

UNIVERSIDAD LA SALLE

CARRERA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS



DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN ALGORITMOS DE LÓGICA DIFUSA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE UN DESHIDRATADOR DE FRUTAS

Por

Sofia Jane Aliaga Slinkina

Tutor: Dr. Raúl Aliaga

Tesis de Licenciatura presentada para la obtención del Grado de
Licenciatura en Ingeniería Sistemas

La Paz – Bolivia

2018

DEDICATORIA

A Dios por darme todo en esta vida. A mis padres, Zenon y Nina, quienes me apoyaron incondicionalmente en todo momento haciendo posible esta etapa de mi vida, me orientaron siempre por el camino del bien ayudándome a ser una mejor persona; espero de todo corazón llenarlos de orgullo, todo esto es posible por ustedes. A mi hermanita Diana que llena mi vida de alegría, me brinda cariño y me acompaña en todo momento. Todas las palabras no alcanzarían para agradecerles todo su apoyo, consejos y sobre todo tanto amor que me brindan.

Finalmente, hago participe a familiares y amigos que de una u otra forma me brindaron apoyo e influyeron en la culminación de este logro.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad La Salle, en especial a la carrera de ingeniería de sistemas, por brindarme la oportunidad de obtener una profesión y ser alguien útil para la sociedad.

Al Dr. Raúl Aliaga por compartir sus conocimientos, asesorarme y ayudarme en el desarrollo del presente trabajo.

A todos mis docentes de la Universidad La Salle por su valioso aporte en mi formación como profesional y sobre todo como persona.

A mis padres por el gran apoyo incondicional y económico que me brindaron y hacerme saber que siempre cuento con ellos.

Finalmente, a todas aquellas personas que me apoyaron moralmente, deseándome lo mejor, compartiendo experiencias y conocimientos prácticos, muchísimas gracias por el apoyo.

TABLA DE CONTENIDOS

I.	MARCO REFERENCIAL	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Antecedentes	1
1.3.	Planteamiento del Problema	2
1.4.	Formulación del Problema	3
1.5.	Objetivos	3
1.5.1.	Objetivos Específicos	3
1.6.	Justificaciones	3
1.6.1.	Justificación Científica	3
1.6.2.	Justificación Económica	3
1.6.3.	Justificación Social	4
1.6.4.	Justificación Tecnológica	4
1.7.	Límites y Alcances	5
1.7.1.	Límites	5
1.7.2.	Alcances	5
1.8.	Métodos y Herramientas	5
1.9.	HIPOTESIS	6
1.9.1.	Identificación de variables	6
II.	MARCO TEORICO	7
2.1.	Introducción	7
2.2.	Sistemas de control	7
2.2.1.	Sistema de control de lazo abierto	8
2.2.2.	Sistema de control de lazo cerrado	9
2.2.3.	Sistemas de control on/off	10
2.2.4.	Sistema de control PID	11

2.3.	Lógica difusa	13
2.3.1.	Sistemas difusos	14
2.3.2.	Variables lingüísticas	17
2.3.3.	Funciones de pertenencia	17
2.3.4.	Sistema difuso del tipo Mamdani	18
2.3.5.	Sistema difuso del tipo Takagi-Sugeno-Kang	22
2.4.	Comparación entre Controladores: Difuso y PID	26
2.4.1.	Simulación de un controlador PID y un controlador Fuzzy	26
2.5.	Modelo de Prototipo	35
III.	MARCO PRACTICO	37
3.1.	Introducción	37
3.2.	Metodología empleada	38
3.3.	Sistema de adquisición de datos	39
3.3.1.	Modulación por ancho de pulso, PWM	47
3.4.	Etapas experimentales	48
3.4.1.	Diseño del controlador difuso	53
3.4.2.	Funciones de membresía	53
3.5.	Resultados	57
3.6.	Comprobación de la hipótesis	72
3.7.	Conclusiones y recomendaciones	73
IV.	Referencias	75

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Sistema de control lazo abierto.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2: Sistema de control lazo cerrado</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3: Sistema de control on/off.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4: Sistema de control PID</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5: Sistema de lazo cerrado con control PID.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6: Secuencia de bloques para un sistema difuso.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7: Diseño convencional de control vs. Diseño basado en lógica difusa.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8: Función de pertenencia trapezoidal</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9: Sistema difuso de tipo Mamdani.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10: Implementación de un mecanismo de control en un deshidratador</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11: Consecuente reglas TSK.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 12: Sistema difuso tipo Takagi-Sugeno-Kang.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13: Reglas modelo Takagi-Sugeno-Kang.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14: Lazos de control, con controlador PID-difuso, PID clásico y Difuso.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15: Diagrama de la simulación de controladores PID</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16: Sistema en lazo cerrado haciendo uso del controlador difuso.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17: Definición de conjuntos para la variable error</i>	<i>28</i>
<i>Figura 18: Definición de conjuntos para la variable Cambio en el Error</i>	<i>29</i>
<i>Figura 19: Definición de conjuntos para la variable Control</i>	<i>29</i>
<i>Figura 20: Comparación entre PID y Fuzzy.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 21: Comparación entre PID y Fuzzy ante una perturbación</i>	<i>30</i>
<i>Figura 22: Definición de conjuntos para la variable Error</i>	<i>31</i>
<i>Figura 23: Definición de conjuntos de la variable Control.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 24: Comparación entre PID y Fuzzy.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 25: Comparación entre PID y Fuzzy con una perturbación</i>	<i>33</i>
<i>Figura 26: Comparación entre PID y Fuzzy para 2 planteamientos de lógica difusa</i>	<i>34</i>

<i>Figura 27: Comparación entre PID y Fuzzy para 2 planteamientos de lógica difusa</i>	<i>35</i>
<i>Figura 28: Sensor de temperatura YL-69.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 29: Sensor de temperatura lm35.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 30: Placa controladora arduino UNO</i>	<i>42</i>
<i>Figura 31: Modulo Micro SD.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 32: Modulo RCT</i>	<i>43</i>
<i>Figura 33: Modulo pantalla TFT</i>	<i>44</i>
<i>Figura 34: Relay</i>	<i>46</i>
<i>Figura 35: Diseño de la planta deshidratadora</i>	<i>46</i>
<i>Figura 36: Pulso de forma cuadrada</i>	<i>48</i>
<i>Figura 37: Mapa de reglas para la velocidad del ventilador para el Plátano</i>	<i>49</i>
<i>Figura 38: Mapa de reglas de la velocidad del ventilador para la Pera.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 39: Mapa de reglas de la velocidad del ventilador para la Manzana</i>	<i>50</i>
<i>Figura 40: Curvas experimentales de secado a 30 grados centígrados de temperatura...51</i>	
<i>Figura 41: Curvas experimentales de secado a 50 grados centígrados de temperatura...52</i>	
<i>Figura 42: Función de membresía para la temperatura</i>	<i>53</i>
<i>Figura 43: Función de membresía para la humedad.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 44: Mapa de reglas para el controlador difuso.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 45: Interfaz visual del sistema de control.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 46: Grafico de tallo y hojas para los métodos de deshidratación.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 47: Figuras Q-Q normales.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 48: Diagramas de cajas para ambos métodos.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 49: Datos ajustados a la distribución normal. LÓGICA DIFUSA</i>	<i>63</i>
<i>Figura 50: Datos ajustados a la distribución normal. ON-OFF.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 51: Curva de deshidratación de control Difuso vs ON/OFF</i>	<i>68</i>
<i>Figura 52: Curva de deshidratación de la manzana (LOGICA DIFUSA)</i>	<i>71</i>
<i>Figura 53: Curva de deshidratación de la manzana (ON/OFF).....</i>	<i>71</i>

<i>Figura 54: Proceso del deshidratado y elección de la fruta.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 55: Plátano lavado y separado.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 56: Plátano cortado.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 57: Proceso de deshidratado on / off.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 58: Curva de secado muestra 1</i>	<i>92</i>
<i>Figura 59: Curva de secado muestra 2</i>	<i>94</i>
<i>Figura 60: Curva de secado muestra 3</i>	<i>94</i>
<i>Figura 61: Curva de humedad vs tiempo.....</i>	<i>98</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Datos de humedad del plátano deshidratada según el método Lógica Difusa .</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 2: Datos de humedad del plátano deshidratada por el método ON-OFF</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 3: Variables de elección de pruebas estadísticas</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 4: Prueba paramétrica elegida para comparación de los resultados.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 5: Estadígrafos de los datos de humedad para comparación de los resultados....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 6: Ajuste de Kolgomorov –Smirnov para nuestros productos finales.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 7: Normalidad de la humedad.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 8: Prueba de muestras independientes.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 9: Igualdad de varianza de la humedad.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 10: Prueba t-student</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 11: Comparación de tiempos de deshidratado</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 12: Costos de construcción.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 13: Resultados muestra 1.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 14: Resultados muestra 2.....</i>	<i>93</i>

INDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Ecuación de un sistema de control PID; K_p, K_i, y K_d.....</i>	<i>11</i>
<i>Ecuación 2: Función de transferencia.....</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 3: Función de membresía para la temperatura</i>	<i>54</i>
<i>Ecuación 4: Función de membresía para la humedad</i>	<i>54</i>

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se desarrolla un sistema de control que hace uso de los algoritmos de lógica difusa para un deshidratador de frutas, contribuyendo en el área social para los microempresarios y orientado al sector evolutivo industrial.

Se desarrollo un sistema de control; en consecuencia, al corto tiempo de vida que poseen las frutas, utilizando el método científico experimental como base del desarrollo del trabajo. Como resultado, se identificó que la humedad de cada producto, depende fundamentalmente de la temperatura a la cual se expone cada tipo de fruta estudiada, en nuestro caso particular, las pruebas han sido realizadas con plátanos, manzanas y peras; el estudio ha mostrado que la óptima deshidratación de las frutas, ocurre cuando su humedad alcanza valores menores al 20%; además, el tiempo transcurrido en el proceso de deshidratación depende del espesor de corte de las frutas.

I. MARCO REFERENCIAL

1.1. Introducción

Desde tiempos antiguos y hasta nuestros días el deshidratado de alimentos ha sido una práctica habitual de conservación. Nuestro país, gracias a sus enormes recursos naturales tiene en su población a personas que viven del deshidratado de carnes (charque), frutas (“kisa” de manzana, durazno y otros), cereales, etc., realizado por técnicas convencionales y ancestrales. Con ayuda de los avances tecnológicos estos procesos pueden optimizarse, es decir, se puede llegar a los mismos resultados y mejorarlos en un lapso de tiempo más corto. El mismo proceso de conservación de alimentos requiere fuentes de energía calorífica, que, en algunas ocasiones, resulta muy costoso (exceptuando la del sol), también se utilizan aditivos y conservantes para almacenar alimentos en buen estado por un largo periodo, por otro lado, los equipos que se emplean para la deshidratación resultan ser costosos y por lo general usados en industrias especializadas dedicadas a este ámbito de producción.

1.2. Antecedentes

Los procesos de automatización consideran prescindir de toda intervención manual de operador, de tal forma que se eliminan los errores debido al factor humano y para ello se construyen sistemas de control regulados por dispositivos electrónicos.

Después de una búsqueda de información referente a sistemas automatizados inteligentes se encontró la siguiente bibliografía:

- Saavedra Jorge; Puente Luis; Gonzalez Guillermo; Camousseigt Ivan; *Automatización de un Secador Convectivo de Aire Caliente para fines de Docencia en Ingeniería de Alimentos*, 2008, Chile.
- Linares Aguirre, Cecilia Carolina; Turcios Maquez, Abraham Orlando; *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE CLIMATIZADO*

EVAPORATIVO AUTOMATIZADO PARA FINES DIDÁCTICOS; 2017; Salvador.

El uso de los controladores difusos se observa en los siguientes trabajos:

- Palacio Gómez C.; García Sucerquia J.; Control de Temperatura Utilizando Lógica Difusa; 2010; Colombia.
- Fernández, Julio C. Ramos; Vera, Marco A. Márquez; Natale, Luis F. Cerecero; Lafont, F.; Balmat, J. F; *Modelado difuso Takagi-Sugeno para sintonizar un controlador por calefacción en un invernadero*; 2015.

Evidentemente, todos los trabajos anteriores aportan desde diferentes puntos de vista a los procesos de investigación en el área de la tecnología y la innovación y fundamentalmente son aplicativos, más, no tienen el aspecto social que se tendría al utilizar las ciencias y la tecnología, tal como, la aplicación de la ciencia para generar recursos económicos, en este caso, generando fuentes de empleo propios.

1.3. Planteamiento del Problema

Bolivia tiene una fortaleza en sus fuentes de recursos naturales; sin embargo, la población en general presenta aspectos deficitarios en el orden alimenticio (Bolivia entre los países con mayor desnutrición, 2011) (En Bolivia baja la desnutrición, pero alertan por la mala alimentación, 2017) (El boliviano consume más masas, frituras y bebidas ultraprocesadas, 2015), en especial en el consumo de frutas, las cuales se producen en determinadas temporadas y no son perenes en el tiempo.

