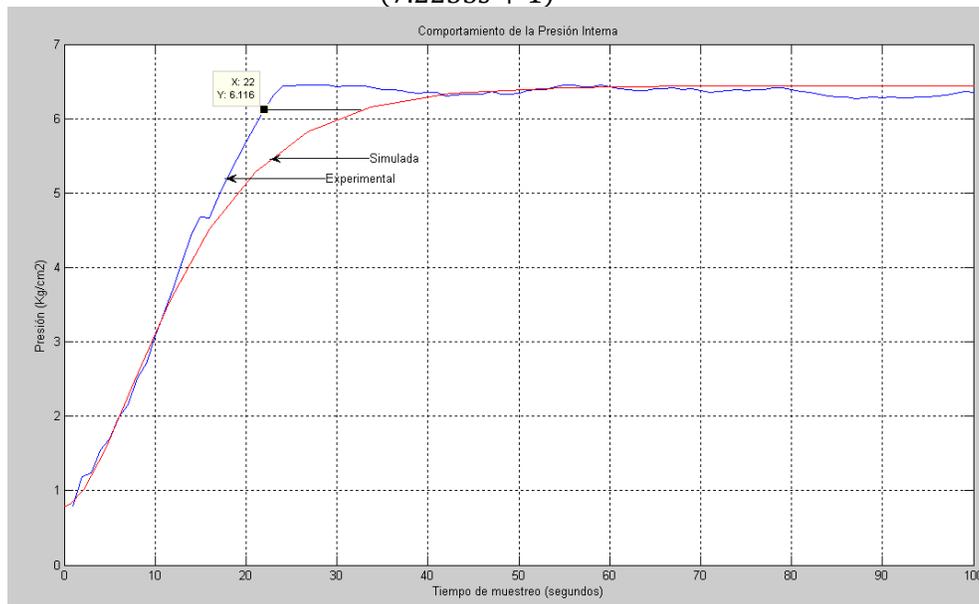


Figura 5-6: Comportamiento de la gráfica experimental y simulada

| Parámetro  | Comportamiento experimental | Modelo de segundo orden Ec. 5-4 |
|--|-----------------------------|---------------------------------|
| Tiempo de Respuesta en estado estable cuando la presión alcanza el valor de 6.1085 bar, el cual corresponde a un valor de ganancia igual al 95% de K | 22 segundos                 | 30 segundos                     |

Figura 5-7: Comparativos de parámetros



Al obtener los tiempos de respuesta en estado estable de ambas gráficas (ver Figura 5-6) es posible observar que la gráfica de la simulación de orden 2 se estabiliza 8 segundos más lento que la gráfica experimental (ver Figura 5-5), sin embargo el tiempo transitorio muestra un comportamiento acorde a lo obtenido experimentalmente. El error de variación entre el comportamiento de la simulación de la función de transferencia de segundo orden (Ec. 5-4) y el comportamiento experimental:

$$\text{Error Tiempo en Estado estable} = 30 - 22 = 8 \text{ segundos, por lo tanto } = \frac{8}{22} * 100 = \mathbf{36.3\%}$$

El análisis del comportamiento de la presión interna del cilindro permite determinar el volumen de aire contenido en el interior del cilindro, es decir conocer la cantidad de aire forzado a entrar al cilindro a una presión máxima de 7 bar (7kg/cm<sup>2</sup>). La función de transferencia de la Ec. 5-4 describe el comportamiento de la variación de la presión en el tiempo bajo las condiciones establecidas de temperatura, volumen, y masa del sistema.

Aplicando las propiedades isoentrópicos de los gases ideales se puede obtener la relación volumen – presión mediante la siguiente expresión [35].

$$V_{\text{aire atmosférico}} = V_{\text{cilindro}} \left( \frac{P_{\text{Trabajo}}}{P_{\text{atm}}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad 5-5$$

Para lo cual es necesario determinar el volumen del cilindro:

$$V_{\text{cilindro}} = \pi * r^2 * l \quad 5-6$$

Donde:

$\pi = \text{constante}$

$r = \text{radio interno del cilindro} = 0,0445\text{m}^2$

$l = \text{Largo del cilindro} = 0,5 \text{ m}$

$P_{\text{Trabajo}} = 7 \text{ bar} = 7\text{atm}$

$P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar} = 1 \text{ atm}$

$k = \text{factor de relacion de los calores específicos} = 1.4$

$$V_{\text{cilindro}} = 0.00311\text{m}^3$$

$$V_{\text{aire atmosférico}} = 0.012\text{m}^3$$

La cantidad de aire contenida en el cilindro de calentamiento es de  $0.0124\text{m}^3$  cuando se tiene una presión de 7 bar (la cual es la máxima permitida para considerarlo como gas ideal).

Si la cámara de calentamiento es sometida a presiones menores es necesario determinar la cantidad de volumen de aire que será necesario calentar.



### 5.2.2. Análisis segunda etapa: calentamiento de la cámara

En esta etapa se considera la entrada del flujo de calor para calentar el aire que se encuentra en la zona de calentamiento, ambas válvulas se encuentran cerradas y el objeto de análisis en esta etapa es la variación del comportamiento de la temperatura con el incremento del flujo de calor y la disminución de la humedad, la presión muestra un incremento de acuerdo a la respuesta del flujo de calor, experimentalmente se determinó que este incremento es mínimo, sin embargo si tiene incidencia en el incremento de la temperatura pero en un intervalo considerable de tiempo.

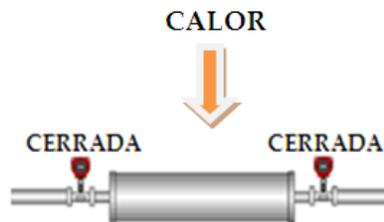


Figura 5-8: Esquema general de la variación de temperatura

El comportamiento de la variación de la temperatura se puede observar en la Figura 5-9

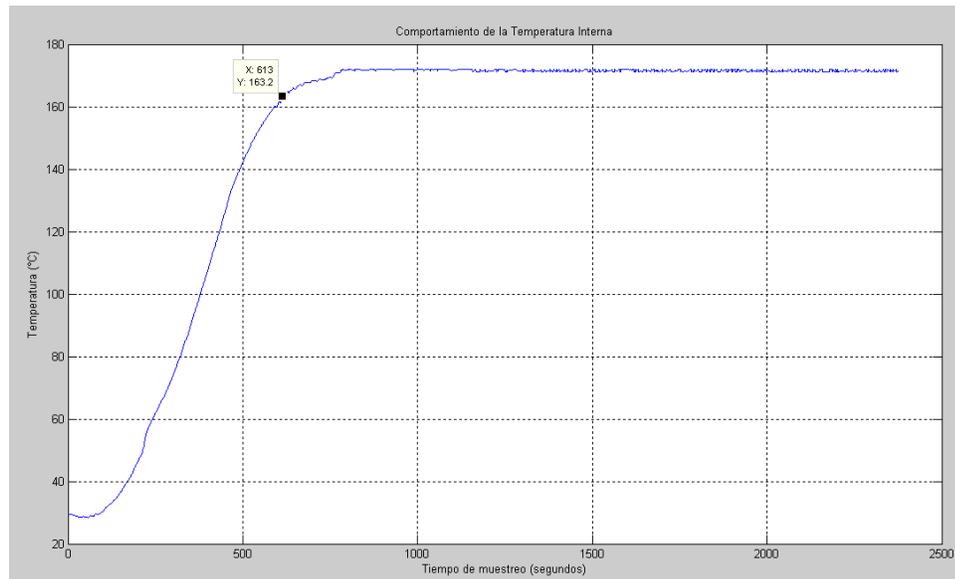


Figura 5-9: Comportamiento de la Temperatura Interna en la cámara de calentamiento.

Experimentalmente se obtuvieron los parámetros del sistema:

| Parámetro  | Valor (experimental) | Definición          |
|------------|----------------------|---------------------|
| $k$        | 171.9 °C             | Ganancia.           |
| $Tretraso$ | 147 segundos         | Tiempo de retraso   |
| $\tau$     | 204.33segundos       | Constante de tiempo |

Tabla 5-4: Parámetros del sistema



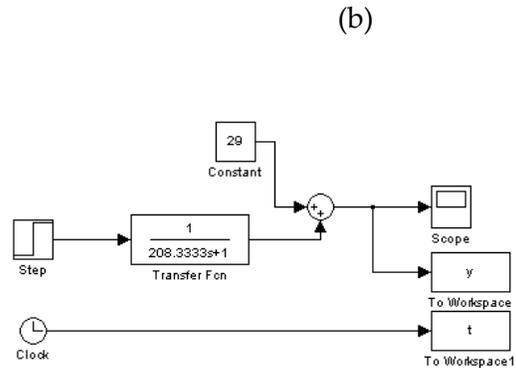
Donde se puede observar que la Temperatura interna del cilindro alcanza su valor de estado estable a los 613 segundos. Ver Figura 5-9. Al igual que el procedimiento anterior se utiliza el software de Matlab y Simulink para facilitar los cálculos.

```

1 % Temperatura interna del cilindro de calentamiento
2 - clic
3 - T=[Datos(:,2)];
4 - N=[Datos(:,1)];
5 - plot(N,T)
6 - hold on
7 - xlabel('Tiempo de muestreo (segundos)')
8 - ylabel('Temperatura (°C)')
9 - Title('Comportamiento de la Temperatura Interna')
10 %Gráfica de la temperatura
11 %Análisis temporal
12 - k=171.999939 % valor de la ganancia
13 - k1=(0.95*k)% Valor de la ganancia para determinar ts
14 - t1=(0.05*k)% Valor de la ganancia para determinar t1
15 - ts=613 %Constante de Tiempo
16 - tao=ts/3 % valor de Tao
17 - N=[k] % Numerador
18 - D=[tao,1]%Denominador
19 - Tretraso=147 % Tiempo de retraso
20 - G=tf(N,D,'InputDelay',Tretraso)% Función de transferencia
21 - plot(t,y,'r')%Gráfica de la respuesta a entrada a escalón

```

(a)



(b)

Figura 5-10: (a) Código en Matlab y (b) diagrama de bloques función de transferencia

La función de transferencia que describe el sistema, aplicando la Ec. 5-2 es la siguiente:

$$G(s) = \frac{172}{204.3s + 1} \exp(-147 * s) \quad 5-7$$

Posteriormente se procede a analizar el comportamiento de la función de transferencia encontrada con los datos obtenidos experimentalmente.

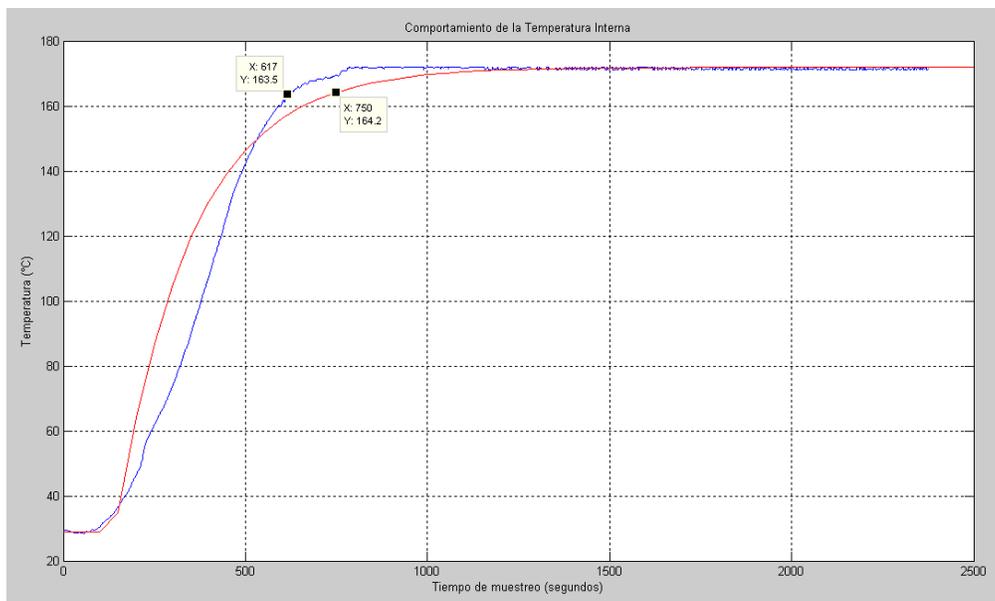


Figura 5-11 Comportamiento experimental y gráfica simulada de primer orden.



| Parámetro   | Comportamiento experimental | Modelo de primer orden Ec. 5-7 |
|---|-----------------------------|--------------------------------|
| Tiempo de Respuesta en estado estable cuando la presión alcanza el valor de 163.5°C, el cual corresponde a un valor de ganancia igual al 95% de K | 613 segundos                | 750 segundos                   |

Tabla 5-5: Parámetros de comparación

Al obtener los tiempos de respuesta en estado estable de ambas gráficas (ver Figura 5-11) es posible observar que la gráfica de la simulación se estabiliza 137 segundos posterior a la experimental. El error de variación entre el comportamiento de la simulación de la función de transferencia de primer orden (Ec. 5-7) y el comportamiento experimental es el siguiente:

$$\text{Error Tiempo en Estado estable} = 750 - 613 = 133 \text{ segundos, por lo tanto } = \frac{133}{613} * 100 = \mathbf{22.34\%}$$

En este caso existe diferencias en el ajuste del modelo en lo que es el tiempo de respuesta y tiempo transitorio para mejorar el comportamiento del mismo se procedió a identificar un segundo modelo de mayor ajuste mediante el método propuesto por Strejc, de igual manera se procedió a determinar los nuevos valores en el tiempo del cambio de salida y entrada así como el tiempo de retardo.