Las frutas que no son consumidas a tiempo, se echan a perder, para evitar éstas pérdidas se procede en algunos casos, al proceso de deshidratado, donde se obtiene nuevos productos (harinas, esencias y fruta seca) generando nuevas utilidades.

1.4. Formulación del Problema

¿Un sistema inteligente de deshidratación automatizado ayudaría a deshidratar frutas para una mejor alimentación y producción alimentaria?

1.5. Objetivos

Desarrollar un sistema de control automatizado con algoritmos de lógica difusa para el deshidratado de frutas.

1.5.1. Objetivos Específicos

- Analizar los procesos termodinámicos que intervienen en el deshidratado de frutas.
- Determinar la curva de deshidratación de las frutas secadas.
- Aplicar los algoritmos de lógica difusa, basada en el modelo de Takagi-Sugeno-Kang, relacionando las variables termodinámicas y las reglas de inferencia.
- Construir el prototipo del deshidratador.
- Estudiar la mejor alternativa de control para un deshidratador de frutas entre lógica difusa y On/Off (métodos convencionales).
- Validar los resultados mediante una certificación externa.

1.6. Justificaciones

1.6.1. Justificación Científica

El presente trabajo de investigación se sustenta científicamente debido a la aplicación de la teoría de lógica difusa y sus algoritmos para resolver problemas aplicados a la ingeniería de procesos de alimentos.

1.6.2. Justificación Económica

El presente trabajo se justifica económicamente debido a que los productores de frutas que se sientan perjudicados cuando por alguna razón en el país se

presentan problemas de carácter social (especialmente bloqueos de rutas carreteras impidiendo su libre transporte) y consecuentemente los productos listos para la venta no llegan a su destino final del consumidor, por lo cual se llega a la descomposición, ocasionando pérdidas al productor.

1.6.3. Justificación Social

Se justifica socialmente, debido a que los productores promoverán mayor cantidad de frutas las cuales podrán ser convertidas a productos derivados tales como harina de plátano, pasas, durazno seco (“kisas”, “mokonchinche”) y otros.

Esta forma de conservación de alimentos permitirá que la población pueda consumir frutas deshidratada conservando sus propiedades alimentarias; además, el equipo será de utilidad para aquellas comunidades que pretendan dedicarse al ámbito del deshidratado de frutas.

1.6.4. Justificación Tecnológica

Hasta hace unos decenios, el desarrollo de la ciencia y tecnología orientado al sector industrial, tenía sus efectos en el crecimiento mayúsculo socioeconómico de un determinado país. Estos adelantos científico-tecnológicos generaban programas económicos de un estado siempre orientado al sector evolutivo industrial (Science-Based Economic Development, 1996).

En nuestro país, en los últimos años se ha tenido un gobierno que promulga el “vivir bien” en la que se manifiesta el uso de la ciencia con aplicaciones tecnológicas. Estas consideraciones se pueden plasmar en la Constitución Política del Estado, en la Parte I, en la Sección IV, Artículo 103 párrafo III donde se describe:

III. El Estado, las universidades, las empresas productivas y de servicio públicas y privadas, y las naciones y pueblos indígena originario campesinos, desarrollarán y coordinarán procesos de investigación, innovación, promoción, divulgación, aplicación y transferencia de ciencia y tecnología para fortalecer la base productiva e impulsar el desarrollo integral de la sociedad, de acuerdo con la ley (BOLIVIA, 2009).

1.7. Límites y Alcances

1.7.1. Límites

El trabajo de investigación a realizar, considerará únicamente dos variables termodinámicas que son la humedad del producto y la temperatura dentro de la cámara.

El entorno de prueba del presente trabajo, se enmarca en la región del altiplano boliviano, donde se realizará el monitoreo de las variables termodinámicas.

1.7.2. Alcances

La presente investigación realizará el trabajo experimental referente a las mediciones de las curvas de deshidratación de las frutas, construyendo el prototipo, el cual incorpora dispositivos electrónicos fáciles de encontrar en el mercado local, cuyos costos son accesibles, utilizando un algoritmo de control difuso diseñado bajo el modelo de Takagi-Sugeno-Kang para las variables humedad y temperatura como entrada y la velocidad del flujo de aire como salida.

1.8. Métodos y Herramientas

Para la solución del problema se hace uso del método científico, que consiste en las siguientes etapas:

Observación: En esta etapa, se realiza el análisis sobre el problema a considerar, en este caso, el deshidratado de los alimentos.

Planteamiento de una hipótesis: Es la explicación que hacemos del fenómeno observado. Puede haber varias hipótesis para un mismo acontecimiento y éstas no son tomadas como verdaderas, sino que, deben ser sometidas a experimentos posteriores para confirmar su veracidad.

Experimentación: Esta fase del método científico consiste en probar - experimentar- para verificar la validez de las hipótesis planteadas o descartarlas, parcialmente o en su totalidad.

Teoría: Se hacen teorías de aquellas hipótesis con más probabilidad de confirmarse como ciertas.

Ley: La hipótesis se convierte en ley cuando queda demostrada mediante la experimentación, es decir, verificamos la hipótesis

En cuanto a las herramientas que se utilizan en el desarrollo e implementación, estos son: el uso de elementos tanto del software (IDE del Arduino, programación C, java, método prototipo y uso plataforma Processing) como del hardware (dispositivo Arduino, sistemas electrónicos y sensores), para el control y automatización del deshidratador en donde se tiene un registro automatizado de datos en el proceso de secado; además, se presenta una interfaz visual por parte del usuario y una detección y transmisión de información, así como el monitoreo en tiempo real.

1.9. HIPOTESIS

Un sistema de control automatizado, basado en algoritmos de lógica difusa, mejorará el proceso de deshidratación por convección forzada.

1.9.1. Identificación de variables

Variable dependiente: Un sistema de control automatizado, basado en algoritmos de lógica difusa.

Variable independiente: El proceso de secado por convección forzada.

Variable moderante: Mejora.

Se entiende por mejora:

- Optimización del tiempo.
- Mayor cantidad de producto no alterados.

II. MARCO TEORICO

2.1. Introducción

En el presente capítulo, se exponen los conceptos básicos de los sistemas de control, los fundamentos teóricos de la lógica difusa, presentando la lógica difusa del tipo Mamdani, como una de las primeras y clásica para la enseñanza, ya que introduce a los conceptos de lo difuso, y a continuación se muestra el modelo propuesto por Takagi-Sugeno-Kang, que tiene una diferencia con el de Mamdani, en el proceso de defusificación; además, este capítulo, se complementa con la metodología empleada a lo largo del trabajo de investigación.

2.2. Sistemas de control

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados teóricamente verdaderos. Por lo general, se usan sistemas de control en procesos de producción para controlar equipos o máquinas.

En los sistemas de control, es necesario, comprender algunos términos básicos, usuales en el uso de los sistemas de control:

Planta: se designa como planta a cualquier objeto físico que ha de ser controlado (como horno, reactor químico o un vehículo espacial). En forma más general, la planta es la instalación de un sistema destinada a realizar un proceso determinado.

Proceso: es una operación progresivamente continua, caracterizada por una serie de cambios graduales con tendencia a producir un resultado final de un objetivo determinado. En decir, cualquier operación que se vaya a controlar.

Sistema: es el conjunto de elementos interconectados y organizados en iteración dinámica operando con un objetivo determinado.

Entrada: se entiende como entrada o estímulo una señal de excitación que se aplica a un sistema de control. Las hay de referencia y de perturbación.

La referencia es aquella que se aplica a voluntad del usuario con el fin de encontrar una respuesta deseada.

La perturbación es una señal de entrada no deseada y no previsible que afecta adversamente el valor de la salida del sistema, éstas pueden tener origen interno (generada por la misma planta) o externo.

Salida: se define como la respuesta de un sistema a un estímulo dado (variable controlada).

Control: desde el punto de vista de ingeniería se define como la regulación en forma predeterminada de la energía suministrada al sistema, buscando un comportamiento deseado del mismo.

Realimentación: es una propiedad de los sistemas que permiten que la salida del sistema o cualquier variable del mismo sea comparada con la entrada al sistema o con cualquier componente del sistema, de tal manera que pueda establecerse la acción de control apropiada entre la entrada y la salida.

Existen dos clases comunes de sistemas de control, sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado.

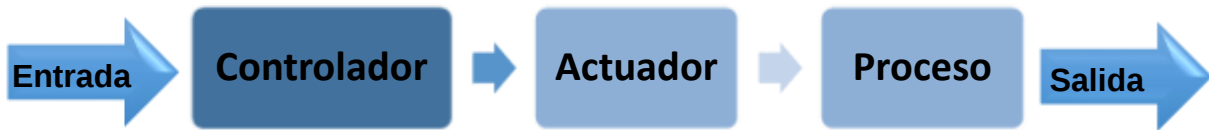
2.2.1. Sistema de control de lazo abierto

Es aquel sistema en que solo actúa el proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada, pero basada en la primera (Figura 1). Esto significa que no hay retroalimentación hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control. Es decir, la señal de salida no se convierte en señal de entrada para el controlador. Estos sistemas se caracterizan por:

- Ser sencillos y de fácil concepto.
- Nada asegura su estabilidad ante una perturbación.
- La salida no se compara con la entrada.

- Ser afectado por las perturbaciones. Estas pueden ser tangibles o intangibles.
- La precisión depende de la previa calibración del sistema.

Figura 1: Sistema de control lazo abierto



Fuente: Ogata K. 2006

2.2.2. Sistema de control de lazo cerrado

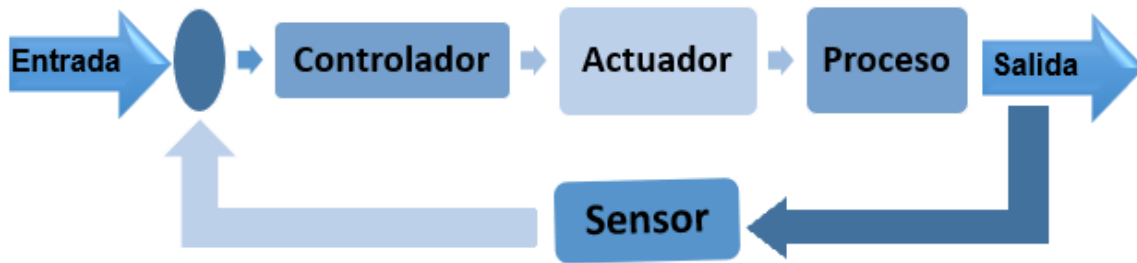
Son los sistemas en los que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia (Figura 2). El control en lazo cerrado es imprescindible cuando se da alguna de las siguientes circunstancias:

- Cuando un proceso no es posible de regular por el hombre.
- Una producción a gran escala que exige grandes instalaciones y el hombre no es capaz de manejar.
- Vigilar un proceso es especialmente difícil en algunos casos y requiere una atención que el hombre puede perder fácilmente por cansancio o despiste, con los consiguientes riesgos que ello pueda ocasionar al trabajador y al proceso.

Sus características son:

- Ser complejos, pero amplios en cantidad de parámetros.
- La salida se compara con la entrada y le afecta para el control del sistema.
- Su propiedad de retroalimentación.
- Ser más estable a perturbaciones y variaciones internas.

Figura 2: Sistema de control lazo cerrado

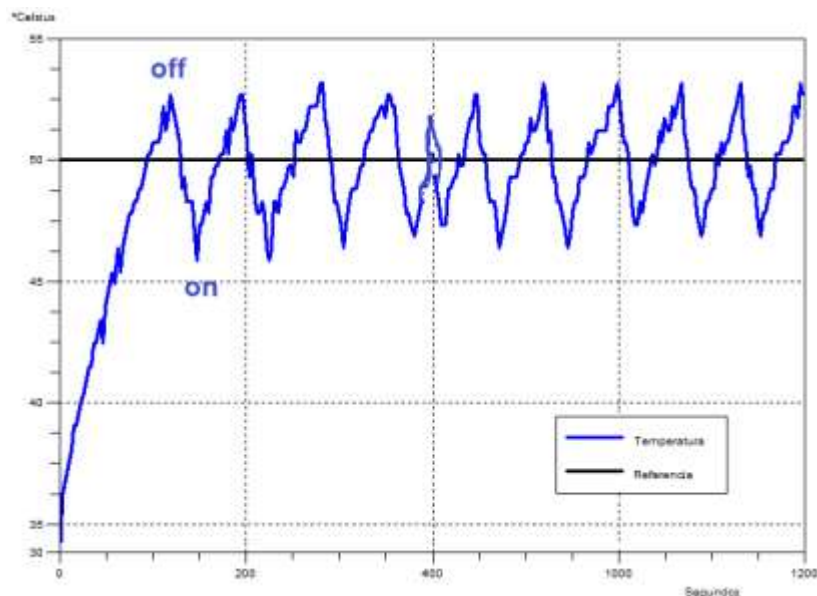


Fuente: Ogata K. 2006

2.2.3. Sistemas de control on/off

Un controlador on/off, es un controlador de encendido y apagado, es la forma más sencilla de un dispositivo de control. La salida del dispositivo está, ya sea, encendida o apagada, sin estado intermedio. Este sistema conmuta la salida, sólo cuando la variable de entrada corta el punto de ajuste (set-point). Para su regulación, la salida debe estar encendida cuando la entrada, está por debajo del punto de ajuste, y apagada, en caso contrario. Todo este proceso se mantiene en un ciclo continuo e irá de debajo del punto de ajuste hacia arriba, y volverá a estar debajo (Figura 3).

Figura 3: Sistema de control on/off



Fuente: Dorf R. 2001

2.2.4. Sistema de control PID

El control PID es un mecanismo de control, de tres módulos, que a través de un lazo de retroalimentación permite regular variables de un proceso en general. El PID calcula la diferencia entre la variable real y una variable deseada. El algoritmo de control incluye tres parámetros fundamentales: Ganancia proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D). El algoritmo del PID es la siguiente:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Ecuación 1: Ecuación de un sistema de control PID; K_p , K_i , y K_d

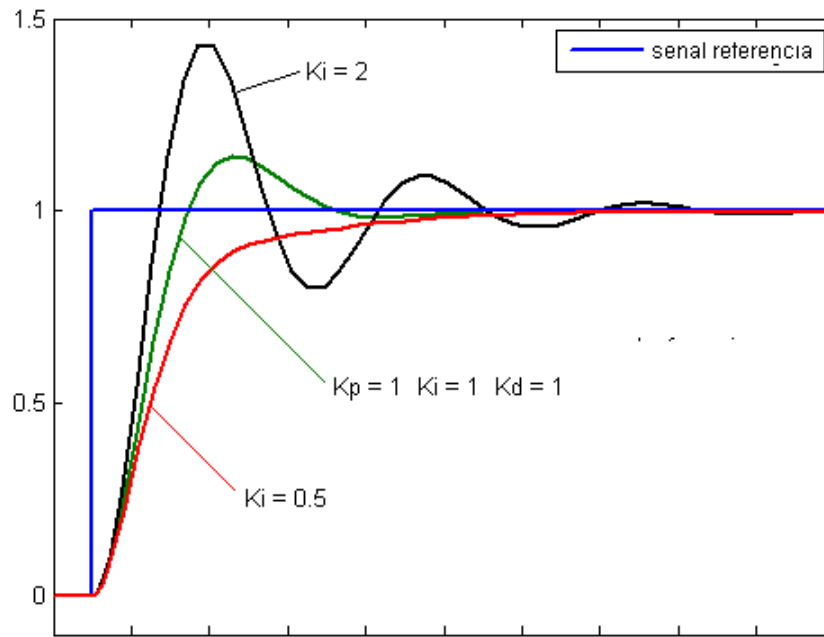
Como se puede advertir, existe una parte de la ecuación proporcional, integral y diferencial. Las constantes K_p , K_i , y K_d son usadas para colocar el signo y la contribución de la ganancia de cada una de las partes de esta ecuación; $e(t)$, es su “error” proporcional. La variable t corresponde al tiempo de corriente en nuestro sistema y τ es simplemente una variable de integración.

El parámetro P mide la diferencia entre el valor actual y el punto de ajuste (en porcentaje) y aplica el cambio.

El parámetro I se refiere al tiempo que se toma para llevar a cabo acción correctiva. Mientras el valor sea más pequeño, el ajuste es más rápido, pero puede causar inestabilidad en el sistema (oscilaciones, vibración, etc.).

El parámetro D emite una acción predictiva, es decir, prevé el error e inicia una acción oportuna. Responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande (Figura 4).

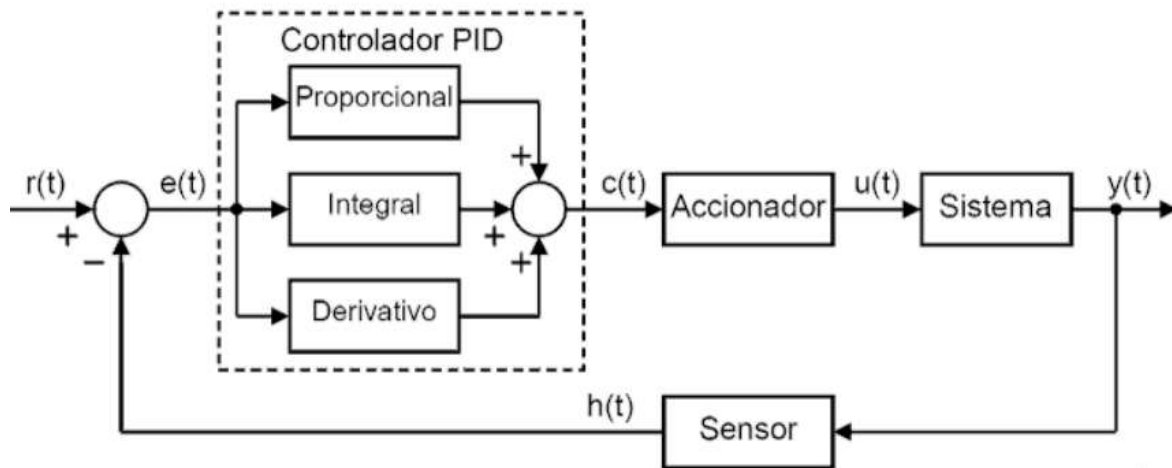
Figura 4: Sistema de control PID



Fuente: Ogata K. 2006

El principal inconveniente en los sistemas de control PID, es el aspecto teórico, ya que se requiere desarrollar un modelo matemático que describa la dinámica del sistema, estudiar la respuesta del sistema ante diferentes formas de excitación. Además, el proceso se facilita en sistemas lineales, de una entrada y una salida, (SISO = Single Input, Single Output), es decir, sistemas sencillos. Sin embargo, en la realidad es probable que se presenten sistemas NO lineales y sistemas MIMO (Multiple Inputs, Multiple Outputs). Obviamente el nivel de dificultad para modelar matemáticamente los sistemas anteriores es mucho mayor a los sistemas SISO. A continuación, se muestra la Figura 5 donde se ejecuta el control PID.

Figura 5: Sistema de lazo cerrado con control PID



Fuente: Ogata K. 2006

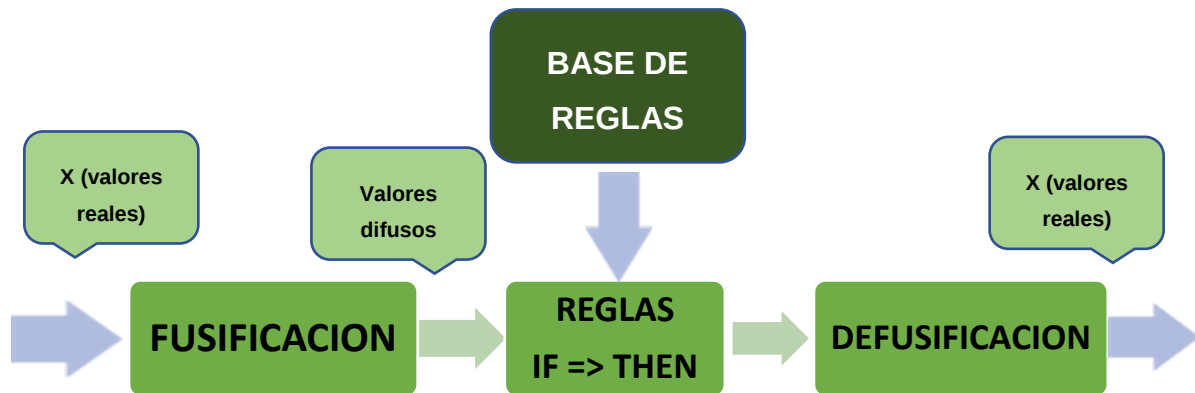
2.3. Lógica difusa

Se empieza a hablar de la lógica difusa por primera vez, a mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley, el nombre se adopta debido al principio de incompatibilidad, es decir que, cuando la complejidad del sistema aumenta, entonces la precisión para crear instrucciones que regulen su comportamiento disminuye. De acuerdo a Zadeh L. (Ross T. 2010), los términos de precisión y significado son términos excluyentes, de tal forma que era necesario introducir un concepto nuevo, denominado “conjunto difuso” o Fuzzy Set (en inglés), bajo este concepto reside la idea de que los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas. La lógica difusa permite representar el conocimiento común (mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo), en un lenguaje matemático, mediante la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellas, además, esta teoría, permite trabajar, tanto con datos numéricos, así como con términos lingüísticos; los términos lingüísticos son inherentemente menos precisos que los datos numéricos, pero en muchas ocasiones aportan una información más útil para el razonamiento humano.

2.3.1. Sistemas difusos

Los sistemas difusos son sistemas basados en el conocimiento humano, la parte esencial de un sistema difuso es la base de conocimiento, que consiste de reglas difusas que tienen la forma: “Si antecedente entonces consecuente”. La primera parte de la regla se denomina antecedente y contiene una o varias condiciones referidas a las entradas del sistema; la segunda parte de la regla es denominada consecuente y es la acción a ejecutarse. Para el diseño de sistemas difusos se tiene en cuenta que existen diferentes tipos de sistemas difusos, sin embargo, dos son los más popularmente usados, a saber, sistemas del tipo Mamdani y del tipo Takagi-Sugeno-Kang (Espinosa J., Vanderwalle J., Wertz V. 2007). El proceso de operación de los sistemas difusos, es en realidad sencillo, tal como se muestra en la Figura 6, se tiene valores de entrada a un sistema, los cuales son “fusificados”

Figura 6: Secuencia de bloques para un sistema difuso

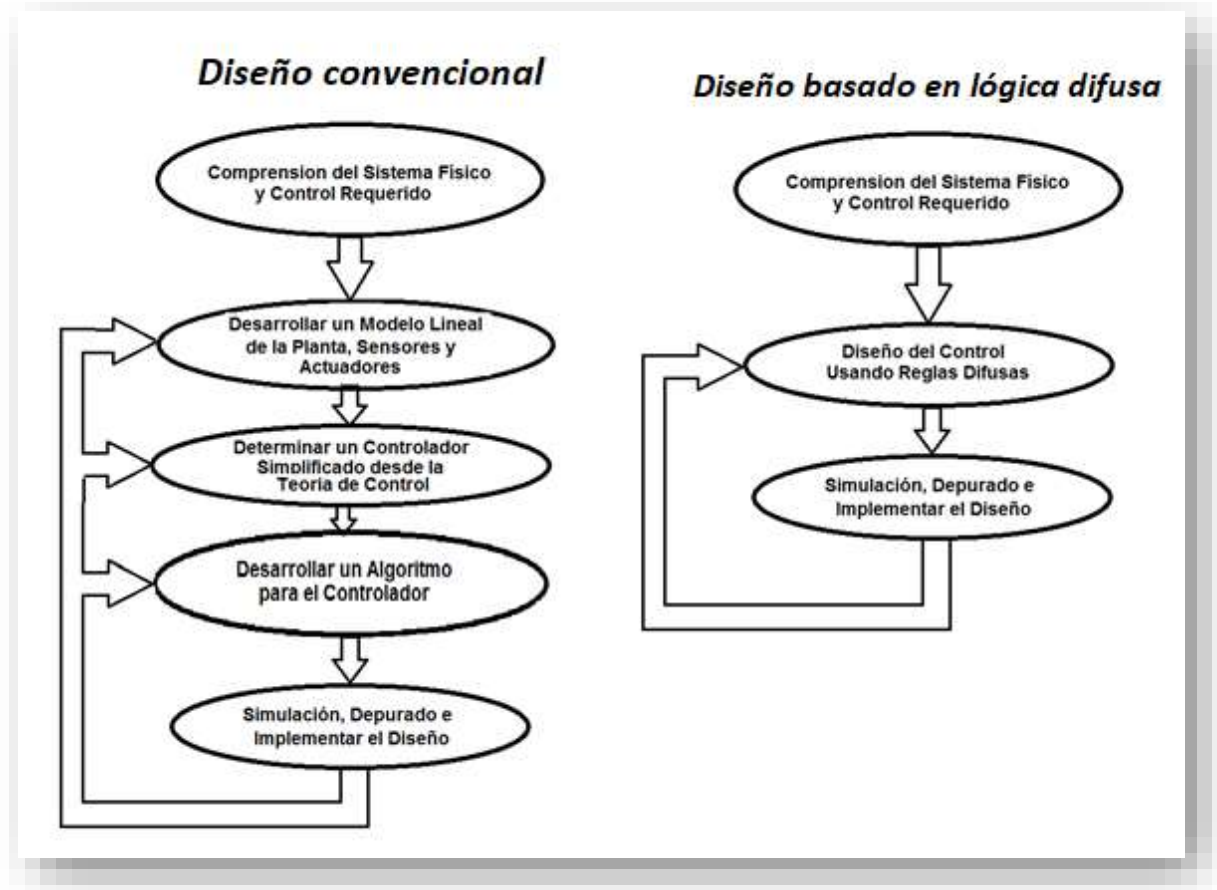


Fuente: Elaboración propia en base a los conceptos de Taher A. 2012, Wang L. 2009, Pedrycz 1993

Un ejemplo muy sencillo, en la comprensión del concepto difuso es el siguiente: la temperatura en un día cálido en el mes de junio (invierno), no es exactamente igual a la de un día cálido en el mes de diciembre (verano), es este caso, la definición exacta de cuando la temperatura pasa desde templada a caliente

es imprecisa y no es posible identificar la temperatura simplemente como de “templada”. Este tipo de imprecisión asociado continuamente a los fenómenos reales, es común en todos los campos de estudio: sociología, física, biología, finanzas, ingeniería, oceanografía, psicología, etc. Es decir, se acepta la imprecisión como una consecuencia natural de "la forma de las cosas en el mundo".