Se realizaron pruebas con modelos de segundo, tercer y quinto orden obteniendo que finalmente el modelo de mayor ajuste es la expresión de quinto orden, los parámetros obtenidos fueron los siguientes:

| Modelo        | Ecuación  | Tiempo en estado estable | Error relativo |
|---------------|---|--------------------------|----------------|
| Segundo orden | $G(s) = \frac{172}{(194.2448s + 1)^2} \exp(-75*s)$  | 950 segundos             | 54.97 %        |
| Tercer orden  | $G(s) = \frac{172}{(154.31s + 1)^3} \exp(-10*s)$    | 950 segundos             | 54.97 %        |
| Quinto orden  | $G(s) = \frac{171.9}{(69.73.s + 1)^5} \exp^{-15*s}$ | 620 segundos             | 1.14%          |

Tabla 5-6: Comparativo de los diferentes modelos obtenidos por el método de Strejc

Analizando los valores obtenidos y realizando la comparación se determina que el modelo de mayor ajuste al comportamiento experimental corresponde al modelo de quinto orden, cuya función de transferencia se determinó de la siguiente manera:



$$T_u = 150 \text{ Seg}$$

$$T_a = 350 \text{ Seg}$$

| $n$ | $T_a/\tau$ | $T_u/\tau$ | $T_u/T_a$ |
|-----|------------|------------|-----------|
| 1   | 1          | 0          | 0         |
| 2   | 2.718      | 0.282      | 0.104     |
| 3   | 3.695      | 0.805      | 0.218     |
| 4   | 4.463      | 1.425      | 0.319     |
| 5   | 5.119      | 2.1        | 0.410     |
| 6   | 5.699      | 2.811      | 0.493     |
| 7   | 6.226      | 3.547      | 0.570     |
| 8   | 6.711      | 4.307      | 0.642     |
| 9   | 7.164      | 5.081      | 0.709     |
| 10  | 7.590      | 5.869      | 0.773     |

Tabla 5-7: Parámetros de Strejc

Con ayuda de los parámetros de Strejc [26], Tabla 5-7 se determina el valor  $n$  que corresponde al orden de la función. Donde determinamos que el orden de la función es de 5 analizando la relación:

$$\frac{T_u}{T_a} = 0.4285$$

Para calcular el valor de  $\tau$  se promedian los valores de las relaciones

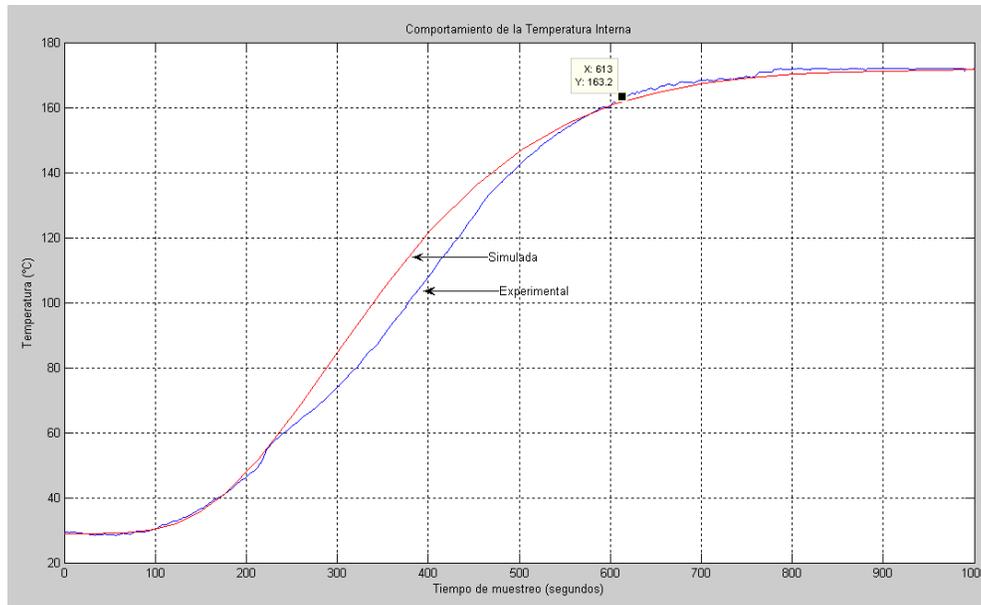
$$\frac{T_a}{\tau} = 5.119$$

$$\frac{T_u}{\tau} = 2.1$$

Donde finalmente se obtiene un valor correspondiente de  $\tau = 69.73$ . Y la función de transferencia obtenida que representa el comportamiento dinámico del proceso es:

$$G(s) = \frac{171.9}{(69.73s + 1)^5} \exp(-15 * s)$$

5-8



**Figura 5-12: Comportamiento de la gráfica experimental y simulada de quinto orden**

Al obtener los tiempos de respuesta en estado estable de ambas gráficas (ver Figura 5-12) es posible observar que la gráfica de la simulación de orden 5 se estabiliza 7 segundos posterior a la curva experimental, en relación al tiempo transitorio muestra una variación aproximadamente de 40 segundos, sin embargo su tiempo de estabilización y tiempo de retraso coinciden con los tiempos obtenidos experimentalmente, por lo que se puede suponer que la función de transferencia de la Ec. 5-8 describe el comportamiento de la variación de la temperatura en el tiempo bajo las condiciones establecidas de la cantidad de masa almacenada y Presión de trabajo; sin embargo dado a la dinámica del proceso y al comportamiento del mismo, es posible utilizar el modelo de segundo orden sin que ocasione mayor incidencia en la estabilización final del mismo.

Una vez obtenida esta expresión que modela el comportamiento de la temperatura bajo estas condiciones se puede determinar el flujo calorífico necesario para llegar a esa temperatura (171 °C), verificando de esta manera la capacidad de fuente de calor que genera el colector solar para lograr la variación de temperatura.

Es posible determinar la cantidad de flujo de calor para calentar la masa de aire contenido en la zona de calentamiento y obtener las diferencias de temperatura registrada en las pruebas experimentales, mediante la siguiente expresión que relaciona el proceso termodinámico a volumen constante [40].

$$Q = mC_v(\Delta T) \quad 5-9$$



En la ecuación Ec. 5-9 se determinó que el volumen de aire atmosférico sometido a una presión de trabajo = 7 bar, que ocupa un volumen de 0.0031 m<sup>3</sup> es de 0.0124 m<sup>3</sup>, partiendo de estas condiciones se procede a conocer la cantidad de masa de aire.

Conociendo las condiciones de presión y temperatura del sistema es posible determinar la cantidad de masa contenida en la cámara de calentamiento mediante la ecuación de los gases ideales expresada en la siguiente ecuación [40]:

$$Pv = mRT \quad 5-10$$

En donde la presión de trabajo  $P$  multiplica al volumen del cilindro  $v$ , lo cual es igual a la masa  $m$  contenida en la cámara de calentamiento multiplicada por la constante universal de los gases  $R$ , en este caso al trabajar con aire toma un valor de 0.287KPa m<sup>3</sup> / K Kg, y la temperatura del sistema  $T$ .

Los valores empleados para la expresión anterior son:

$$R = \text{constante universal de los gases} = 0.287 \frac{\text{Kpam}^3}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$$

$$v = \text{volumen del cilindro determinado en la Ec. 5 - 6}$$

$$C_v = \text{calor específico a volumen constante} = \frac{0.716\text{KJ}}{^\circ\text{K} * \text{Kg}}$$

$$\Delta T = \text{variación de temperatura desde } 291^\circ\text{K hasta } 445^\circ\text{K}$$

$$T = \text{Temperatura ambiente de almacenamiento en el cilindro } 302^\circ\text{K}$$

$$P = \text{de trabajo} = 7 \text{ bar} = 700\text{Kpa}$$

Despejando el valor de la masa y sustituyendo dichos valores en la Ec. 5-10 obtenemos lo siguiente:

$$m = \frac{700 \text{ Kpa} * 0.0031\text{m}^3}{0.287 \frac{\text{Kpam}^3}{\text{KgK}} + 302\text{K}}$$

$$m = 0.025036 \text{ kg}$$

De la cual es sustituida en la 5-9 para obtener la cantidad de calor necesaria para incrementar la temperatura interna del cilindro de 18 a 172 °C (291 a 445 K) es:

$$Q = (0.025036 \text{ Kg}) \left( \frac{0.716 \text{ KJ}}{\text{K} * \text{kg}} \right) (445 - 291)\text{k}$$

$$Q = 2.75\text{KJ}$$

Por lo tanto son necesarios 2.76 KJ para generar el cambio en la variación de la energía interna del cilindro de una temperatura de 18 a 171.9 °C.

**5.2.2.1. Error de las curvas simuladas.**

Para analizar a mayor detalle el resultado del comportamiento simulado en referencia al comportamiento experimental se procedió a determinar las variaciones del área bajo la curva de las gráficas obtenidas.

Fue aplicado el método de integración de Simpson dado que ofrece una mayor precisión y no necesita un gran número de subintervalos para una respuesta confiable [31].

El método de Simpson establece que una integral se puede aproximar a través de un polinomio de orden mayor a uno.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b P(x)dx + E \quad 5-11$$

Donde:

$P(x)$  Es el polinomio de orden superior

$E$ : error del método

Para garantizar mejor resultado se consideraron varios polinomios a lo largo de la curva usando el método de Simpson de 1/3 para segmentos múltiples. Estas subdivisiones consisten en varios trapecios, donde la sumatoria de ellos conforma el área total, lo cual es determinado mediante la siguiente expresión [31]:

$$A = (b - a) \frac{f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + f(x_n)}{3n} \quad 5-12$$

Donde:

$A$  = área bajo la curva

$a$  = límite inferior de la curva

$b$  = límite superior de la curva

$n$  = número de segmentos

- Presión de entrada

Para realizar el análisis del comportamiento obtenido mediante simulación (ver Ec. 5-3 y Ec. 5-4 aplicando el método de Simpson se determinó lo siguiente, haciendo las siguientes consideraciones

*límite inferior* ( $a$ ) = 1

*límite superior* ( $b$ ) = 100

$n$  = número de segmentos = 20



Es decir que cada 5 segundos se determinó un nuevo segmento, considerando el punto de inicio el primer segundo de muestreo y como límite superior 100 segundos que es donde se estabiliza la curva

| Gráfica                         | Área(ua) | Error relativo <sup>14</sup> |
|---------------------------------|----------|------------------------------|
| Curva Experimental Figura 5-2   | 570.96   |                              |
| Modelo de primer orden Ec. 5.3  | 605.10   | 5.979%                       |
| Modelo de segundo orden Ec. 5.4 | 561.23   | 1.7041%                      |

Tabla 5-8: Área y porcentaje de error del comportamiento de la presión de entrada por el método de Simpson.

Es posible observar que hay una diferencia de porcentaje de error del 4.2% entre modelos de simulación, aunque el error no es muy significativo comparado con las diferencias de unidades de área, al analizarlo en conjunto con su comportamiento y considerando que el modelo de segundo orden tiene un comportamiento mas adaptado a la curva experimental, se opta por representar la dinámica del proceso por este modelo.

- Variación del comportamiento de la temperatura interna.

Para realizar el análisis del comportamiento obtenido mediante simulación (ver Ec. 5-7 y Tabla 5-6) aplicando el método de Simpson se determinó lo siguiente, haciendo las siguientes consideraciones

$$\begin{aligned} \text{límite inferior } (a) &= 1 \\ \text{límite superior } (b) &= 1500 \\ n = \text{número de segmentos} &= 300 \end{aligned}$$

Es decir que cada 5 segundos se determinó un nuevo segmento, considerando el punto de inicio el primer segundo de muestreo y como límite superior 1500 segundos que es donde se estabiliza la curva

| Gráfica                             | Área(ua)   | Error relativo |
|-------------------------------------|------------|----------------|
| Curva Experimental Figura 5-9       | 203,314.24 |                |
| Modelo de primer orden (Ec. 5.7)    | 207,892    | 2.25%          |
| Modelo de segundo orden (Tabla 5-6) | 194,112.33 | 4.53%          |
| Modelo de tercer orden (Tabla 5-6)  | 190,546.37 | 6.28%          |
| Modelo de quinto orden (Tabla 5-6)  | 205,893.67 | 1.27%          |

Tabla 5-9: Área y porcentaje de error del comportamiento de la temperatura interna de la cámara de calentamiento por el método de Simpson.

Las diferencias de variación son aproximadamente del 2% entre cada modelo simulado, el menor error encontrado es el comportamiento del modelo de quinto orden, aunque de

<sup>14</sup> Valor absoluto de la diferencia del valor teórico y el valor práctico, dividido entre el valor teórico.



igual forma se podría considerar el de primer orden por no presentar un error tan elevado, sin embargo si esto se analiza en conjunto con el tiempo de respuesta se sugiere representar la dinámica del proceso con el modelo de quinto orden.

### 5.2.3. Análisis tercera etapa: accionamiento del control para la salida del aire

En esta etapa se considera la salida del flujo másico a la temperatura deseada para lograr el secado del grano, la válvula uno continúa cerrada mientras se da la evacuación del aire por la válvula 2 hasta un valor determinado de presión, este ciclo se repite bajo las condiciones de temperatura, presión y humedad deseada. El objeto de análisis en esta etapa es la variación del comportamiento de la presión.