Figura 7: Diseño convencional de control vs. Diseño basado en lógica difusa



Fuente: Paz J. 2011

Lo que hace la lógica difusa, es simplemente, aproximar estos eventos a funciones matemáticas numéricas, donde es posible elegir el resultado, en lugar de hacer un análisis del conocimiento empírico; sin embargo, fácilmente procesamos y entendemos de manera implícita la imprecisión de la información. Estamos capacitados para formular planes, tomar decisiones y reconocer conceptos compatibles con altos niveles de vaguedad y ambigüedad. No hay nada impreciso

o borroso sobre la lógica borrosa. Es matemática, natural y simple, que se funda en el concepto "Todo es cuestión de grado", lo cual permite manejar información vaga o de difícil especificación, si quisiéramos hacer cambiar con esta información el funcionamiento o el estado de un sistema específico. Es entonces posible con la lógica borrosa, gobernar un sistema por medio de reglas de 'sentido común' las cuales se refieren a cantidades indefinidas. La lógica difusa es entonces definida como un sistema matemático que modela funciones no lineales, que convierte unas entradas en salidas acordes con los planteamientos lógicos que usan el razonamiento aproximado.

Para apreciar por qué los diseños metodológicos basados en lógica difusa son muy atractivos en la producción de aplicaciones de control se examina un diseño típico en forma de diagrama de flujo (Figura 7), en la cual se muestra la secuencia de los pasos del diseño requerido para desarrollar un controlador usando un acercamiento convencional y una usando lógica difusa.

En el proceso convencional, el primer paso es entender el sistema físico y sus requerimientos de control; en base a este entendimiento, el segundo paso es desarrollar un modelo el cual incluye la planta, sensores y actuadores. El tercer paso es usar la teoría de control lineal para determinar una versión simplificada del controlador, tales como los parámetros de un controlador. El cuarto paso es desarrollar un algoritmo para el controlador simplificado. El último paso es simular el diseño incluyendo los efectos de no lineales, tales como, ruido y variación de parámetros. Si el resultado no es satisfactorio es necesario modificar el sistema modelado, rediseñar el controlador, reescribir el algoritmo y volver a empezar.

En el proceso con lógica difusa, el primer paso es entender y caracterizar el comportamiento del sistema usando nuestro conocimiento y experiencia. El segundo paso es diseñar directamente el algoritmo de control usando reglas lógicas, las cuales describan los principios de la regulación del controlador en términos de la relación de sus entradas y sus salidas. El último paso es la simulación y depuración del diseño. Si el resultado no es satisfactorio, es necesario únicamente, modificar algunas reglas difusas y volver a probar.

A pesar que los dos diseños metodológicos son casi similares, la metodología basada en lógica difusa fundamentalmente simplifica el diseño de las interacciones. Este hecho significa muchos beneficios, tales como la reducción en el tiempo de desarrollo, diseño simplificado y tiempo de presentación rápidos.

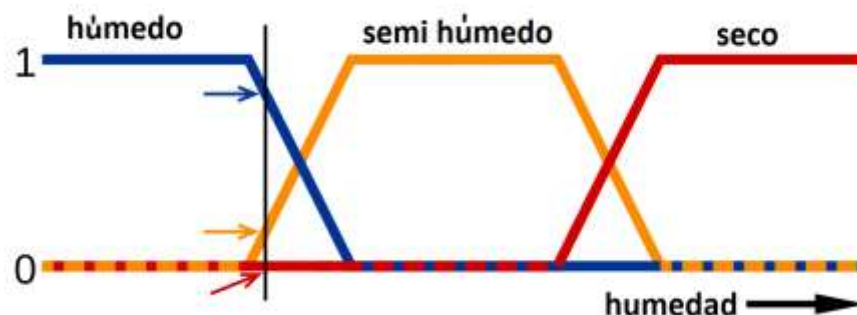
2.3.2. Variables lingüísticas

En la vida diaria se usan palabras para describir variables, por ejemplo, cuando se dice la expresión “que hoy hace frio” y es equivalente a decir que la temperatura es “baja”. Se utiliza la palabra “baja” para describir la temperatura actual. Cuando las variables toman números como sus valores, se tiene un marco de trabajo formulado matemáticamente, pero cuando la variable toma palabras como sus valores, entonces no se consigue este marco, por tal motivo se introduce el concepto de *variables lingüísticas*.

2.3.3. Funciones de pertenencia

Las funciones de pertenencia representan gráficamente un conjunto difuso (Figura 8), el eje Y representa el universo de discurso y el eje X sitúa los grados de pertenencia que están definidos de 0 a 1. Al momento de definir un conjunto difuso se puede utilizar cualquier función, sin embargo, existen ciertas funciones que son comúnmente usadas debido a la simplicidad matemática como ser las funciones triangulares, trapezoidales, parabólicas y gaussianas.

Figura 8: Función de pertenencia trapezoidal



Fuente: Elaboración propia en base a lo expuesto en el libro de texto de Ross T. 2010

Los sistemas difusos son sistemas basados en conocimiento humano, donde la parte esencial de un sistema difuso es la base de conocimiento que consiste de reglas difusas que tienen la forma:

Si *antecedente* entonces *consecuente*

La primera parte de la regla se denomina *antecedente* y contiene una o varias condiciones referidas a las entradas del sistema; la segunda parte de la regla es denominada *consecuente* y es la acción a ejecutarse. Para el diseño de sistemas difusos se tiene en cuenta que existen diferentes tipos de sistemas difusos, entre los más populares y usados están los sistemas difusos puros, los sistemas del tipo Mamdani y los del tipo Takagi-Sugeno-Kang.

2.3.4. Sistema difuso del tipo Mamdani

Este sistema fue uno de los primeros sistemas de control que utilizó conjuntos difusos. El método de Mamdani fue propuesto por Ebrahim Mamdani en 1975. Está compuesta por los siguientes elementos (Figura 9):

Fusificación. - Es el proceso mediante el cual se transforma un valor numérico de una variable de entrada en un conjunto difuso que representa dicho valor. El primer paso consiste en tomar las entradas y determinar el grado al que ellos pertenecen con respecto a cada uno de los conjuntos difusos apropiados y la entrada siempre es un valor numérico limitado al universo del discurso de la variable de entrada. Los fusificadores se clasifican en dos categorías: el fusificador unitario y el no unitario. Un fusificador unitario produce un conjunto el cual se reduce a un punto, el correspondiente al valor preciso de la entrada y tiene grado de pertenencia máximo; Un fusificador no unitario produce un conjunto difuso cuyo marco de trabajo contiene más de un punto. En estos fusificadores, el valor de pertenencia es máximo $\mu(x) = 1$ para $x = y$. Si la variable x se aleja de y , el valor de pertenencia decrece.

Base de reglas. - La base de reglas es un conjunto de reglas difusas expresadas en forma lingüística. Estas expresiones son utilizadas para establecer

relaciones causa-efecto entre dos proposiciones difusas las cuales son expresadas mediante variables lingüísticas y se expresan generalmente como:

Si proposición A entonces proposición B

Interpretando la expresión, se observa que la relación difusa está definida en los dominios de las variables lingüísticas *A* y *B* por lo que el grado de verdad de la implicación es:

El antecedente de la proposición *B* es *A* y es representado por un conjunto difuso *B*.

El significado de la evaluación de la expresión es una relación difusa que se expresa de la siguiente manera:

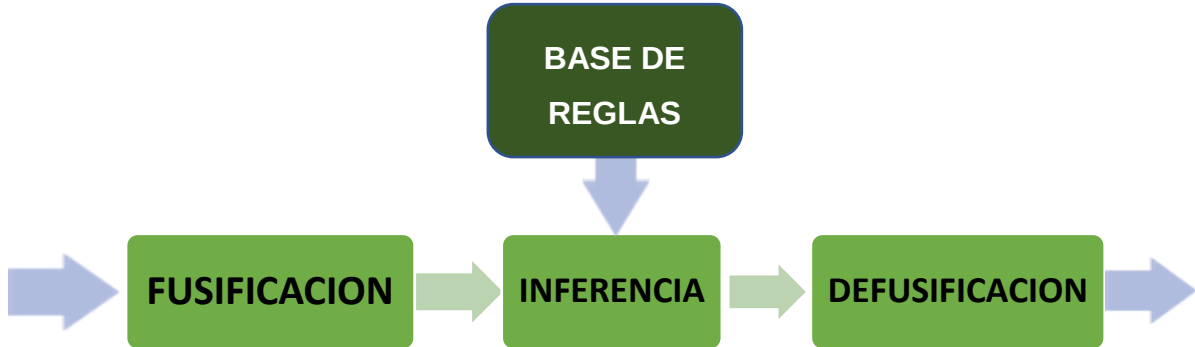
El operador puede ser un simple producto cartesiano o algún operador de implicación difuso. Si el antecedente o el consecuente son proposiciones compuestas, entonces se calcula primero la función de pertenencia de la proposición compuesta y el operador es aplicado a las funciones de pertenencia resultante. Por lo que cualquier operación o relación es lógica difusa corresponde a operaciones y relaciones entre funciones pertenencia que dan como resultado otras funciones de pertenencia (Passino K., Yurkovich S. 1998).

Inferencia. - El mecanismo de inferencia es el encargado de disparar las reglas, es decir, obtener una salida difusa a partir de una entrada difusa. Existen dos tipos de inferencia, las cuales son:

Inferencia basada en composición: las relaciones representan el significado de cada regla individual y son agregadas a la relación difusa. Esta operación se realiza mediante una composición entre la entrada difusa y la relación que describe el conjunto de reglas

Inferencia basada en el disparo individual: En este tipo de inferencia cada regla se dispara individualmente. Los valores de las funciones de pertenencia son agregados para formar la salida final.

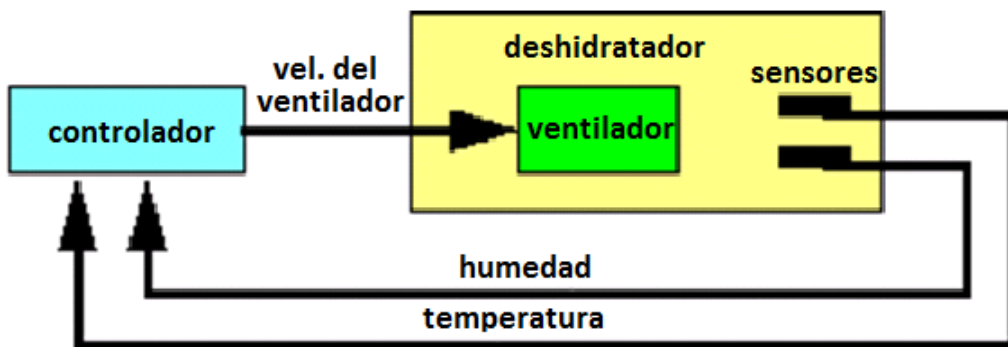
Figura 9: Sistema difuso de tipo Mamdani



Fuente: Lances, 2013

Defusificación. - El resultado de la inferencia de la base de reglas, es también un valor difuso. Sin embargo, para manejar el actuador es necesaria una magnitud no difusa. Por lo tanto, es necesario un bloque que sea capaz de dar una salida determinada cuando se tenga una entrada difusa, esto para que represente lo mejor posible la distribución de posibilidades de los valores difusos, de manera que requiere un defusificador son los basados en centro de área, centro de sumas, altura, medio del máximo, etc.