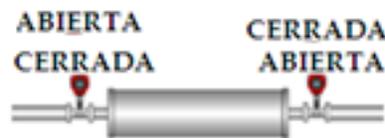


Figura 5-13: Esquema general de la variación de la presión.

El comportamiento de la presión mediante la ejecución del sistema de control es el siguiente:

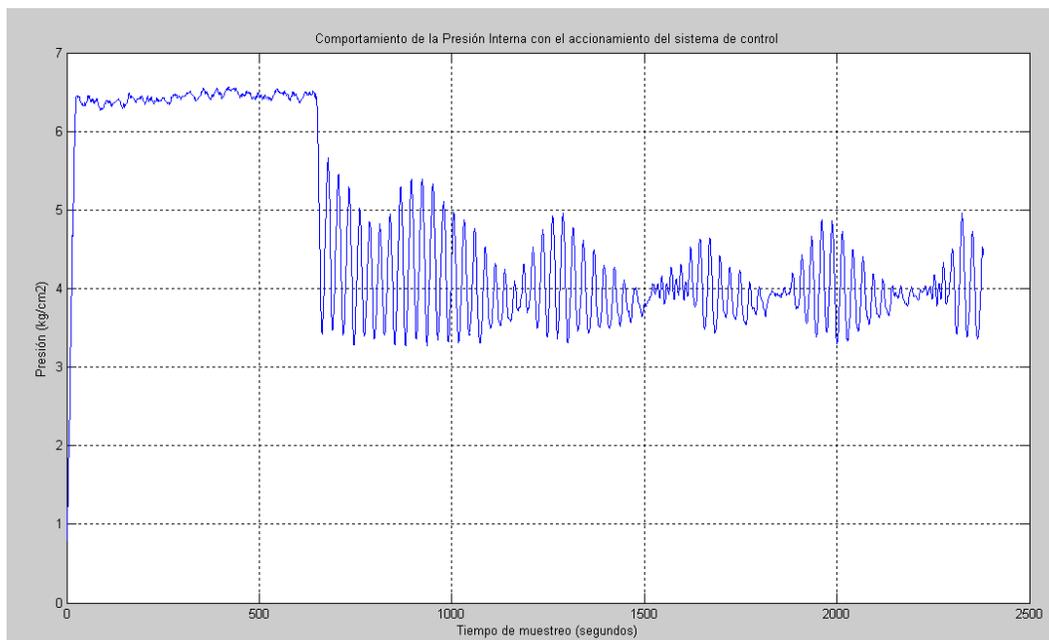


Figura 5-14: Comportamiento de la presión interna de la cámara de calentamiento.

Una vez que los parámetros deseados de temperatura y humedad son alcanzados se ejecutan las reglas de control donde permite la entrada del aire a temperatura ambiente a



la cámara de calentamiento y la salida del aire a temperatura promedio de 60 y 70°C hacia los granos de café.

La señal de respuesta del control del comportamiento del aire corresponde a los parámetros programados, donde se desea obtener un promedio entre 5 y 3 bar, las variaciones e intermitencia corresponden al parámetro de temperatura, donde es necesario que el aire se encuentre por encima de los 170°C para poder permitir la salida del aire, de no cumplirse esta condición, la salida del aire es nula, lo que ocasiona que la válvula 2 se cierre antes de llegar al parámetro de 3 bar, sin embargo el promedio estuvo en un rango aceptable permitiendo obtener la cantidad de masa de aire cada 8-11 segundos a la temperatura deseada con la finalidad de ser usado para el secado.

La respuesta del control responde a la dinámica del proceso, esto se puede observar mediante un comparativo de dichos tiempos obtenidos experimentalmente y relación expresada por la ecuación que determina el tiempo en que ocurre la variación de la presión [35], la cual expresa el tiempo que transcurre cuando hay una diferencia de presiones.

$$t = \frac{\pi D^2 \text{Ln} P_{max}}{4RT_{in} A \left(\frac{1}{RT_{in}}\right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{\pi D^2 \text{Ln} P_{min}}{4RT_{in} A \left(\frac{1}{RT_{in}}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad 5-13$$

Donde:

$R = \text{constante universal de los gases} = 0.287 \frac{\text{Kpam}^3}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$

$A_t = \text{área transversal a la salida donde el diámetro de la válvula de salida} = 1/8" = 3.175 \text{ mm}$

$D = \text{Diámetro del cilindro} = 44.45 \text{ mm}$

Considerando que  $P_{max}$ ,  $P_{min}$ ,  $T_1$  son las variaciones de las presiones y el tiempo obtenidos experimentalmente,  $T_2$  es el tiempo obtenido por la Ec. 5-13. Se tomaron puntos aleatorios de la gráfica y los resultados fueron los siguientes:

| $P_{max} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ | $P_{min} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ | $T_1 \text{ (s)}$ | $T_2 \text{ (s)}$ |
|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 5.388                              | 3.287                              | 13                | 12.69             |
| 4.871                              | 3.491                              | 10                | 8.55              |
| 4.825                              | 3.447                              | 10                | 8.6               |
| 5.11                               | 3.32                               | 13                | 11                |
| 5.668                              | 3.468                              | 12                | 12.6              |
| 4.957                              | 3.33                               | 11                | 10.2              |

Tabla 5-10: Comparativos de tiempos de las diferencias de presiones obtenidas vía experimental y por medio de la ecuación física.



Se puede observar que hay variaciones máximas de dos segundos, incluso hay mediciones donde no se presentan variaciones, con lo que se puede determinar que el tiempo de respuesta del control si corresponde a las condiciones reales del sistema.

Para determinar la cantidad de masa entregada a la temperatura de salida que tendrá contacto con el café húmedo determinamos el diferencial de masa comprendido entre las diferenciales de presiones tomando como referencia un promedio entre ambas, considerando  $P_{\max} = 5 \text{ kg/cm}^2$  y  $P_{\min} = 3 \text{ kg/cm}^2$  y retomando la ecuación Ec. 5-10 de los gases ideales, se obtiene:

$$P_{\max} = 5 \text{ kg/cm}^2 = 0.0178 \text{ kg}$$

$$P_{\min} = 3 \text{ kg/cm}^2 = 0.0107 \text{ kg}$$

La cantidad de masa de aire entregada al producto es de 0.00707 Kg cada 11 segundos.

### 5.2.3.1. Condiciones del aire de salida.

Al salir de la cámara de calentamiento el aire presurizado tiene contacto con el medio, disminuyendo su temperatura e incrementando su humedad relativa, estas son las condiciones en la cuales será entregado para el secado del producto, dichas condiciones fueron monitoreadas donde se determinó que la temperatura y la humedad relativa llegaron a los valores esperados e idóneos para el secado del café.

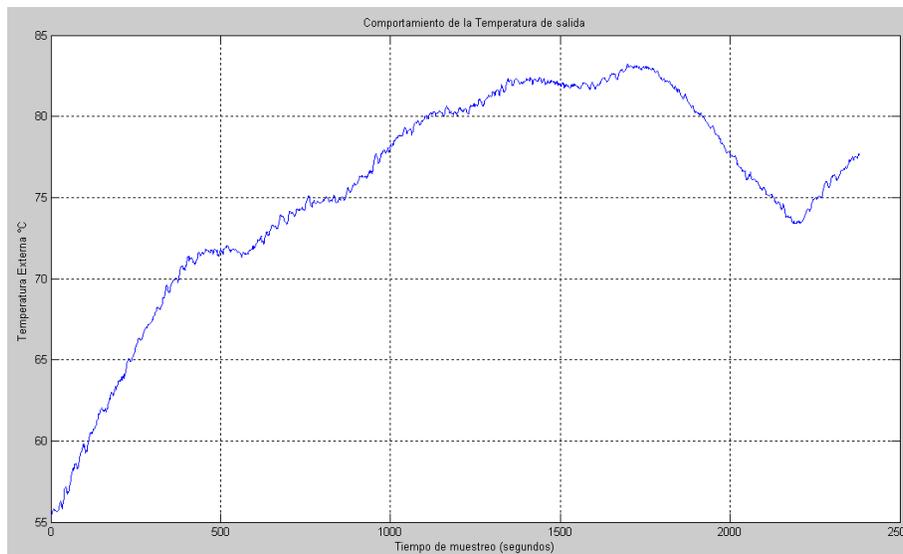


Figura 5-15: Comportamiento de la temperatura de salida.

En la Figura 5-15 se observan los valores alcanzados por la temperatura externa, donde inicialmente registra valores de 55°C, pero a medida que se va estableciendo el equilibrio térmico entre el medio y el aire de salida, se registran los valores mas altos posibles a alcanzar, registrando temperaturas entre los 70 y 85°C . Es posible determinar la



temperatura que puede alcanzar el aire una vez evacuando la cámara de calentamiento mediante la siguiente expresión [14]:

$$T_t = T_{in} \left( \frac{2}{k + 1} \right) \tag{5-14}$$

Donde

$T_{in}$  = corresponde a la temperatura interna del cilindro , experimentalmente se determinó que existe una variación  $\pm 2^\circ\text{C}$  ante los cambios de apertura y cierre de las válvulas, por lo tanto las variaciones internas se pueden considerar mínimas y considerar una temperatura constante =  $433^\circ\text{C}$ .

$$T_t = 360 \text{ K} - 87^\circ\text{C}$$

Mediante la expresión anterior se determina que teóricamente al calentar el tubo hasta que este pueda alcanzar una temperatura de  $433^\circ\text{C}$  se obtiene una temperatura de  $87^\circ\text{C}$ , sin embargo al realizar las pruebas experimentales la temperatura de salida estuvo contemplada en un rango entre  $75^\circ\text{C}$  y  $85^\circ\text{C}$ . Lo que demuestra que a pesar de tener una diferencia de  $5^\circ\text{C}$ , la temperatura que se obtiene a la salida de la cámara de calentamiento se encuentra en el rango esperado.

De igual forma el parámetro de la humedad del aire alcanzó el valor esperado, ya que se mantuvo con un parámetro inferior a un 12%, su comportamiento se puede observar en la Figura 5-16.

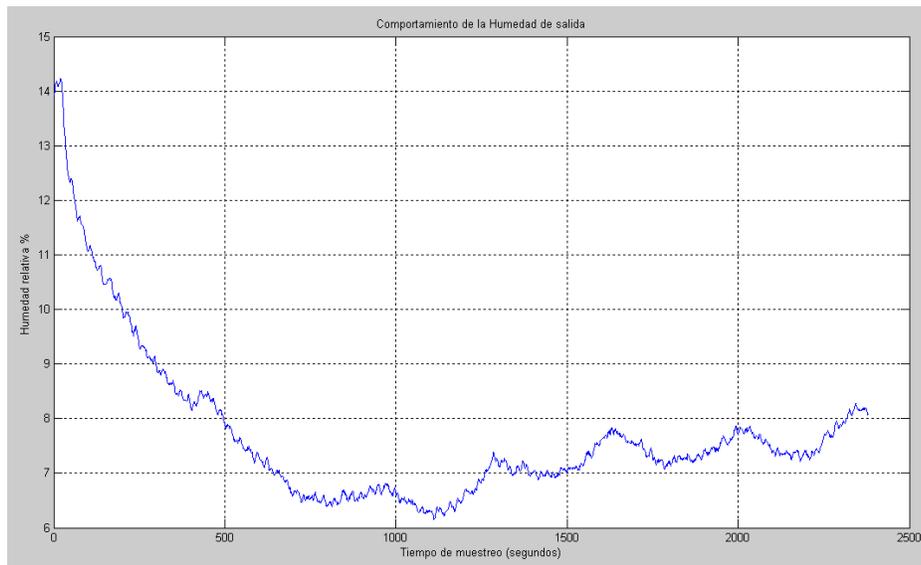


Figura 5-16: Comportamiento de la humedad del aire de salida.



El comportamiento de la humedad del aire de salida disminuye desde un valor de 14% hasta un promedio de 8%, estos valores se ajustan al requerimiento principal para el secado del producto ya que es necesario que el aire de salida contenga un porcentaje menor del 12% de humedad para garantizar que el producto final tenga una humedad similar al aire de contacto y garantizar que por medio de equilibrio térmico se garantice una humedad del 12% al final del secado.

Este comportamiento se puede verificar mediante la siguiente expresión (Ec. 5-15) [40], que determina el porcentaje de humedad relativa contenido en el aire cuando ha alcanzado una presión igual a la presión atmosférica, del cual depende de la temperatura de salida del aire y la temperatura del punto de rocío<sup>15</sup>.

$$HR = 100 * \left( \frac{201.8 - 0.18T_s + 1.8T_h}{201.8 + 1.6T_s} \right)^8 \quad 5-15$$

Se considera que la temperatura del punto de rocío es cuando la temperatura alcanza los 27 °C, considerando la temperatura de salida y los valores promedios de humedad relativa alcanzados.

Donde:

$$T_s = \text{Temperatura del aire de salida} = 78 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_h = \text{Temperatura del punto de rocío} = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo los parámetros en la ecuación anterior se obtiene un valor aproximadamente de 8 % de humedad, el cual corresponde a los parámetros obtenidos experimentalmente, sin embargo se mantendrá este valor siempre y cuando la temperatura de salida alcance valores por encima de los 70°C.