Figura 10: Implementación de un mecanismo de control en un deshidratador



Fuente: Elaboración propia, en base a conceptos expuestos en el libro de Perez M., Hidalgo A., Perez E. 2008

El uso de la metodología difusa, permite reducir el ciclo de desarrollo del diseño y en el proceso de depuración y el ciclo de diseño, se puede corregir el sistema, simplemente modificando las reglas, y rediseñando el controlador.

Además, ya que, están basadas en reglas difusas, no es necesario ser experto en un lenguaje de alto o bajo nivel. (Ríos Rivas, 2005).

Un ejemplo pictórico, desde el punto de vista de una persona común, se muestra en la Figura 10, donde, se observa un diagrama de “bloques”, en el cual, el propietario quiere un sistema deshidratador con dos sensores, un ventilador como retroalimentación y no le interesa la forma en que sea solucionado el problema.

En muchas aplicaciones, la “lógica difusa” ayuda a mejorar el control, por ejemplo, un problema típico asociado a las técnicas de control y respuesta, se presenta en controlar un dispositivo mecánico (ejemplo un ventilador) como una respuesta de una variable termodinámica.

Con la lógica difusa, se puede usar reglas y funciones de membresía, para aproximar cualquier función continua y con cualquier grado de precisión. En la lógica difusa, las reglas son mucho más simples de implementar y mucho más fáciles para depurar, que las técnicas de tablas de estimación. La única entrada es la humedad, determinada por un sensor, sin embargo, en la vida real los controles son mucho más complejos. La mayoría de las aplicaciones de control tienen múltiples entradas y requieren un gran número de parámetros, los cuales hacen que, la implementación sea muy compleja. Las reglas difusas ayudan a simplificar la implementación mediante combinaciones de múltiples entradas dentro de un comando sencillo “IF-THEN”. Si consideráramos una versión modificada del ejemplo de un controlador de humedad, con dos entradas (temperatura y humedad) y como salida, la velocidad del ventilador. Si definimos a las variables de entrada X = Humedad y Y = Temperatura, y sea Z = velocidad del ventilador

IF X IS mucha AND Y IS alta	THEN Z = alta
IF X IS media AND Y IS alta	THEN Z = media
IF X IS poca AND Y IS alta	THEN Z = cero
IF X IS mucha AND Y IS media	THEN Z = media
IF X IS media AND Y IS media	THEN Z = baja
IF X IS poca AND Y IS media	THEN Z = baja

IF X IS mucha AND Y IS ambiente THEN $Z = \text{alta}$

IF X IS media AND Y IS ambiente THEN $Z = \text{baja}$

IF X IS poca AND Y IS ambiente THEN $Z = \text{cero}$

Usando la lógica difusa, describimos la salida como una función de las entradas humedad y temperatura, enlazada con los operadores AND y THEN. La aproximación difusa requiere significativamente menos entradas que una tabla de estimación dependiendo del número de las variables de entrada. Las reglas son mucho más fáciles de desarrollar, más simples de depurar, en comparación con una tabla de estimación.

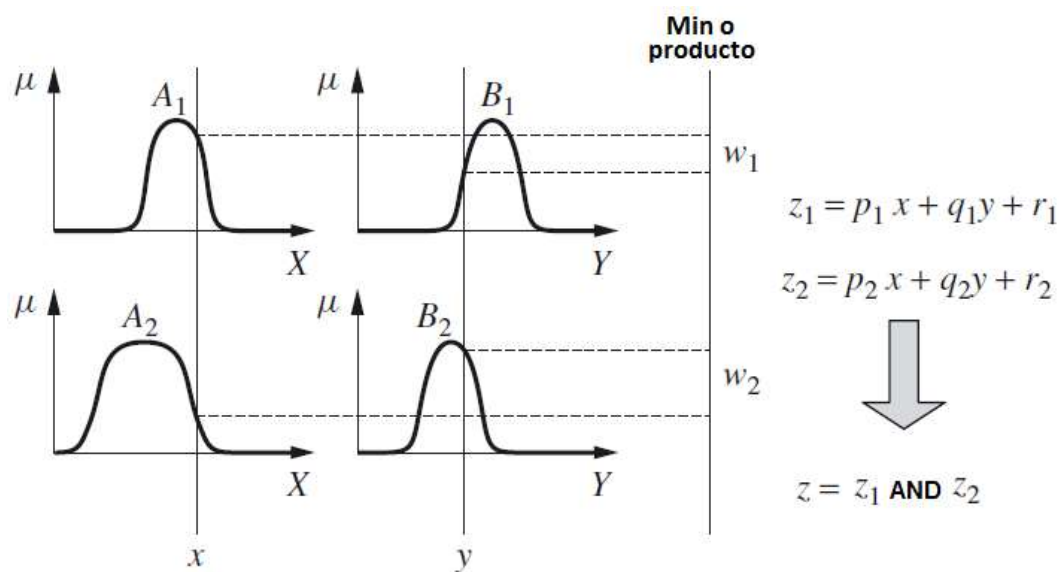
2.3.5. Sistema difuso del tipo Takagi-Sugeno-Kang

El segundo método de inferencia, es el método de Takagi-Sugeno-Kang, o método TSK, fue propuesto para desarrollar una aproximación sistemática para generar reglas difusas (Figura 11) desde un conjunto de datos de entrada/salida (Figura 12). Una regla típica en el modelo TSK, con dos entradas x e y y salida z , tiene la forma:

$$\text{IF } x \text{ es } A \text{ y } y \text{ es } B, \text{ THEN } z \text{ es } z = f(x, y)$$

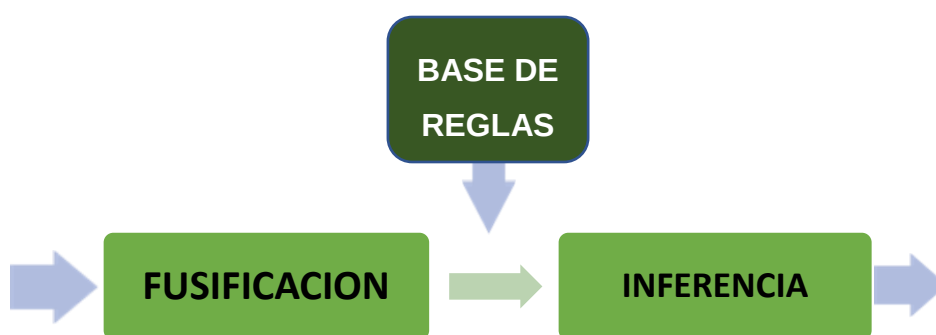
Donde $z = f(x, y)$ es una función consecuente. Usualmente, $f(x, y)$ es una función polinómica de las entradas x e y , pero puede ser cualquier función, especificada en el antecedente de la regla la cual es aplicada. Si la función $f(x, y)$ es constante, la inferencia del sistema es de orden cero, la cual, es un caso particular del sistema Mamdani, en donde, cada regla, esta especificada como sistema difuso sencillo. Si $f(x, y)$ es una función lineal de las variables de entrada x e y el sistema es de primer orden de TSK. En el modelo TSK, cada regla tiene una salida, dada, por una función como muestra la siguiente figura.

Figura 11: Consecuente reglas TSK



Fuente: Taher A. 2012

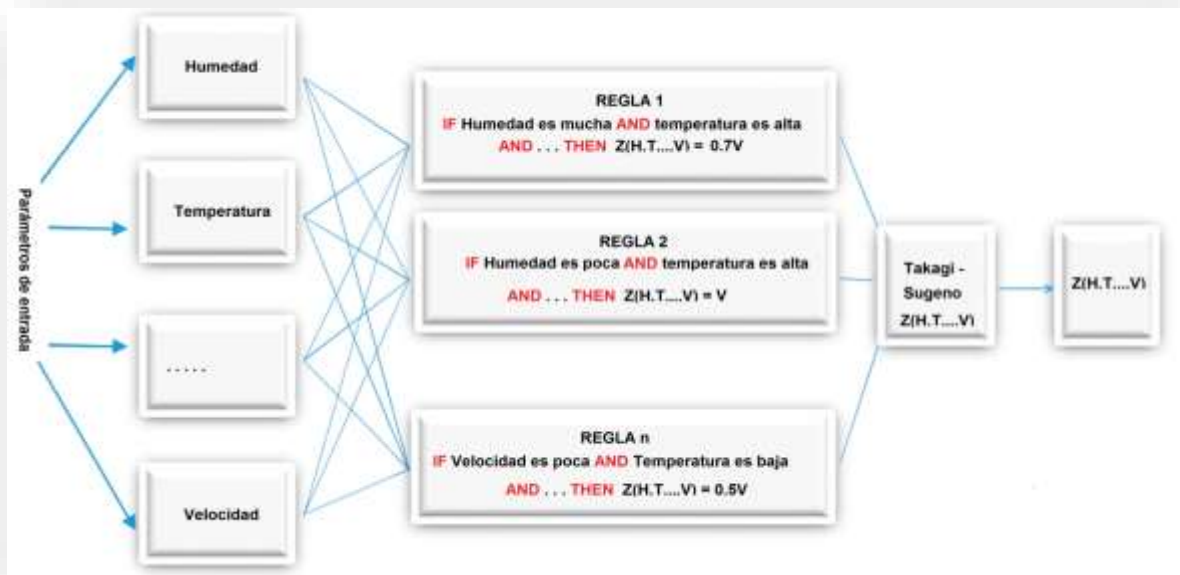
Figura 12: Sistema difuso tipo Takagi-Sugeno-Kang



Fuente: Lances, 2013

Las reglas difusas, en este caso, también se efectúan mediante combinaciones de múltiples entradas, dentro de un comando sencillo “IF-THEN”.

Figura 13: Reglas modelo Takagi-Sugeno-Kang



Fuente: Elaboración propia, en base a conceptos expuestos en el libro de Bojadziev G., Bojadziev M

Si consideráramos el ejemplo anterior (Figura 10) del controlador de dos entradas (temperatura y humedad) y como salida, la velocidad del ventilador, sea Z = la función de salida del sistema difuso, a continuación, se muestran las reglas del modelo TSK que tendría el ejemplo.

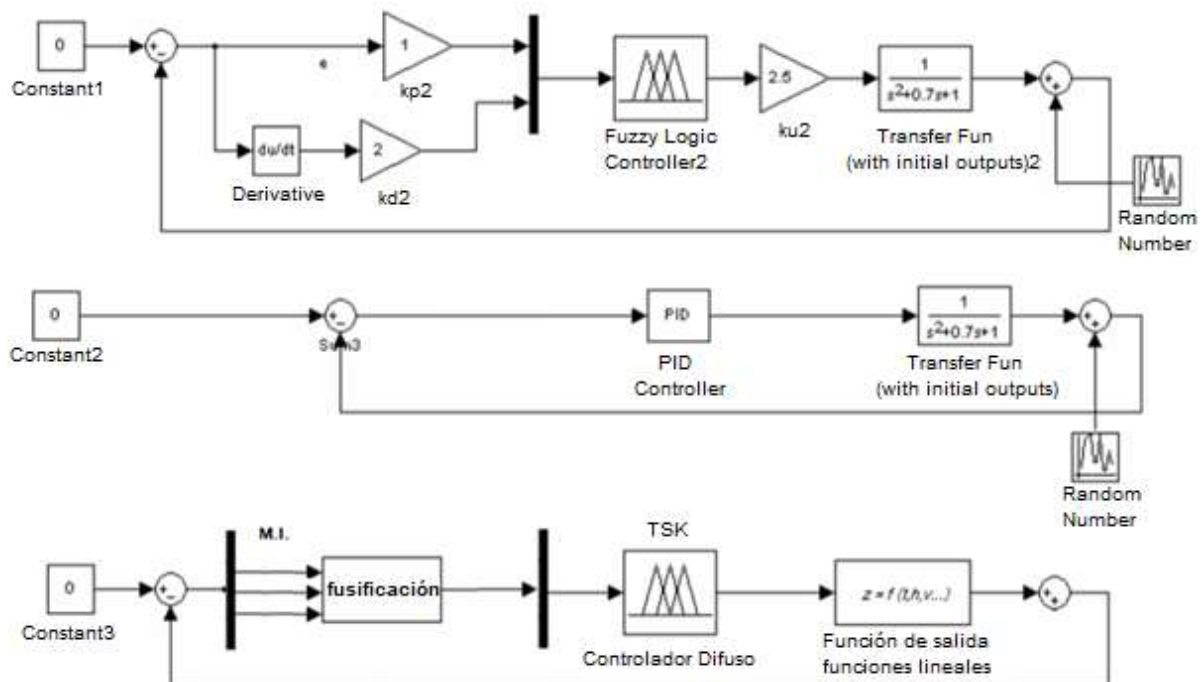
En principio, es posible emplear como parámetros de entrada, funciones no lineales, pero la elección de tal función puede ser muy compleja, por lo tanto, en general se emplean funciones lineales. Las ventajas que presenta la aplicación de la lógica difusa son las siguientes:

- Es computacionalmente eficiente.
- Trabaja bien con técnicas lineales (por ejemplo, como lo disponible para controladores PID).
- Trabaja bien con técnicas de optimización y control adaptable.

- Tiene garantizada una respuesta de control continuo.
- Está bien adaptado al análisis matemático.

Para dejar bien definido los conceptos vertidos anteriormente, se presenta la Figura 14, en la cual se muestran los tres tipos de lazos de control estudiados en el presente trabajo, el primero muestra un tipo de lazo de control interesante que es una especie de híbrido, denominado “controlador PID-difuso”, tiene la característica de entrada de funciones diferenciables, el segundo tipo de lazo, es del PID clásico ya conocido por todos, el tercer tipo de lazo de control, es el propuesto en este trabajo de investigación, un lazo únicamente difuso.

Figura 14: Lazos de control, con controlador PID-difuso, PID clásico y Difuso.



Fuente: Elaboración propia, en base a los conceptos expresados por Bonifacio M. 2002, Dorf R. 2001, Ibrahim M. 2010

2.4. Comparación entre Controladores: Difuso y PID

El proceso que se utiliza en la lógica difusa consiste de expresiones matemáticas en donde se busca dar respuesta a aquellos *problemas donde la toma de decisiones se asemeja a la forma de razonamiento del ser humano* y se fundamenta en la experiencia que se recoge de los sistemas. Su aplicación en el campo del control automático ha sido de gran importancia, sobre todo en el control de procesos donde la *dinámica* del sistema sea del orden no lineal, por ejemplo, el funcionamiento de un sistema de péndulo invertido, la acción de sistemas oscilatorios tales como los realizados por los circuitos CL o aquellos sistemas de masa resorte, movimientos armónicos, etc.

Por ejemplo, en el ámbito comercial se tienen a los electrodomésticos, en donde se aplican sistemas de control basados en lógica difusa, un caso es la muy conocida “*lavadoras Fuzzy*”, que se dice que es un avance en la mejora de la limpieza de la ropa utilizando para ello el proceso de control de la lógica difusa; otra aplicación en la que se usa lógica difusa, es en el control de aceleración y frenado en los trenes (del tipo metro) en Japón, por lógica difusa se ha logrado obtener una disminución suave y eficiente de la velocidad de estas maquinas, así como, de su arranque. Por otro lado, en la industria automotriz el uso de lógica difusa ha sido de gran impacto ya que se le ha dado la responsabilidad de los sistemas de control del vehículo tales como: los frenos, la suspensión, la dirección y el motor; la aplicación vehicular ha tenido progresos muy significativos dado que se incremento la eficiencia del uso del combustible y la potencia del motor de los vehículos, optimizado así, el sistema de frenos y evitando el deslizamiento en la disminución de la velocidad.

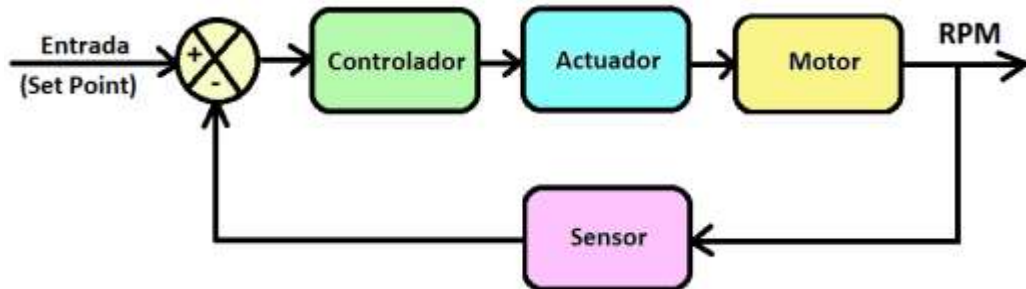
2.4.1. Simulación de un controlador PID y un controlador Fuzzy

(a) Controlador PID

En esta sección se presentan resultados de una simulación de un controlador PID y otro Fuzzy (Díaz, y otros), los resultados de las principales acciones de ambos

sistemas de control, se basan en el siguiente diagrama del sistema a controlar (Figura 15):

Figura 15: Diagrama de la simulación de controladores PID



Fuente: Díaz y otros, 2012

La función de transferencia considerada en (Díaz, y otros, 2012) para realizar el proceso de control está dada por la función:

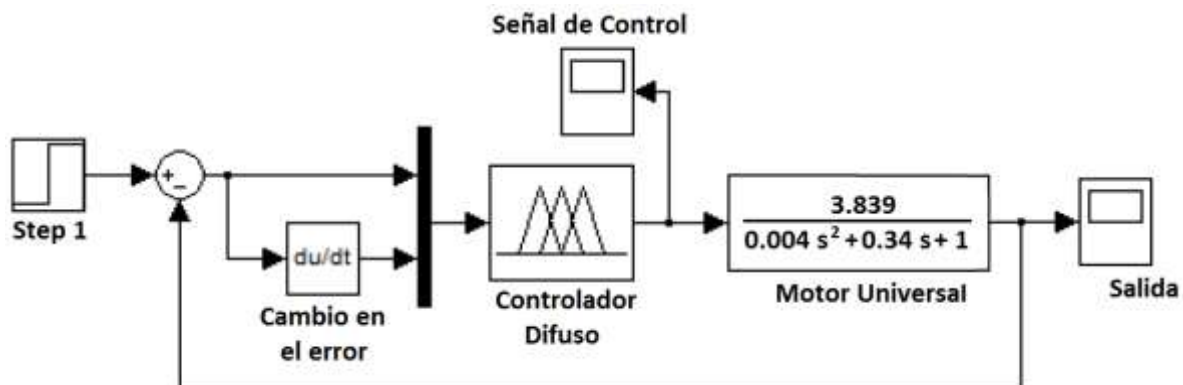
$$G(s) = 3.839 \frac{1}{0.0304s^2 + 0.387s + 1}$$

Ecuación 2: Función de transferencia

(b) Controlador Difuso

El diseño del controlador difuso expuesto en (Comparación entre un controlador difuso y un controlador pid para un motor universal, 2012) ejecuta la simulación en el software Simulink que se muestra en el siguiente diagrama de conexiones (Figura 16):

Figura 16: Sistema en lazo cerrado haciendo uso del controlador difuso



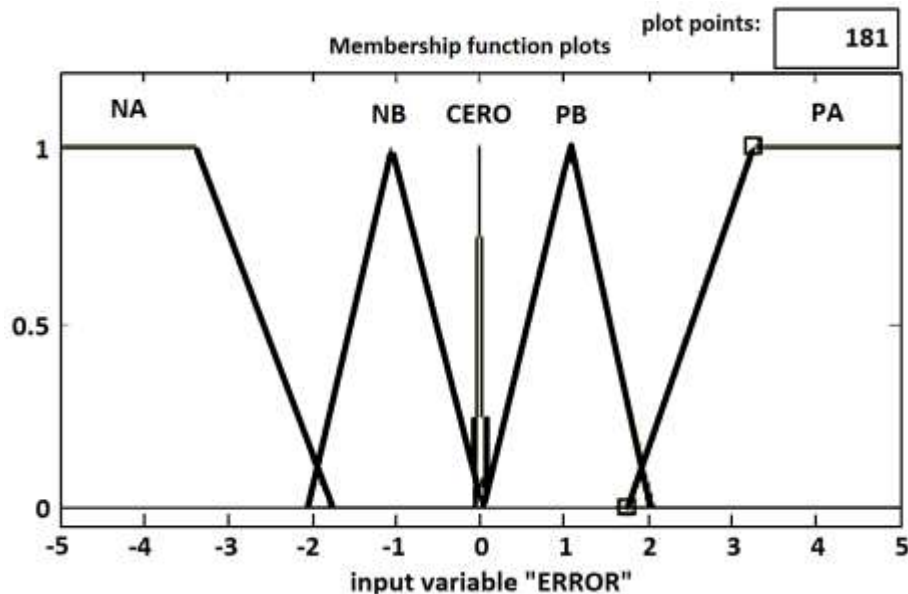
Fuente: Díaz y otros, 2012

Se considero dos bases de reglas y conjuntos diferentes para el diseño del controlador difuso, esto llevo a dos planteamientos diferentes (P1 y P2), para mostrar que estos controladores tienen soluciones en las que unas pueden ser mejor que otras, también se podrá ver que la definición de más o menos conjuntos afecta significativamente el comportamiento del sistema.

1) Primer planteamiento P1

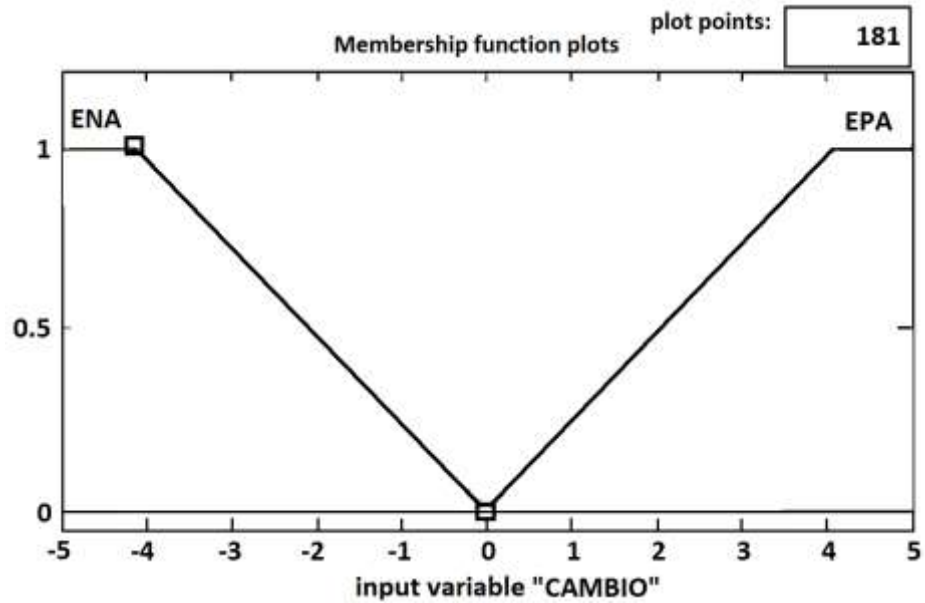
Los conjuntos difusos analizados en (Comparación entre un controlador difuso y un controlador pid para un motor universal, 2012) así como el universo de discurso consideran las variables de error, cambio y de control que se pueden apreciar a continuación en las figuras 17, 18 y 19 para cada entrada y la salida.

Figura 17: Definición de conjuntos para la variable error



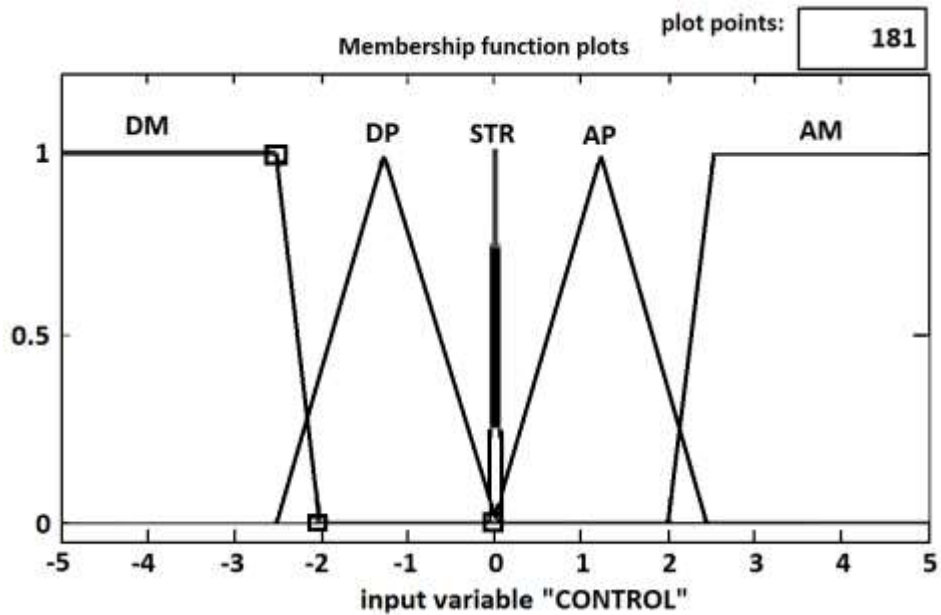
Fuente: Díaz y otros, 2012

Figura 18: Definición de conjuntos para la variable Cambio en el Error



Fuente: Díaz y otros, 2012

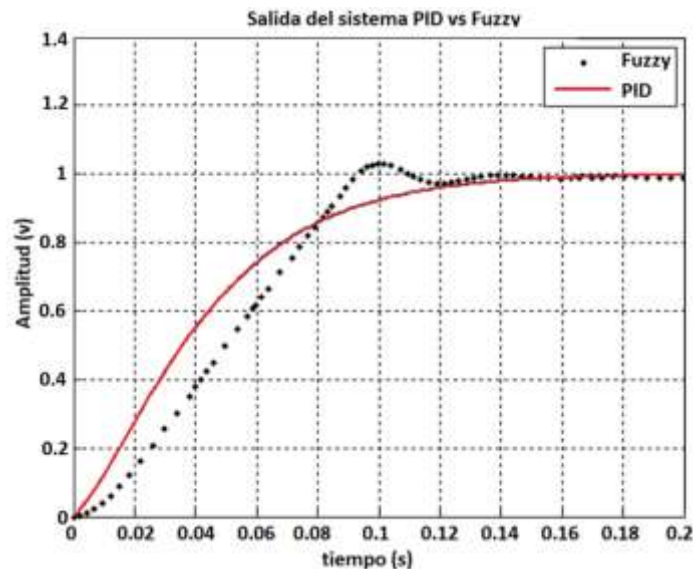
Figura 19: Definición de conjuntos para la variable Control



Fuente: Díaz y otros, 2012

A partir de la simulación se obtuvieron los siguientes resultados para el primer planteamiento.