### 5.3. Verificación del sistema de control.

Para verificar la efectividad del sistema de control difuso se realizaron una secuencia de pruebas con la aplicación de las leyes de control (ver sección 4.5)

Esto con el objetivo de determinar el posible error comparativo de las mediciones reales con las que se obtiene por el sistema de control difuso.

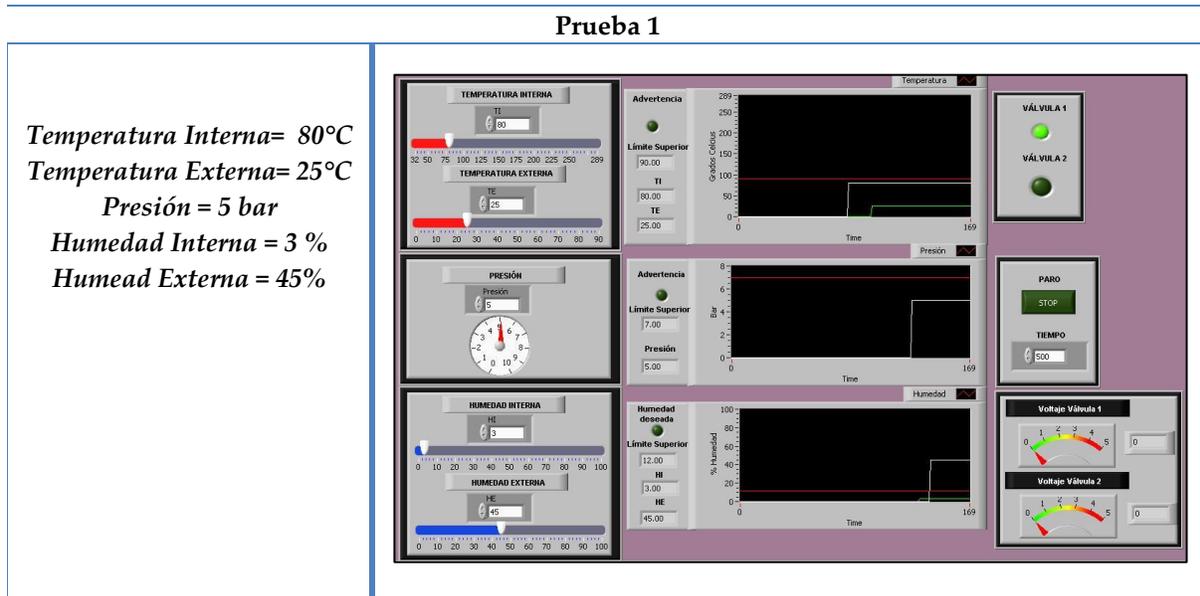
---

<sup>15</sup> Es la temperatura que alcanza la mezcla vapor – gas cuando se enfría a una presión constante por debajo de la cual se forma la primera gota de vapor condensado.



El procedimiento consiste en lo siguiente:

Se realizaron mediciones desde 0- 7 bar a diferentes temperaturas, el control debe responder de acuerdo a las leyes de control establecidas previamente, se realizaron un total de 20 pruebas tratando de contemplar las 42 reglas de control. Al realizar la experimentación se verificó el dato obtenido con el comportamiento de la medición obtenida por los sensores. Los resultados de algunas de las pruebas se muestran a continuación:



**Figura 5-17: Prueba 1**

El control mantiene activada la válvula 1 la cual permite la entrada del aire a la cámara de calentamiento, dado que la presión se mantiene por debajo de los 5 bar, sin embargo al incrementar este valor, cambia el estado de la válvula, mientras que la válvula 2 se mantiene inactiva ya que las condiciones de la temperatura interna aun no ha llegado a los límites correspondientes. En el caso del comportamiento de los sensores de mediciones externos, aun monitorean las condiciones climáticas externas y no así las condiciones del aire de salida (ver Figura 5-17).



Prueba 2

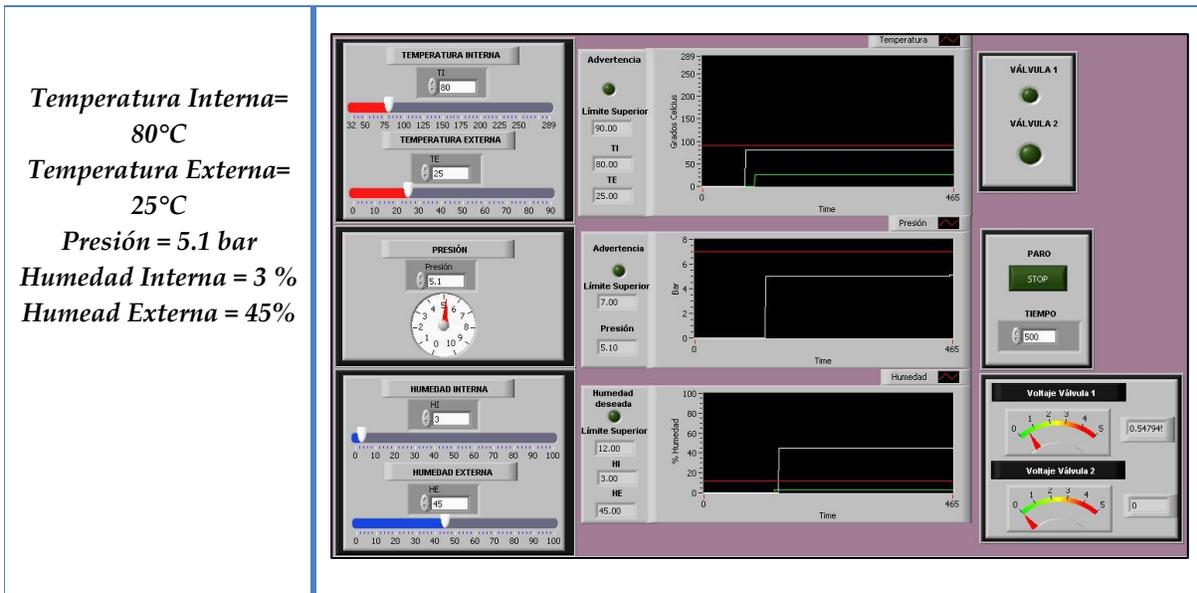


Figura 5-18: Prueba 2

Al incrementar la presión interna desde 5 bar a 5.1 bar, el control desactiva la válvula 1, no permitiendo el paso de entrada del aire a la cámara de calentamiento, la válvula 2 aun se mantiene cerrada dado que aun no alcanza la temperatura adecuada. Los sensores externos aun continúan monitoreando el comportamiento externo de las variables (ver Figura 5-18).

Prueba 3

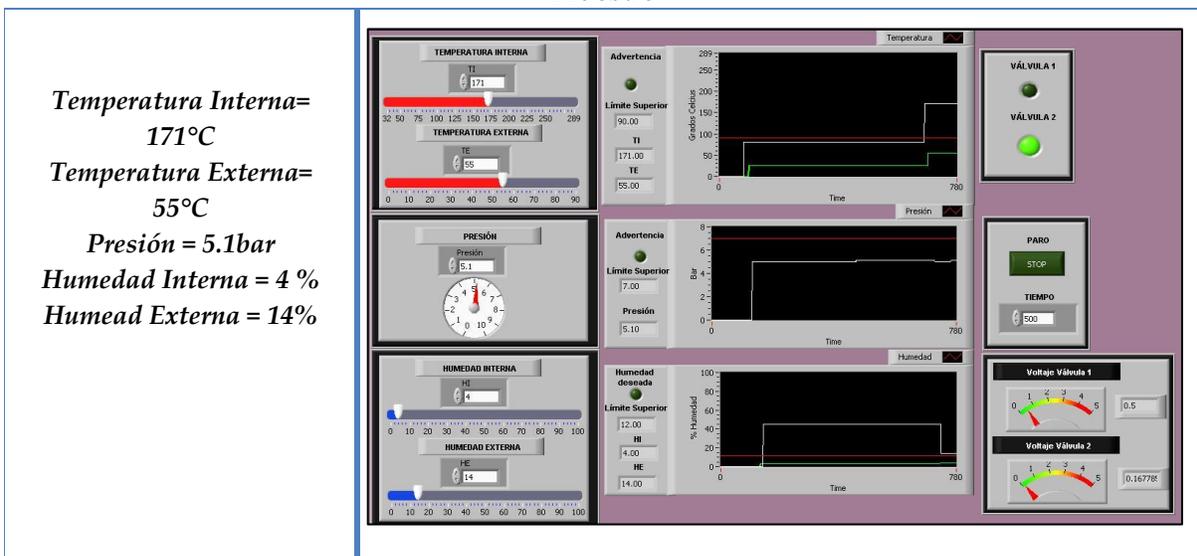


Figura 5-19: Prueba 3



A medida que se le suministra flujo calorífico al aire comprimido dentro de la cámara de calentamiento, incrementa la temperatura interna, cuando esta alcanza los valores deseados de 171°C y la presión interna mayor a 5 bar, se activa la válvula 2, permitiendo la salida del aire interno, en este momento el sensor externo monitorea la temperatura y la humedad del aire de salida, registrando valores hasta que estos han alcanzados el equilibrio térmico. La válvula dos permanecerá abierta si y solo si la temperatura interna continúa registrando valores por arriba de los 170°C y la presión se mantiene en los rangos de 3 y 5 bar (ver Figura 5-19).

## Prueba 4

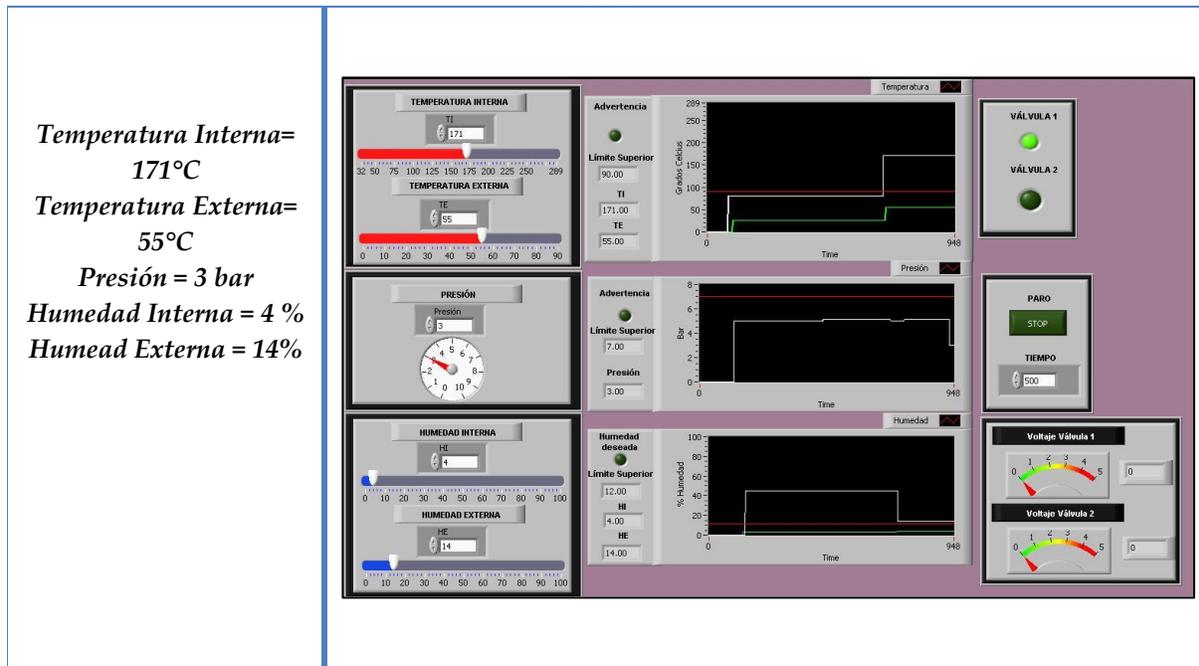


Figura 5-20: Prueba 4

A medida que se da la evacuación del aire de salida por la válvula 2 la presión interna disminuye, activándose la válvula 1 permitiendo la entrada del aire a la cámara de calentamiento hasta que la presión interna ha alcanzado un valor de 3 bar, la temperatura se mantiene constante mostrando variaciones de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , los sensores internos monitorean las condiciones externas hasta que el flujo de salida se lo permite (ver Figura 5-20).

De esta manera se determina que el programa responde de manera acertada a las condiciones reales al que es expuesto, siguiendo las reglas de control que se le han determinado, donde es posible afirmar que no presenta porcentaje de error en relación al seguimiento de la dinámica del proceso, donde mediante operaciones básicas y un conjunto de reglas es posible controlar el flujo de aire requerido para el secado del producto de acuerdo a las necesidades especificadas.