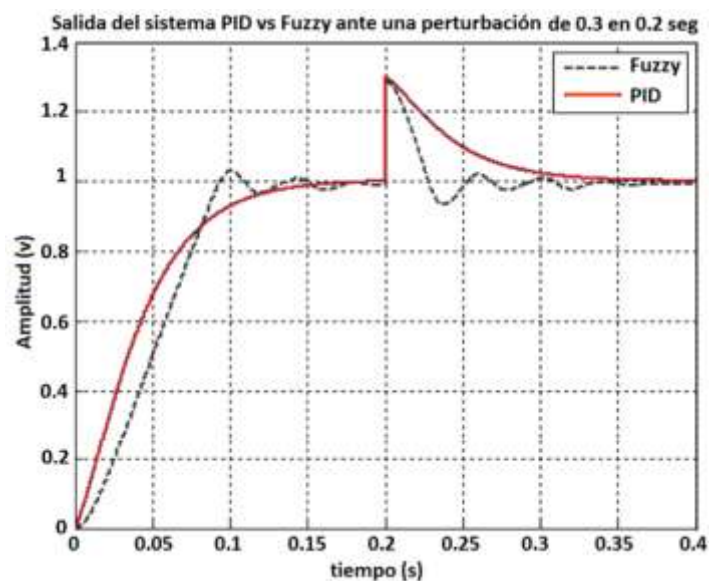
Figura 20: Comparación entre PID y Fuzzy



Fuente: Díaz y otros, 2012

En la Figura 20 se ve una respuesta más rápida en la estabilización para el control difuso, en donde se observa que cerca a 0.1 segundos comienza tal estabilización; mientras que, el controlador PID lo hace aproximadamente en los 0.14 segundos después del inicio de la señal.

Figura 21: Comparación entre PID y Fuzzy ante una perturbación



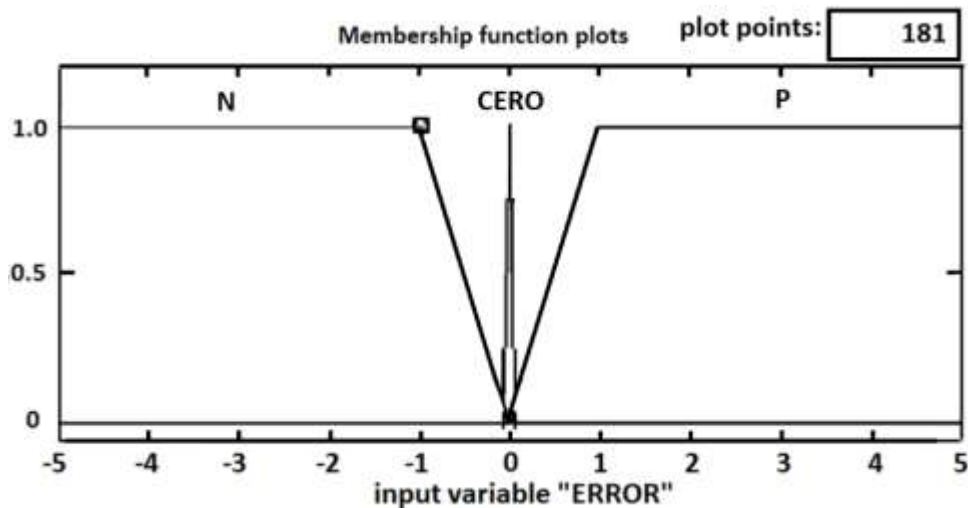
Fuente: Díaz y otros, 2012

Frente a una perturbación que se da a los 0.3 segundos, el controlador difuso presenta una rápida respuesta para su estabilización a los 0.25 segundos frente al controlador PID que lo hace exponencialmente llegando a la estabilización a los 0.35 segundos, este comportamiento se observa en la Figura 21.

2) Segundo planteamiento P2

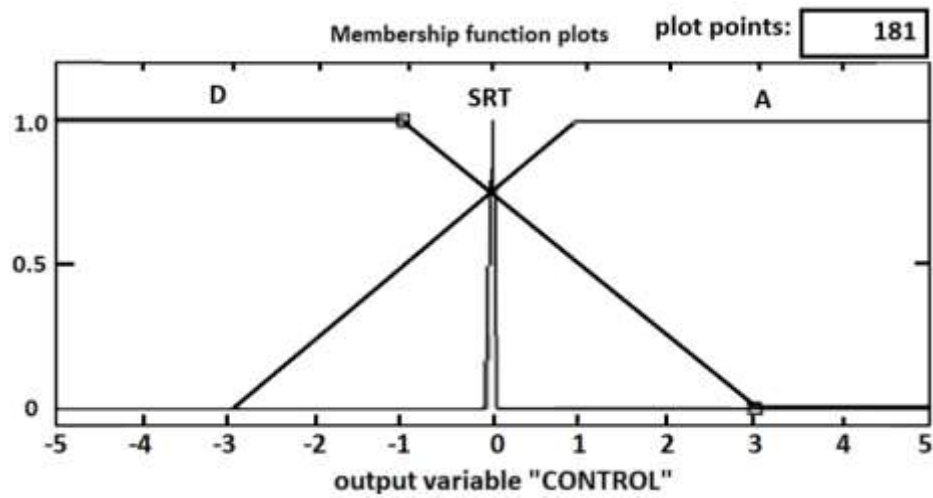
Los conjuntos difusos, así como el universo de discurso se pueden apreciar en las figuras 22 y 23 para cada entrada y la salida.

Figura 22: Definición de conjuntos para la variable Error



Fuente: Díaz y otros, 2012

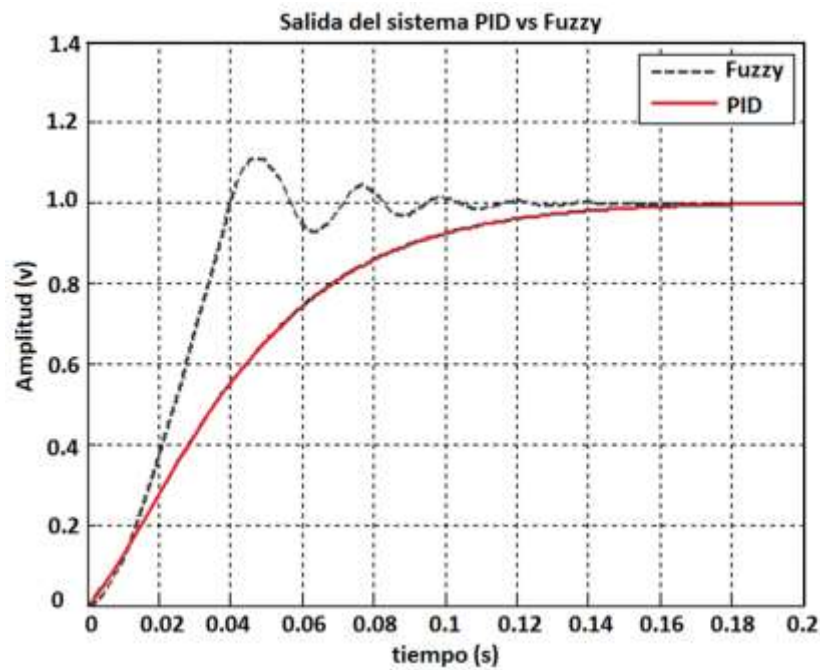
Figura 23: Definición de conjuntos de la variable Control



Fuente: Díaz y otros, 2012

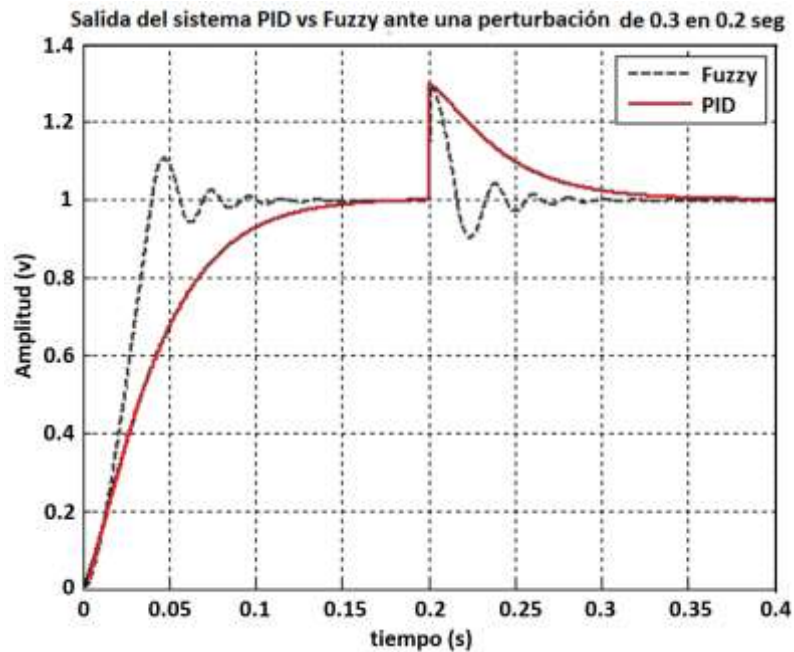
Los resultados se muestran en las Figuras 24 y 25.

Figura 24: Comparación entre PID y Fuzzy



Fuente: Díaz y otros, 2012

Figura 25: Comparación entre PID y Fuzzy con una perturbación

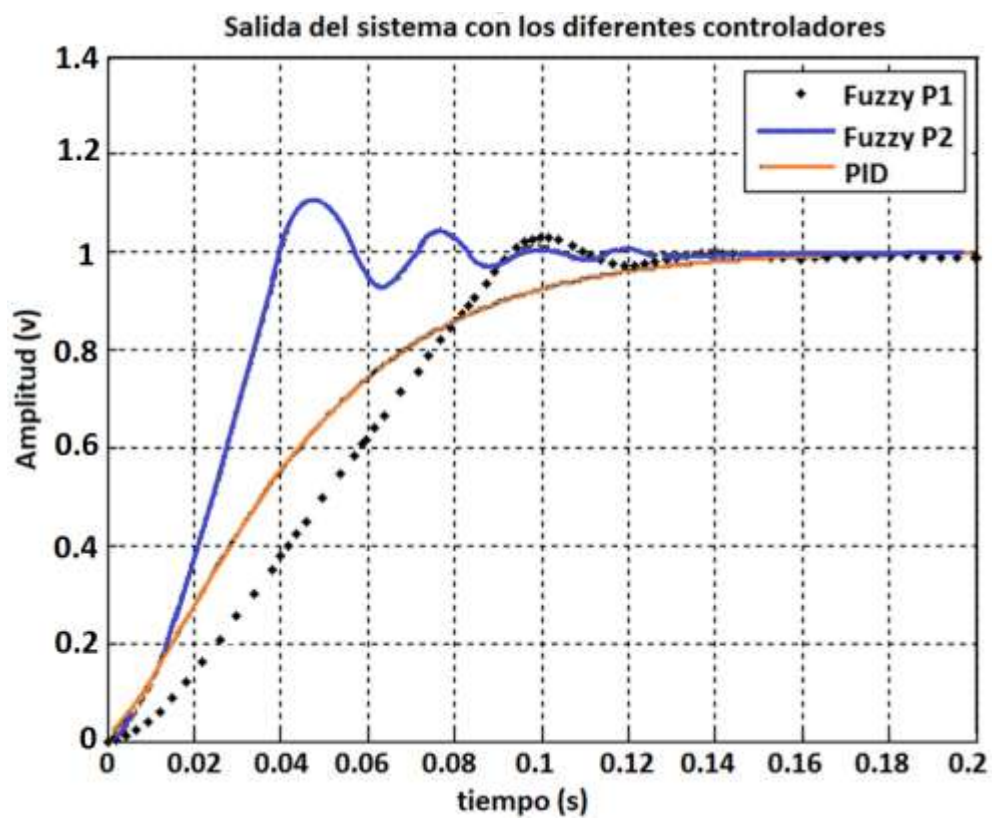


Fuente: Díaz y otros, 2012

En la referencia (Comparación entre un controlador difuso y un controlador pid para un motor universal, 2012) se concluye que la definición de reglas y conjuntos es independiente del logro de mejores resultados; sin embargo, se afecta el proceso de sintonización, lo cual implica que para la definición de pocos conjuntos y reglas es mucho más fácil esta tarea.