## 5.4. Caracterización del proceso

De acuerdo a las condiciones y cantidad de aire de salida obtenido se puede determinar la cantidad de café a secar, el cual se puede calcular mediante la siguiente ecuación [35]:

$$m_{café} = \frac{\dot{m}_{a1} t n_s C_{pa1} \Delta T_{a1}}{(w_f - w_o)(C_{pw} \Delta T_w + h_{fg})} \quad 5-16$$

Donde:

$\dot{m}_{a1}$  = Flujo másico en Kg/s

$m_{café}$  = masa del café pergamino a secar en Kg

$w_f$  = humedad final deseada %

$w_o$  = humedad inicial del lote de café %

$h_{fg}$  = entalpía de vaporización del agua kJ/kg

$\Delta T_w$  = Cambio de temperatura que experimenta el café en el secado °C

$\Delta T_{a1}$  = Cambio de temperatura que experimenta el aire en el secado °C

$C_{pw}$  = Calor específico del vapor de agua kJ/kg\*K

$C_{pa1}$  = Calor específico del aire atmosférico kJ/Kg\*K

$n_s$  = Eficiencia del secado %

$t$  = Tiempo que se hace pasar el aire por el café (segundos)

Considerando que las condiciones del aire interno de la cámara de calentamiento estuvieron en condiciones óptimas para el secado en un promedio de presión de 4 kg/cm<sup>2</sup> se determinó la cantidad de flujo másico entregado al producto mediante la siguiente expresión<sup>16</sup> [35].

$$m_{salida} = \Gamma A_t P_{in} \left( \frac{1}{RT_{in}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 5-17$$

Donde se determina que para una presión promedio de 4 kg/cm<sup>2</sup> se obtiene un flujo másico de salida de 0.025 Kg/s.

Con esta capacidad de flujo másico y las propiedades del aire a una temperatura promedio de 65°C se obtiene que la capacidad de secado, sustituyendo estos valores en la Ec. 5-17 se determina que para una disposición solar diaria de 8 horas y con una variación de 60 a 10% de humedad del producto es posible obtener un 11.51 Kg de café seco a 12% de humedad en ese período de tiempo.

### 5.4.1. Cantidad de masa de agua extraída del café

En el período de tiempo considerado anteriormente y la capacidad de masa de café a secar, considerando una humedad inicial de 60% de humedad y una humedad final deseada del

<sup>16</sup> Sus parámetros fueron explicados en la ecuación 5-11



12% es posible determinar la cantidad de masa extraída del café mediante la siguiente expresión [25].

$$\dot{m}_w = \frac{m_{cafe}}{t} (w_0 - w_f) \quad 5-18$$

Donde:

$\dot{m}_w$  = masa de agua extraída del café  
 $m_{café}$  = masa del café pergamino a secar  
 $t$  = tiempo que se hace pasar el aire por el producto  
 $w_f$  = humedad final deseada  
 $w_0$  = Humedad inicial del producto

Aplicando estas condiciones a la Ec. 5-18 se obtiene que se extraen 0.69 Kg de agua de 11.5 Kg. de café a secar en 8 horas.

#### 5.4.2. Aplicación del sistema de control en la cámara de secado.

El diseño del control difuso está orientado a controlar la cantidad de aire a la temperatura deseada para el secado del café. Sin embargo se ve en la necesidad de monitorear el estado final del producto a secar para determinar el momento en el que ha alcanzado el porcentaje de humedad deseada. Una manera sencilla es utilizar la referencia del peso del café como medida indirecta de la humedad del grano.

Mediante pruebas experimentales se determinó que 1.8 Kg de café a 12% de humedad aumenta su peso aproximadamente 1 Kg al estar a una humedad de 60%. Este es un parámetro confiable para determinar el estado final del producto.

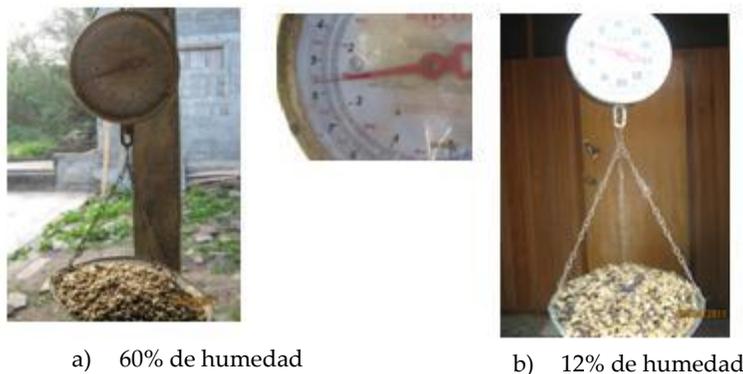


Figura 5-21 Peso inicial y final del café

Anteriormente se determinó la capacidad del sistema actual para el secado; sin embargo para analizar la participación del control en la etapa de secado (tolva) como aporte al



diseño actual, se propone un sistema de pesaje para determinar el momento en el que el café ha alcanzado la humedad deseada, el sistema propuesto es mediante de celdas de cargas, los cuales vienen equipados con sensores de peso electrónico, con el objetivo que sea monitoreado el peso del grano durante todo el proceso de secado, tomando en consideración que el espesor de la capa de los granos contenidos en la cámara no supere los 3 cm de espesor ya que es el rango recomendado para obtener un secado uniforme.

La colocación y la cantidad de celdas de peso estará en dependencia de la capacidad de la tolva, las características de dichas celdas permiten ser monitoreadas con la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6009 que se ha estado utilizando.



### Conclusiones

En el transcurso de esta investigación se plantea una propuesta de diseño de control para el flujo de aire caliente con el objetivo de secar granos de café. Controlar la entrada y la salida del flujo de aire a la temperatura requerida ya que de aquí se derivan las condiciones o la incidencia que tenga el aire en contacto con el producto a secar.

El desarrollo del sistema de control se basó en la aplicación de lógica difusa, donde la experiencia y el conocimiento sobre el proceso del secado del café fue la principal herramienta utilizada para el desarrollo del algoritmo. Una de las principales características del control difuso es la simplicidad de los cálculos lo que permite que el algoritmo y reglas de control no presenten mayor complejidad.

El sistema fue instrumentado con sensores de temperatura, humedad y presión que permitieron el monitoreo y el análisis del comportamiento de las variables del proceso, lo que permitió determinar el comportamiento del aire durante su proceso de calentamiento, así como las condiciones finales del mismo cuando entra en contacto con el producto a secar. El algoritmo de control de lógica difusa permite obtener como respuesta del sistema la activación de las válvulas, y esta señal permite la circulación del aire a las condiciones estipuladas y requeridas.

#### 1. Desarrollo del sistema de control

Para el diseño del sistema de control difuso se utilizaron un total de 42 reglas de control que describen de manera funcional, y en lenguaje natural, los requerimientos de operación del controlador de entrada y salida de aire. Estas reglas de control están basadas en la experiencia y conocimientos del proceso.

Las variables del proceso se designaron en los conjuntos difusos expresadas mediante las funciones de membresía, donde por simplicidad y facilidad de cálculo se utilizó la función tipo triangular para representar las variables de temperatura y presión, y la función tipo singleton, fue considerada para la variable de activación de las válvulas

Las etapas del diseño de control se contemplan desde la adquisición de la señal proveniente de los sensores, y su cálculo de grado de pertenencia a la función de membresía tipo triangular. Se aplica la regla de los mínimos y operadores máximos para la evaluación de las reglas de control, siendo analizada con el método de los promedios de pesos para obtener la respuesta del sistema.

La programación del sistema se desarrolló en el ambiente gráfico de LabVIEW, que incorpora los principales elementos de las variables del sistema. El programa permite



obtener la respuesta del controlador de acuerdo a las reglas y condiciones, donde se realiza la adquisición de las señales de los sensores, y se ejecuta el programa, ahí mismo, se desarrolla la interfaz con la tarjeta de adquisición de datos para enviar la señal a la activación de las válvulas que permite la entrada y salida del aire a la cámara de calentamiento.

### **2. Comportamiento experimental**

La ejecución y aplicación del sistema de control fue puesta en prueba en el prototipo construido, con una frecuencia de muestreo de 1000 milisegundos, realizándose pruebas continuas por 8 horas. Esto permitió analizar el cambio del comportamiento de las variables durante el proceso. Dicho comportamiento fue representado mediante los modelos matemáticos encontrados.

Se aplicó el método gráfico basado en la curva de reacción del proceso por el método de Ziegler Nichols y el método de Strejc para analizar el desempeño de la curva de reacción de la respuesta de los sistemas para la variable presión y la variable temperatura.

Con el método de Nichols Ziegler los sistemas quedaron representados por un sistema de primer orden, sin embargo al analizarlos con el método de Strejc se obtuvo una aproximación más exacta de los modelos encontrados en relación al comportamiento experimental.

En el caso del comportamiento de la presión el sistema quedó representado por un modelo de segundo orden (Ec.5.4), con un porcentaje de error relativo de 36.3%, mientras que la variable temperatura aunque también puede ser representada con un modelo del mismo orden (Tabla 5.6), se determinó que el modelo de quinto orden presenta el menor error en relación al comportamiento experimental (error relativo de 1.14%). Sin embargo la diferencia entre estos dos modelos no es muy significativa si se analiza, que el tiempo de respuesta en estado transitorio no influye en el comportamiento de la dinámica del proceso, por lo que es posible representar la variable temperatura por el modelo de segundo orden. Para obtener un análisis más detallado, se analizó el área bajo la curva de cada uno de los modelos y se determinó su porcentaje de error relativo en relación a la curva experimental, cuyos resultados determinaron que ambas variables pueden ser representadas por los modelos de segundo orden encontrados en este trabajo.

### **3. Caracterización del proceso**

El suministro de la energía térmica permitió el incremento de la temperatura interna de la cámara de calentamiento, hasta alcanzar temperaturas de 170 °C. Esto a su vez permitió que la temperatura del aire de salida estuviera en un rango de 75°C a 80°C, y de igual forma que el aire pudiera alcanzar un valor de 8% de humedad. Lo que permite aseverar



que el aire alcanza las condiciones necesarias y requeridas para pasar a la etapa de secado del producto.

La disponibilidad del aire es obtenida cada 11 segundos, considerando lo siguiente: una presión interna promedio de 4 bar; con un margen mínimo de 3 bar y un margen máximo de 5 bar.

El tiempo de 11 segundos es el tiempo de respuesta de la aplicación del algoritmo de control, esto quiere decir que tarda 11 segundos en pasar del margen máximo al margen mínimo de presión. Este tiempo corresponde al comportamiento teórico del proceso (ver Ecuación 5-16), demostrando que el algoritmo de control implementado si responde al comportamiento del sistema y se ajusta a la dinámica del proceso.

Con estas condiciones establecidas se determinó que la capacidad de secado del equipo, es de 11.5 Kg. de café en un promedio de 8 horas, siempre y cuando se mantengan las condiciones anteriormente mencionadas.

### **Trabajos a futuro.**

Como puntos de mejora al trabajo desarrollado, se pueden citar los siguientes aspectos:

El sistema utiliza energía solar para el calentamiento del aire, sin embargo se puede incursionar para que se utilice una fuente alternativa utilizando el efecto fotovoltaico con celdas solares para la activación de los componentes electrónicos.

La implementación del algoritmo de control fue desarrollado en la plataforma de LabVIEW. Es posible que un dispositivo programable como tal una FPGA realice este trabajo, desarrollando una tarjeta electrónica para su ejecución.

Implementar otros algoritmos de control y realizar un análisis comparativo con el sistema actual.



## Referencias

- [1] Ángulo, B., & Raya, G. (2004). Tecnología de sistemas de control. Catalunya: UPC.
- [2] Balcells, J., & Romeral, J. L. (1998). Autómatas Programables. En J. Balcells, & J. L. Romeral, Autómatas Programables (pág. 113). México: Alfaomega.
- [3] Boateng, O., & Barrie, A. (1998). Tecnologías aplicadas al ciclo alimentario. Intermediate Technology Development Group.
- [4] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2003). Termodinámica. México: McGraw Hill.
- [5] Ceylan, I. (2009). Energy Analysis of PID Controlled Heat Pump Dryer . Scientific Research , 188-195.
- [6] Creus Solé, A. (2007). Simulación y control de procesos por ordenador. España: MARCOMBO, S.A.
- [7] Cuahtemoc Peredo, M. (2001). Integración de un algoritmo de control difuso en un FPGA para nivel de líquido. México: CIC IPN .
- [8] Filev, Y. (1994). Essential of Fuzzy Modeling and Control. N.Y.: Wiley Interscience.
- [9] Fonseca, F. S. (1998). Analisis de alternativas de utilización de secadores solares en el proceso de beneficiado de café. Universidad de Oriente.
- [10] Gan Acosta, A., & Sandoval Carrero, N. S. (2003). Diseño del sistem de control del proceso de secado de pastas alimenticias. Revista Colombiana de Tecnologíass de Avanzada. ISSN:1692-7257 , 6.
- [11] García, M. E. (1999). Automatización de los procesos Industriales. Valencia: CFP CERES UPV .
- [12] Herrera Lozada, J. C. (2002). Implementación de un control difuso en una FPGA, utilizando lenguajes de descripción de hardware. México: CIC. IPN.
- [13] Herrera Lozada, J. C. (2002). Implementación de un controlador difuso en un FPGA, utilizando lenguajes de descripción de hardware. México: Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Computación.



- [14] Howell, J. R., & Buckius, R. O. (1992). Fundamentals of Engineering Thermodynamics . En J. R. Howell, & R. O. Buckius, Fundamentals of Engineering Thermodynamics (pág. 329). New York, USA: McGraw-Hill.
- [15] Javanmard, M., Endan, J., Abbas, K., & Arvin, F. (2010). Development of A Semi - Industrial Multi Fruit Dryer System Using Simultaneous Intelligent Control . American Journal of Applied Sciencies , 160-166.
- [16] Kandel, A. (1994). Fuzzy control systems. USA: CRC Press Inc. .
- [17] Kuo, B. C. (1996). Sistemas de Control Automático. México: Prentice Hall.
- [18] Lajara Vizcaíno, J. R., & Pelegrí Sebastiá, J. (2009). LabVIEW entorno gráfico de programación. En J. R. Lajara Vizcaíno, & J. Pelegrí Sebastiá, LabVIEW entorno gráfico de programación (págs. 338-339). Barcelona, España: MARCOMBO S.A.
- [19] López Fontal, E. M. (2006). Secado de café en lecho fluidizado. Ingeniería e Invesigacion. Universidad Nacional de Colombia ISSN 0120-5509, 25-29.
- [20] López Fontal, E. M. (2005). Sistemas de lógica difusa en el proceso de secado de café en lecho fluidizado. Ingeniería e Investigación. Universidad Nacional de Colombia. ISSN 0120-5509, 84-91 .
- [21] López Islas, J. A. (2010). Monitoreo de una celda dinamométrica en el proceso de pruebas automotores de VW. En J. A. López Islas, Monitoreo de una celda dinamométrica en el proceso de pruebas automotores de VW (págs. 31-32). México: Instituto Politécnico Nacional. ESIME U.A.
- [22] Marsans, G., Yanucci, D., & Pascual, M. (1998). Curso de manejo y conservación de granos. . Facultad de Agronomía de Buenos Aires Argentina.
- [23] Nicolas, R. R. (1995). Sistemas de control basados en lógica borrosa. Electronics Ikerlan OMRON.
- [24] Ogata, K. (1998). Ingeniería de control moderna. México: Prentice Hall.
- [25] Orozco Hicapié, C. A., & Bedoya Loaiza, F. (Agosto, 2007). Cálculo del flujo másico y caudal de aire para un ventilador utilizado en silos para secado para el café. Scientis et Technica Año XIII. Universidad Tecnológica dePereira ISSN 0122-1701, 207-213.



- [26] Palomino Masco, J. F. (2010). Modelamiento experimental del intercambiador de calor de tubos y carcasa de Lângerer. Lima, Perú: Pontífica Universidad Católica del Perú.
- [27] Restrepo Victoria, A. H., & Burbano Jaramillo, J. C. (Abril 2005). Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. Scientia et Technica Año XI No. 27. UTP. ISSN 0122-1701, 127-133.
- [28] Risaralda, P. (2003). Automatización. CPUSG Colombia.
- [29] Rivera Blas, R. (2006). Implementación de un sistema de control difuso en un procesador digital de señales. México: Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Computación.
- [30] Rodríguez, A., Fonseca, J. L., & Pantoja, S. (1998). Secado de café pergamino en secadores solares. Centro de Investigaciones de energía solar.
- [31] Rosas Margarito, J. (2003). Métodos numéricos (Teoría y programación en lenguaje C). En J. Rosas Margarito, Métodos numéricos (Teoría y programación en lenguaje C) (pág. 279). México: MOYA.
- [32] Silvano, B. (2004). Patente nº ES 2 221 392 T3. España.
- [33] Souza, A., Matsura, E. E., & Miranda, J. H. (2005). Teoría de conjuntos fuzzy aplicada al estudio de la dinámica del agua de los solutos en el suelo. Estudios de la zona no saturada del suelo Vol VII, 5.
- [34] Torres V., F., Muñoz P., C., Velásquez B., I., & Shene V., C. (2003). Control difuso para una planta piloto de secado por lecho fluidizado. Facultad de Ingeniería U.T.A. CHILE, 49-53.
- [35] Valderrábano Ramírez, R. (2011). Concentración de Energía solar para el secado de café pergamino. México: Instituto Politécnico Nacional. ESIME U.A.
- [36] Valdovinos, B. E., Rayo, V., Rodríguez, G. C., García, M. A., & Salgado, M. A. (2001). Diseño de un Algoritmo de Control Basado en Lógica Difusa Aplicado a un Secador de Tambor Rotatorio de Alimentos. Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos. Instituto Tecnológico de Veracruz,
- [37] Vargas Baeza, V. (2009). Sistemas de visión artificial para el control de calidad en piezas cromadas. México: Instituto Politécnico Nacional.



[38] Verrastro, C., Alberino, S., & Folino, P. (2005). Control PID con esquema adaptativo de filtrado de ruido. XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la información y control , 5.

[39] Yliniemi, L. (1999). Advanced control of a rotary dryer. Oulu, Finland: Department of Process Engineering.

[40] Yunus A., C., & Michael A., B. (2003). Termodinámica. En C. Yunus A., & B. Michael A., Termodinámica. Mc. Graw Hil.



## Anexos

## Anexo 1: Especificaciones técnicas del sensor HMZ433A1

www.agelectronica.com

www.agelectronica.com

## PRODUCT SPECIFICATIONS

HMZ-433A1

## HMZ-433A1 Humidity module specifications

## 1. Application range :

The HMZ-433A1 module consist of an HCZ sensor and integrated circuit to provide a linear DC Voltage for 0-100%RH to enable easy user application of the HCZ sensor. They are specifically designed for use appliances and controllers.

| Feature                       | Application                                |
|-------------------------------|--|
| Wide humidity operation range | Air condition ,humidifier, Dehumidifier.   |
| Linear DC Output              | Humidity controller, Humidity transmitter. |
| Easy operation                | Hygrometer, Hygro-recorder.                |
| Long-term stability           | Copying machine.                           |
| Small and economical          | Clock ,Weather-forecast barometer.         |

## 2. Electrical characteristics :

2.1 Sensing element (Humidity) : HMZ-433A1 Humidity sensor " GHITRON HCZ sensor"

2.2 Supply Voltage(Vin) : 5VDC $\pm$ 5%

2.3 Current Consumption : 5mA max:(2mA avg.)

## 2.4 Operating Range

Temperature : 0 to 200°C

Humidity : 95%RH or less

## 2.5 Storage

Temperature : -20 to 200°C

Humidity : 95%RH or less

## 2.6 Humidity transmitting

Range : 20 to 90%RH

## 2.7 Accuracy :

Temperature : Resistance(1%) : 50 $\pm$ 0.5K $\Omega$ (at 25 $\pm$ 0.2°C)

Humidity :  $\pm$ 5%RH (at 25°C , 50%RH, Vin=5.00VDC)

## 2.8 Humidity Output 0~3.3V

At 25°C, Vin=5.00VDC

Signal(Reference) : (Output Impedance approx:5K $\Omega$ )

| Humidity(%RH)     | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Output Voltage(V) | 0.66 | 0.99 | 1.32 | 1.65 | 1.98 | 2.31 | 2.64 | 2.97 |

## 2.9 Temperature Output

Using thermistor 503 R(25°C)=50K $\Omega$  $\pm$ 1%,

Signal(Reference) : B(25/85)=3950K $\pm$ 1%

www.agelectronica.com

Page 1 of 1

App. No.

www.agelectronica.com

Ghitron Technology



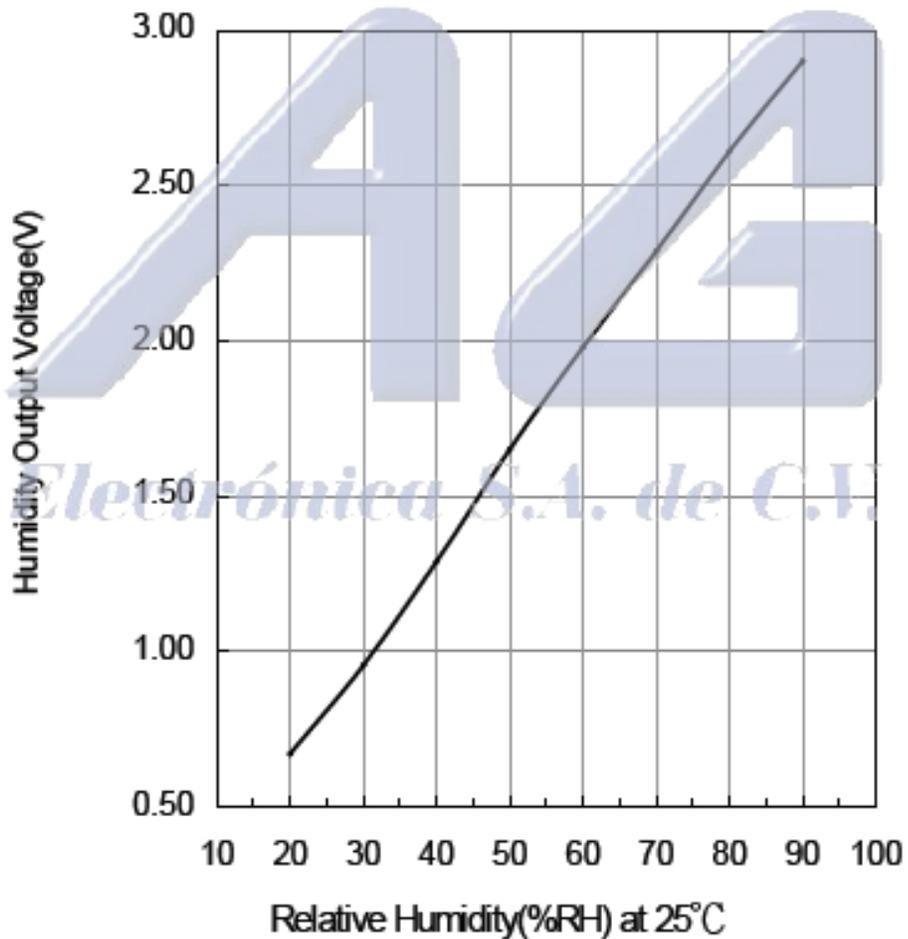
PRODUCT SPECIFICATIONS

HMZ-433A1

|                 |        |        |        |      |      |        |     |     |
|-----------------|--------|--------|--------|------|------|--------|-----|-----|
| Temperature(°C) | 0      | 10     | 20     | 25   | 40   | 60     | 80  | 90  |
| Resistance(KΩ)  | 160.56 | 98.714 | 62.328 | 50.0 | 40.4 | 18.138 | 5.1 | 0.9 |

2.10 Humidity Output 0~3.3V characteristics :

HMZ-433A1 Humidity Output 0~3.3V characteristics



PRODUCT SPECIFICATIONS

HMZ-433A1

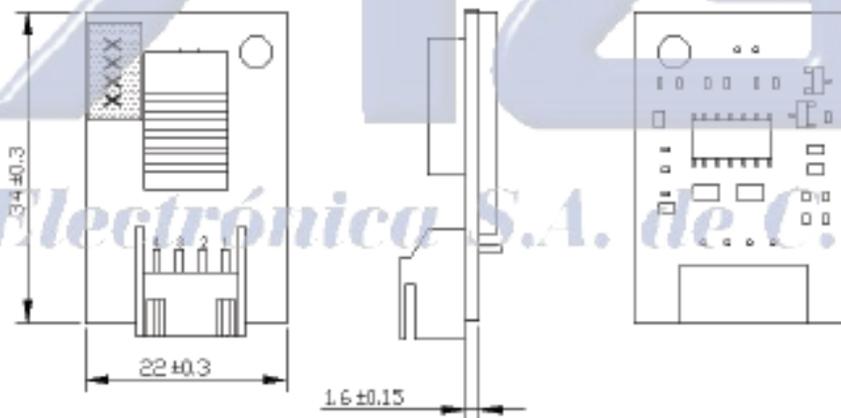
2.11 HMZ module Humidity Output 0~3.3V v.s Temperature characteristics :

|       | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | 35°C | 40°C |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20%RH | 0.75 | 0.72 | 0.69 | 0.66 | 0.62 | 0.59 | 0.55 |
| 30%RH | 1.03 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.96 | 0.93 | 0.90 |
| 40%RH | 1.32 | 1.30 | 1.31 | 1.32 | 1.30 | 1.28 | 1.25 |
| 50%RH | 1.64 | 1.63 | 1.64 | 1.65 | 1.64 | 1.63 | 1.61 |
| 60%RH | 1.97 | 1.97 | 1.98 | 1.98 | 1.98 | 1.98 | 1.96 |
| 70%RH | 2.30 | 2.30 | 2.31 | 2.31 | 2.31 | 2.31 | 2.30 |
| 80%RH | 2.64 | 2.64 | 2.63 | 2.64 | 2.63 | 2.63 | 2.61 |
| 90%RH | 2.97 | 2.96 | 2.94 | 2.97 | 2.94 | 2.92 | 2.90 |

Remark : Accuracy :  $\pm 5\%RH$ (at 25°C • 60%RH •  $V_{in}=5.00VDC$ )

Output range : 1.815~2.145V(55%RH~85%RH Output)

3. Configuration & Dimensions (Units :mm) : Model No. HMZ-433A1 Drawing



3.1 Terminal Connection :

| Terminal | Content. (4Pin Pitch : 2.5mm)      |
|----------|------------------------------------|
| Pin1     | Power Source 5V DC.                |
| Pin2     | Humidity Output                    |
| Pin3     | GND                                |
| Pin4     | Temp Output 50k $\Omega$ (at 25°C) |

Remark : Please pay attention to the power source and GND polarity position.

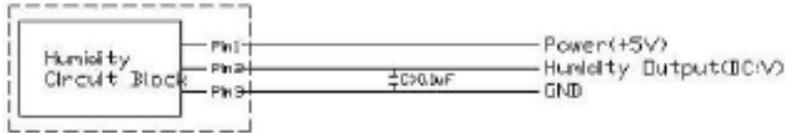


PRODUCT SPECIFICATIONS

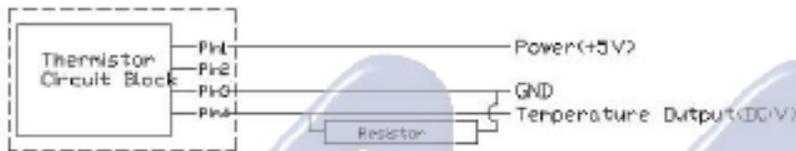
HMZ-433A1

4. Typical Applications :

4.1 Pin2 Humidity output (DC:V)



4.2 Pin4 Thermistor output (DC:V)



5. Order Form :

HMZ—433A1 is the module with 2317RJ-04 4 pins(pitch – 2.5 mm) of terminal Connector of voltage output for humidity and temperature output 50KΩ (at 25°C) -

| HMZ-433A1 Configure of definition. |  |
|------------------------------------|--|
| Input Voltage                      | 5V                                     |
| Humidity Output Voltage            | 0~3.3V                                 |
| Temperature Output                 | 50kΩ (at 25°C) - (*Note1*)             |
| Terminal Connector                 | 2317RJ-04 , 4pins , (Pitch – 2.5 mm) . |
| Accuracy                           | ±5%RH(at 25°C, 60%RH, Vin=5.00VDC)     |
| Sensing element (Humidity) :       | Humidity sensor " GHITRON HCZ sensor". |
| Output Range :                     | 20~90%RH                               |

(\*Note1\*) Optional type

|            |                              |
|------------|------------------------------|
| Part_No.   | NTC Configure of definition. |
| HMZ-433A1  | 50kΩ , SMD (Default type)    |
| HMZ-433A1N | NA                           |
| HMZ-433A1D | 50kΩ , DIP                   |

6. Reliability test :

| No. | ITEM           | METHOD   | REQUIREMENT   |
|-----|----------------|--|---|
| 6.1 | Impact test    | To drop Module 3time at random on to a hard wooden plate from 1meter above high.             | No breakage, nor cracks.<br>Should be electrically normal |
| 6.2 | Vibration test | Vibration test in X-Y-Z axis for 30min.under 10-55Hz frequency, 1.5mm(10-55-10Hz) amplitude. | No breakage, nor cracks.<br>Should be electrically normal |



| PRODUCT SPECIFICATIONS |                            |  | HMZ-433A1                |
|------------------------|----------------------------|--|--------------------------|
| No.                    | ITEM                       | METHOD   | REQUIREMENT              |
| 00°C                   | 6.3 Humidity resistance    | 1000 hours@ 190°C 90%RH .  | $\Delta\%RH < \pm 5\%RH$ |
|                        | 6.4 Cool resistance        | 1000 hours@ -30°C  | $\Delta\%RH < \pm 5\%RH$ |
| 185°C                  | 6-5 Temperature cycle test | Repeat 100 cycles • Each cycle:<br>30 minutes@ -30°C<br>30 minutes@ 85°C | $\Delta\%RH < \pm 5\%RH$ |
|                        | 6.6 Loading test           | Room Temperature / Humidity • Input +5V. for 1000hours.                  | $\Delta\%RH < \pm 5\%RH$ |

**Remarks :**

- (1) All standard figures are based on humidity variation under 60%RH(25°C)  
 (2) Upon completion of all tests, The module will be left over under nominal environment and humidity for 24hours.

**7. Packing :**

There are 50 pieces of modules to be packed in one tray.

**8. Caution remarks on operation :**

- 8.1 To avoid direct application of DC voltage on humidity sensor.  
 8.2 To protect sensor from dewfall and drenching.  
 8.3 To avoid and operation of humidity sensors in the following environmental ambient.

**8.3.1 Salt**

8.3.2 Inorganic gas Sulfide dioxide, Chlorine, Ammonium, etc.

8.3.3 Organic gas Alcoholic, Glycols, Aldehydes, etc.

**8.4 Recommendable storage condition :**

Temperature range 10~200°C

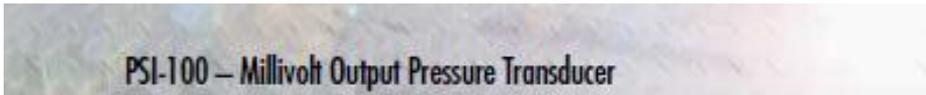
Humidity Range 90%RH or Less.

8.5 Do not store humidity sensors long period of time in an 200°C ambient, due to some occasion of degradation on sensor housing case.

Remark : We have the right to revise specification and product configurations without notice.



## Anexo 2: Especificaciones técnicas del sensor de Presión PSI-100



pressure products

### PSI-100

#### Millivolt Output Pressure Transducer

- Low cost
  - Accuracy (linearity, hysteresis, repeatability):  $\pm 0.25\%$  F.S. (B.F.S.L.)
  - Hybrid compensation network for reliability
  - Standardized output of 10 mV/V (other outputs available)
  - Rugged all-stainless welded construction
- **Options**
  - Special fittings, outputs and metric ranges available on request
  - For custom designs or special applications, consult factory
  - Color coded cable "pigtail"
  - $\pm 0.10\%$  F.S.

#### ■ Operational Description

##### Strain Gage Transducer With $\pm 0.25\%$ Full Scale Accuracy (B.F.S.L.)

The PSI-100 offers pressure ranges of vacuum to 10,000 psi, gage or absolute. Features include high burst pressure and a high accuracy of  $\pm 0.25\%$  full scale (B.F.S.L.).

The sensor consists of silicon piezoresistive strain gages arranged in a wheatstone bridge configuration and mounted on a flat metal diaphragm. The output is conditioned for 100 mV full scale output for all ranges (10 mV/V).

The sensor, along with a hybrid compensation network, is packaged in an all stainless steel housing for use in harsh environments.

#### ■ Applications

The PSI-100 is the economical answer for all general purpose pressure measurements where a cost-effective, high reliability unit is required.

The small size (2 oz.), integrated hybrid compensation and rugged construction make this unit a good all purpose transducer with an extremely long life for virtually all static and dynamic pressure measurement applications.



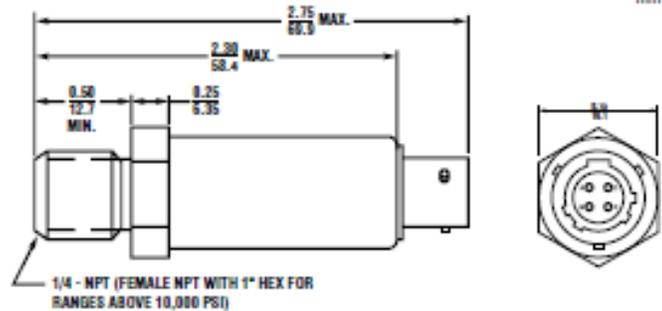


# PSI-100 – Millivolt Output Pressure Transducer

### Specifications

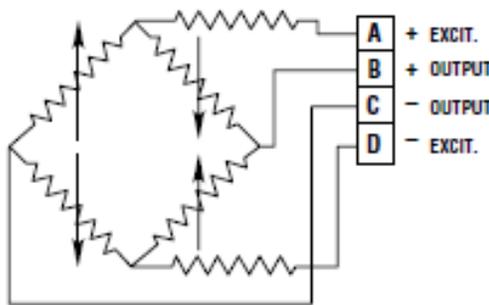
|   |
|---|
| <b>PERFORMANCE</b>  |
| Standard Pressure Ranges: Vacuum to 10,000 psi gage or absolute                       |
| Overpressure: 2x full scale   |
| Burst Pressure: 10x full scale or 20,000 psi (whichever is less)                      |
| Accuracy (linearity, hysteresis, and repeatability): ± 0.25% of full scale (B.F.S.L.) |
| Thermal Zero Shift: ±0.01% F.S./°F  |
| Thermal Sensitivity Shift: ±0.01% F.S./°F   |
| Zero Balance: ±1% of full scale   |
| Life: 10 million cycles minimum   |
| <b>ENVIRONMENTAL</b>  |
| Compensated Temperature: 0 to 130°F   |
| Storage Temperature: -40 to 250°F   |
| Operating Temperature: -40 to 250°F   |
| <b>ELECTRICAL</b>   |
| Excitation: 10 VDC recommended, 20 V max (DC or AC)                                   |
| Output: 10 mV/V ±1%   |
| Input Impedance: 1200 Ω minimum   |
| Output Impedance: Approx. 500 Ω   |
| Output/Input: Non isolated, floating, 4 wire  |
| Resolution: Infinite  |
| <b>PHYSICAL</b>   |
| Weight: 2 oz.   |
| Wetted Materials: SS 15-5 or 17-4 PH  |
| Media: Compatible with 15-5 or 17-4 SS  |
| Connector: Electrical receptacle: Bendix PT1H-8-4 P or equivalent                     |
| Mating Connector: Bendix PT05A-8-4S (SR) or equivalent (not supplied)                 |
| Cavity Volume: 0.06 <sup>3</sup> in.  |

### Dimensions

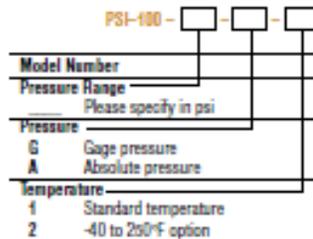


Connector version shown. 2 ft. "Pigtail" cable optional.

### Circuit Diagram



### Ordering Information



**For the Latest Information**  
 Try Our Fax Back System at 1/916/431-6644  
 On the Internet: [www.stiautomationproducts.com](http://www.stiautomationproducts.com) E-mail: [sales@stiautomationproducts.com](mailto:sales@stiautomationproducts.com)

Scientific Technologies Inc.  
 Automation Products Group ... Providing  
 tailored solutions for measurement applications.



131

Tel: 1/989/525-7300 • Fax: 1/435/753-7490  
[www.stiautomationproducts.com](http://www.stiautomationproducts.com) • E-mail: [sales@stiautomationproducts.com](mailto:sales@stiautomationproducts.com)



# Anexo 3: Especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6009.



Technical Sales  
United States  
(866) 531-6285  
info@ni.com

Print | E-mail this Page | Open Document as PDF

[Requirements and Compatibility](#) | [Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#)  
For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2010-04-07 18:29:30.0

## Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB 12- or 14-Bit, Up to 48 kS/s, 8 Analog Inputs



- 8 analog inputs at 12 or 14 bits, up to 48 kS/s
- 2 analog outputs at 12 bits, software-timed
- 12 TTL/CMOS digital I/O lines
- One 32-bit, 5 MHz counter
- Digital triggering
- Bus-powered
- 1-year warranty

### Overview

With recent bandwidth improvements and new innovations from National Instruments, USB has evolved into a core bus of choice for measurement applications. The NI USB-6008 and USB-6009 are low-cost data acquisition (DAQ) devices with easy screw connectivity and a small form factor. With plug-and-play USB connectivity, these devices are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

[Back to Top](#)

### Requirements and Compatibility

#### OS Information

- Windows 2000/XP
- Mac OS X
- Windows 7
- Windows CE
- Windows Mobile
- Windows Vista x64

#### Driver Information

- NI-DAQmx
- NI-DAQmx Base

#### Software Compatibility

- ANSI C/C++
- LabVIEW
- LabVIEW SignalExpress
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio



• Windows Vista x86

[Back to Top](#)

### Comparison Tables

| Product  | Analog Inputs                 | Input Resolution | Max Sampling Rate (kS/s) | Analog Outputs | Output Resolution | Output Rate (Hz) | Digital I/O Lines | 32-Bit Counter | Triggering |
|----------|-------------------------------|------------------|--------------------------|----------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------|------------|
| USB-6008 | 8 single-ended/4 differential | 12               | 10                       | 2              | 12                | 150              | 12                | 1              | Digital    |
| USB-6009 | 8 single-ended/4 differential | 14               | 48                       | 2              | 12                | 150              | 12                | 1              | Digital    |

[Back to Top](#)

### Application and Technology

The USB-6008 and USB-6009 are ideal for applications where a low-cost, small form factor and simplicity are essential. Examples include the following:

- Data logging – quick and easy environmental or voltage data logging
- Academic lab use – student ownership of data acquisition hardware for completely interactive lab-based courses (Academic pricing available. Visit [ni.com/academic](http://ni.com/academic) for details.)
- OEM applications as I/O for embedded systems

### Recommended Software

National Instruments measurement services software, built around NI-DAQmx driver software, includes intuitive application programming interfaces, configuration tools, I/O assistants, and other tools designed to reduce system setup, configuration, and development time. National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx driver software for application development in NI LabVIEW, LabVIEW SignalExpress, LabWindows™/CVI, and Measurement Studio software. To obtain the latest version of NI-DAQmx, visit [ni.com/support/daq/versions](http://ni.com/support/daq/versions).

NI measurement services software speeds up your development with features including the following:

- A guide to create fast and accurate measurements with no programming using the DAQ Assistant.
- Automatic code generation to create your application in LabVIEW.
- LabWindows/CVI; LabVIEW SignalExpress; and C#, Visual Studio .NET, ANSI C/C++, or Visual Basic using Measurement Studio.
- Multithreaded streaming technology for 1,000 times performance improvements.
- Automatic timing, triggering, and synchronization routing to make advanced applications easy.
- More than 3,000 free software downloads available at [ni.com/zone](http://ni.com/zone) to jump-start your project.
- Software configuration of all digital I/O features without hardware switches/jumpers.
- Single programming interface for analog input, analog output, digital I/O, and counters on hundreds of multifunction DAQ hardware devices. M Series devices are compatible with the following versions (or later) of NI application software – LabVIEW, LabWindows/CVI, or Measurement Studio versions 7.x; and LabVIEW SignalExpress 2.x.

Every National Instruments DAQ device includes a copy of LabVIEW SignalExpress LE data-logging software, so you can quickly acquire, analyze, and present data without programming. The NI-DAQmx Base driver software is provided for use with Linux, Mac OS X, Windows Mobile, and Windows CE operating systems.

### Recommended Accessories

The USB-6008 and USB-6009 have removable screw terminals for easy signal connectivity. For extra flexibility when handling multiple wiring configurations, NI offers the USB-600x Connectivity Kit, which includes two extra sets of screw terminals, extra labels, and a screwdriver. In addition, the USB-600x Prototyping Kit provides space for adding more circuitry to the inputs of the USB-6008 or USB-6009.

### NI USB DAQ for OEMs

Shorten your time to market by integrating world-class National Instruments OEM measurement products into your embedded system design. Board-only versions of NI USB DAQ devices are available for OEM applications, with competitive quantity pricing and available software customization. The NI OEM Elite Program offers free 30-day trial kits for qualified customers. Visit [ni.com/oem](http://ni.com/oem) for more information.

### Information for Student Ownership



To supplement simulation, measurement, and automation theory courses with practical experiments, NI has developed the USB-6008 and USB-6009 student kits, which include the LabVIEW Student Edition and a ready-to-run data logger application. These kits are exclusively for students, giving them a powerful, low-cost, hands-on learning tool. Visit [ni.com/academic](http://ni.com/academic) for more details.

**Information for OEM Customers**

For information on special configurations and pricing, call (800) 813 3693 (U.S. only) or visit [ni.com/oem](http://ni.com/oem). Go to the Ordering Information section for part numbers.

[Back to Top](#)

**Ordering Information**

For a complete list of accessories, visit the product page on [ni.com](http://ni.com).

| Products   | Part Number | Recommended Accessories  | Part Number |
|--|-------------|--------------------------|-------------|
| <b>NI USB-6008</b>   |             |                          |             |
| NI USB-6008 Student Kit with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable. Includes LabVIEW Student Edition. | 779320-22   | No accessories required. |             |
| NI USB-6008 OEM (no enclosure)   | 193132-02   | No accessories required. |             |
| NI USB-6008 with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable.   | 779051-01   | No accessories required. |             |
| <b>Prototyping Kit</b>   |             |                          |             |
| NI USB-600x Prototyping Kit  | 779511-01   | No accessories required. |             |
| <b>Connectivity Kit</b>  |             |                          |             |
| NI USB-600x Connectivity Kit   | 779371-01   | No accessories required. |             |
| <b>NI USB-6009</b>   |             |                          |             |
| NI USB-6009 OEM (no enclosure)   | 193132-01   | No accessories required. |             |
| NI USB-6009 with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable.   | 779026-01   | No accessories required. |             |
| NI USB-6009 Student Kit with NI-DAQmx software, LabVIEW SignalExpress LE, and a USB cable. Includes LabVIEW Student Edition. | 779321-22   | No accessories required. |             |

[Back to Top](#)

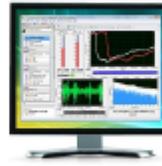
**Software Recommendations**

**NI LabVIEW Full Development System for Windows**



- Easy-to-use graphical development environment
- Tight integration with a wide range of measurement hardware
- Rapid user interface development for displaying live data
- Extensive signal processing, analysis, and math functionality
- Multiple communication options (TCP/IP, UDP, serial, and more)
- Support for Windows XP/Vista/7 (32-bit) and Windows Vista/7 (64-bit)

**NI LabVIEW SignalExpress for Windows**



- Quickly configure projects without programming
- Control over 400 PC-based and stand-alone instruments
- Log data from more than 250 data acquisition devices
- Perform basic signal processing, analysis, and file I/O
- Scale your application with automatic LabVIEW code generation
- Create custom reports or easily export data to LabVIEW, DIAdem or Microsoft Excel

**NI LabWindows™/CVI for Windows**

- Real-time advanced 2D graphs and charts with support for Windows Vista/XP/2000
- Complete hardware compatibility with I/O

**NI Measurement Studio Standard Edition**

- Support for Microsoft Visual Studio .NET 2010/2008/2005
- Customizable Windows Forms controls for



### Anexo 4: Especificaciones técnicas de las válvulas de activación

The VX+ series will be revised shortly.



For details about certified products conforming to international standards, visit us at [www.smcworld.com](http://www.smcworld.com).

1

## Pilot Operated 2 Port Solenoid Valve For Air, Gas, Water and Oil

# Series VXD21/22/23



N.C.



N.O.

- **Wide variations of combination.**  
Able to control a wide variety of fluids.

Valve can be matched to a particular application through selection of body material (Brass/BC6 or Stainless steel), seal material (NBR, EPDM or FKM) and solenoid coil (Class B or H)

- **Easy to disassemble and reassemble in a short time.**

- VC□
- VOW
- VQ
- VX2
- VX□**
- VX3
- VXA
- VN□
- LVC
- LVA
- LVH
- LVD
- LVQ
- LQ
- LVN
- TV  
TIL
- PA
- PAX
- PB

#### Variations

**Valve**

Normally closed (N.C.)

Normally open (N.O.)

**Solenoid coil**

Coil: Class B, Class H

**Rated voltage**

AC  
Standard — 100 V, 200 V  
Option — 48 V, 110 V, 220 V, 240 V

DC  
Standard — 24 V  
Option — 12 V

**Material**

Body — Brass/BC6, Stainless steel  
Seal — NBR, EPDM, FKM

**Electrical entry**

- Grommet
- Conduit
- DIN terminal
- Conduit terminal

**Model**

| Model   | Port size        | Orifice size (mmø) |
|---------|------------------|--------------------|
| VXD2130 | Rc 1/8, 3/8, 1/2 | 10                 |
| VXD214  | Rc 3/8, 1/2      | 15                 |
| VXD215  | Rc 3/4           | 20                 |
| VXD226  | Rc 1             | 25                 |
| VXD227  | 32A              | 35                 |
| VXD238  | 40A              | 40                 |
| VXD239  | 50A              | 50                 |

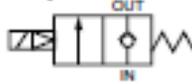


# Series VXD21/22/23

The VX+ series will be revised shortly.

## Normally Closed (N.C.)

JIS Symbol



### Fluid

| Standard specifications | Option <sup>1)</sup>                   | Made to Order <sup>2)</sup>                      |
|-------------------------|--|--|
| Water (Standard)        | High temperature water... (D, E, N, P) | Air ..... X44                                    |
| Turbine oil             | High temperature oil ..... (D, N)      | Vacuum (up to 1.3 x 10 <sup>5</sup> Pa)..... X44 |



Note 1) Refer to page 17-3-9 "Applicable Fluids Check List" for details of special fluids outside of the standard options and specifications.  
 Note 2) Please contact SMC for details.

### Model/Valve Specifications «Normally Closed»

| Lead time | Orifice size (mm) | Model      | Max. operating pressure differential (MPa) | Max. operating pressure differential (MPa) |     |     |     |     |     |     |     |  |                      | Max. system pressure (MPa) | Weight (g) |                            |   |
|-----------|-------------------|------------|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|----------------------|----------------------------|------------|----------------------------|---|
|           |                   |            |  | Water                                      |     |     | Air |     |     | Oil |     |  | Flow characteristics |                            |            |                            |   |
|           |                   |            |  | AC   | DC  | AC  | DC  | AC  | DC  | AC  | DC  | Av x 10 <sup>4</sup> (m <sup>3</sup> ) | Cv converted         |                            |            | C (dm <sup>3</sup> /s·bar) | b |
| 1/4       | 10                | VXD2130-02 | 0.02                                       | 0.7  | 0.5 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 46  | 1.9 | 8.5                                    | 0.35                 | 2.0                        | 1.5        | 420                        |   |
|           | 10                | VXD2130-03 | 0.02                                       | 0.7  | 0.5 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 58  | 2.4 | 9.2                                    | 0.35                 | 2.4                        |            | 420                        |   |
| 3/8       | 15                | VXD2140-03 | 0.02                                       | 1.0  | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 110 | 4.5 | 18                                     | 0.35                 | 5.0                        | 1.5        | 670                        |   |
|           | 15                | VXD2130-04 | 0.02                                       | 0.7  | 0.5 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 58  | 2.4 | 9.2                                    | 0.35                 | 2.4                        |            | 500                        |   |
| 1/2       | 15                | VXD2140-04 | 0.02                                       | 1.0  | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 130 | 5.5 | 20                                     | 0.35                 | 5.5                        | 1.5        | 670                        |   |
|           | 20                | VXD2150-06 | 0.02                                       | 1.0  | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 230 | 9.5 | 38                                     | 0.30                 | 9.5                        |            | 1150                       |   |

| Lead time | Orifice size (mm) | Model      | Max. operating pressure differential (MPa) | Max. operating pressure differential (MPa) |     |     |     |     |     |      |    |  |                      | Max. system pressure (MPa) | Weight (g) |                            |   |
|-----------|-------------------|------------|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|--|----------------------|----------------------------|------------|----------------------------|---|
|           |                   |            |  | Water                                      |     |     | Air |     |     | Oil  |    |  | Flow characteristics |                            |            |                            |   |
|           |                   |            |  | AC   | DC  | AC  | DC  | AC  | DC  | AC   | DC | Av x 10 <sup>4</sup> (m <sup>3</sup> ) | Cv converted         |                            |            | C (dm <sup>3</sup> /s·bar) | b |
| 1         | 25                | VXD2260-10 | 0.02                                       | 1.0  | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 310  | 13 | 225                                    | —                    | —                          | 1.5        | 1950                       |   |
| —         | 32A               | VXD2270-32 | 0.03                                       | 1.0  | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 550  | 23 | 415                                    | —                    | —                          |            | 1400                       |   |
| —         | 40A               | VXD2380-40 | 0.03                                       | 1.0  | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 740  | 31 | 560                                    | —                    | —                          |            | 1600                       |   |
| —         | 50A               | VXD2390-50 | 0.03                                       | 1.0  | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 1200 | 49 | 680                                    | —                    | —                          |            | 1800                       |   |
| —         | —                 | —          | —  | —  | —   | —   | —   | —   | —   | —    | —  | —                                      | —                    | —                          |            | —                          |   |

Note) Weight of grommet type. Add 10 g for conduit type, 30 g for DIN terminal type, 60 g for conduit terminal type respectively.  
 \* Refer to "Glossary" on page 17-3-15 for details of max. operating pressure differential and max. system pressure.

### Solenoid Specifications

| Model | Power source | Frequency (Hz) | Apparent power (VA) |         | Power consumption (W) (Holding) | Temperature rise (°C) (Rated voltage) |
|-------|--------------|----------------|---------------------|---------|---------------------------------|---------------------------------------|
|       |              |                | Inrush              | Holding |                                 |                                       |
| VXD21 | AC           | 50             | 20 (32)             | 11      | 4.5                             | 45                                    |
|       |              | 60             | 17 (28)             | 7       | 3.2                             | 35                                    |
| VXD22 | AC           | 50             | 40                  | 18      | 7.5                             | 60                                    |
|       |              | 60             | 35                  | 12      | 6                               | 50                                    |
| VXD23 | AC           | 50             | 50                  | 21      | 11                              | 65                                    |
|       |              | 60             | 45                  | 17      | 9.5                             | 60                                    |
| —     | DC           | —              | —                   | —       | 11.5                            | 65                                    |

Note) \* The return voltage is 20% or more of the rated voltage for AC and 2% or more for DC.  
 \* The allowable voltage fluctuation rate is ±10% of the rated voltage value for both AC and DC.  
 \* When the ambient temperature is 20°C ± 5°C and rated voltage is applied.  
 \* Changing coils from AC to DC and vice versa is impossible, because of different core shapes.  
 VXD21(j), 22(j), 23(j) are possible to exchange coil from AC to DC, but impossible from DC to AC.  
 (Hum sound may generate because of no shading coil for DC.)  
 \* The value of the apparent power volt amperes in parentheses is that of VXD2130.

### Operating Fluid and Ambient Temperature

| Temperature conditions | Power source | Operating fluid temperature (°C) |                   |                  |   |                             | Ambient temperature (°C) |
|------------------------|--------------|----------------------------------|-------------------|------------------|---|-----------------------------|--------------------------|
|                        |              | Water (Standard)                 | Air (Standard)    | Oil (Standard)   | High temperature water <sup>1)</sup> (D, E, N, P) | High temperature oil (D, N) |                          |
| Maximum                | AC           | 60                               | 60                | 60               | 90 <sup>2)</sup>                                  | 100 <sup>3)</sup>           | 60                       |
|                        | DC           | 40                               | 60                | 40               | —   | —                           | 40                       |
| Minimum                | AC/DC        | 1                                | -10 <sup>4)</sup> | -5 <sup>4)</sup> | —   | —                           | -10                      |

Note 1) Dew point: -10°C or less  
 Note 2) 50 cSt or less  
 Note 3) "D", "E", "N", "P" etc. in parentheses are option symbols.  
 Note 4) 32A to 50A are 80°C.