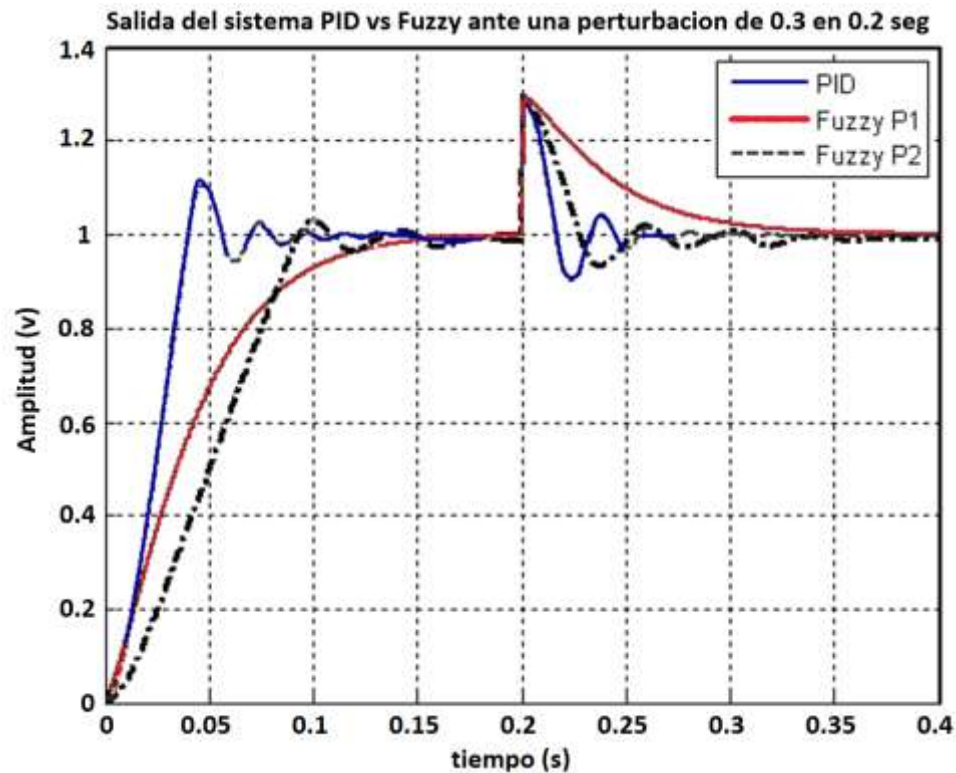
Estas conclusiones pueden ser observadas en la Figuras 26 y 27 en donde se observa que el controlador PID tiene una estabilización en un tiempo mayor que el controlador difuso.

Figura 26: Comparación entre PID y Fuzzy para 2 planteamientos de lógica difusa



Fuente: Díaz y otros, 2012

Figura 27: Comparación entre PID y Fuzzy para 2 planteamientos de lógica difusa



Fuente: Díaz y otros, 2012

2.5. Modelo de Prototipo

Este modelo permite que todo el sistema, o alguna de sus partes, se construyan rápidamente para así comprender y aclarar ciertos aspectos en los que se aseguren que el desarrollador, el usuario, el cliente estén de acuerdo en lo que se necesita, así como también la solución que se propone para dicha necesidad y de esta forma minimizar el riesgo y la incertidumbre en el desarrollo.

Es impensable llegar al final del desarrollo sin haber realizado comprobaciones a lo largo del camino y es este modelo quien se encarga de realizar dichas comprobaciones.

Este modelo principalmente se lo aplica cuando un cliente define un conjunto de objetivos generales para el software a desarrollarse sin delimitar detalladamente los requisitos de entrada procesamiento y salida, es decir cuando el responsable no está seguro de la eficacia de un algoritmo, de la adaptabilidad del sistema o de la

forma en que interactúa el hombre y la máquina. Este modelo se encarga principalmente de ayudar al ingeniero de sistemas y al cliente a entender de mejor manera cuál será el resultado de la construcción cuando los requisitos estén satisfechos. (Peeleger).

El modelo de construcción de prototipos tiene tres pasos:

- Escuchar al cliente. Recolección de requisitos. Se encuentran y definen los objetivos globales, se identifican los requisitos conocidos y las áreas donde es obligatorio más definición.
- Construir y revisar la maqueta (prototipo).
- El cliente prueba la maqueta (prototipo) y lo utiliza para refinar los requisitos del software.

Los prototipos, que son documentos, diseños o sistemas que simulan o tienen implementadas partes del sistema final, constituyen una herramienta muy útil para hacer participar al usuario en el desarrollo y poder evaluar el producto desde las primeras fases de desarrollo.

El uso de los prototipos en el desarrollo de sistemas software no se limita sólo a probar las interacciones que los usuarios deben realizar, sino que son útiles también para otras actividades que se realizan durante el proceso, como por ejemplo su gran utilidad en la fase de recogida o análisis de requisitos en cuanto que amplía y mejora y la información necesaria para el desarrollo del sistema.

Cuando un prototipo se desarrolla con el sólo propósito de precisar mejor las necesidades del cliente y después no se va a aprovechar ni total ni parcialmente en la implementación del sistema final se habla de un prototipo desechable. Para que la construcción de prototipos sea posible se debe contar con la participación activa del cliente (Peeleger).

III. MARCO PRACTICO

3.1. Introducción

El objetivo del presente trabajo, es construir, empezando desde el diseño, hasta su implementación un deshidratador de frutas, con una fuente de calor externa, por medio de un sistema de control, que tiene su fundamento en la lógica difusa; además, este deshidratador hace uso de la plataforma Arduino a la cual se le agregan sensores electrónicos de bajo costo.

Se procedió a elegir un controlador difuso del modelo Takagi-Sugeno-Kang, por los siguientes criterios:

- El método de control ON/OFF es uno de los sistemas de control más básicos y usados con bastante frecuencia; sin embargo, presenta muchas oscilaciones de ajuste en el valor de referencia.
- El control PID reduce las oscilaciones y proporciona un ajuste más preciso donde tiende a ser posible y exitoso cuando se tiene una entrada y una salida (SISO), pero al tener un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) el sistema se va haciendo más complejo, es por ello que se recurre al control difuso evitando posibles errores en un modelo MIMO, (ver Figura 7).
- El control difuso es adaptable a cualquier arquitectura, tiene diferentes modelos entre los más usados están el modelo de Mamdani y TKS. El modelo Mamdani presenta una etapa de salida donde convierte un valor lingüístico en un resultado real, en cambio el modelo TKS evita este paso, es decir, la salida de este modelo proporciona una función basada en las entradas que forman parte el sistema haciendo innecesario el paso de conversión.

Por estos motivos se hizo el uso del controlador difuso para el control del deshidratador de frutas.

3.2. Metodología empleada

Esta investigación es de carácter proyectivo, para Hurtado “consiste en la elaboración de una propuesta, un plan, un programa o un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, o de una institución, o de una región geográfica, en un área particular del conocimiento, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y de las tendencias futuras” (Barrera, 2008).

El trabajo se adopta en la estructura que propone el método científico, se caracteriza en la parte del razonamiento inductivo, experimental cuantitativo donde participan la variable del tiempo de deshidratación, la temperatura expuesta y la humedad del producto.

La construcción del prototipo abarcó la metodología del prototipado donde sigue las etapas que propone esta metodología:

- La recolección de requerimientos implicaba una cámara donde se pueda llevar a cabo el proceso de deshidratación adjuntando sus respectivas resistencias de calor, el ventilador que permitirá la expulsión de aire y los diferentes sensores que permitirán la adquisición de datos.
- El diseño se construyó intuitivamente teniendo las resistencias de calor en la parte central de las bandejas, para que el mismo sea repartido más homogéneamente.
- Se procede a la construcción del prototipo, ver Anexos.
- El refinamiento concluyo con el ajuste de la puerta para que la misma tenga orificios para que el vapor pueda pasar.
- En la última etapa se obtuvo el prototipo final para ser utilizado.

3.3. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos consta de los siguientes dispositivos y circuitos integrados:

- **SENSOR DE HUMEDAD YL-69 (actuador)**

Este sensor puede medir la cantidad de humedad presente empleando dos electrodos que pasan corriente a través del suelo, y lee la resistencia (Figura 28).

Características:

- Medida análoga de la humedad con salida de variación de voltaje (AO).
- Señal digital de superación de umbral con salida para el usuario (DO) y LED indicador. La sensibilidad de disparo se puede ajustar mediante trimmer. Esta función es provista por un comparador con LM393.
- Pines de conexión de la tarjeta: VCC: alimentación, GND: Tierra, DO: Salida digital indicadora de superación de umbral, AO: Salida análoga de la medición de humedad.
- Voltaje de alimentación: 2 V a 6 V.
- Dos agujeros de sujeción en el sensor de diámetro 3 mm aprox. y un agujero de sujeción en el módulo electrónico de 2 mm aprox.
- Dimensión aproximada: Sensor 6 cm x 2 cm. Módulo electrónico 4 cm x 1.5 cm

Figura 28: Sensor de temperatura YL-69



Fuente: Elaboración propia

- **SENSOR DE TEMPERATURA LM35**

La serie LM35 es un circuito integrado de precisión de temperatura con una tensión de salida lineal proporcional a la temperatura centígrada. Este dispositivo no requiere ninguna calibración. Es de bajo costo y hace que la interfaz para leer o controlar el circuito sea fácil (Figura 29).

Características:

- Calibrado Directamente en Celsius (Centígrados)
- Precisión Asegurada de 0.5 ° C (a 25 ° C)
- Rango de -55 ° C a 150 ° C
- Opera de 4 V a 30 V
- Flujo de corriente inferior a 60 μ A

Figura 29: Sensor de temperatura lm35



Fuente: Elaboración propia

- **PLACA CONTROLADORA ARDUINO UNO**

Arduino es una placa con un microcontrolador de la marca Atmel y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip (Figura 30).

Un arduino dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V. También dispone de entradas y salidas analógicas. Mediante las entradas analógicas podemos obtener datos de sensores en forma de variaciones continuas de un voltaje. Las salidas analógicas suelen utilizarse para enviar señales de control en forma de señales PWM.

Entradas y salidas: Cada uno de los 14 pines digitales se puede usar como entrada o como salida. Funcionan a 5V, cada pin puede suministrar hasta 40 mA. La intensidad máxima de entrada también es de 40 mA. Cada uno de los pines digitales dispone de una resistencia de pull-up interna de entre 20K Ω y 50 K Ω que está desconectada, salvo que nosotros indiquemos lo contrario. Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un conversor analógico/digital de 10 bits.

Alimentación de un Arduino: Puede alimentarse directamente a través del propio cable USB o mediante una fuente de alimentación externa, como puede ser un pequeño transformador o, por ejemplo, una pila de 9V. Los límites están entre los 6 y los 12 V. Como única restricción hay que saber que si la placa se alimenta con menos de 7V, la salida del regulador de tensión a 5V puede dar menos que este voltaje y si sobrepasamos los 12V, probablemente dañaremos la placa.

Figura 30: Placa controladora arduino UNO



Fuente: Elaboración propia

- **MODULO MICRO SD**

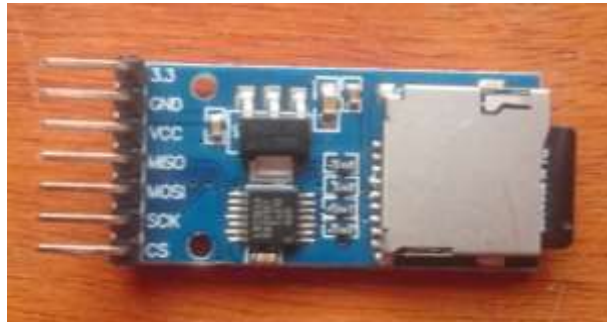
Se trata de un módulo MicroSD compatible con tarjetas SD TF (comúnmente utilizado en teléfonos móviles), que es la tarjeta más pequeña en el mercado. El módulo SD tiene diversas aplicaciones tales como registrador de datos, audio, vídeo, gráficos. Este módulo ampliará enormemente la capacidad de memoria del Arduino (Figura 31).

Este módulo tiene una interfaz SPI y su alimentación es de 5V que lo hace compatible con Arduino UNO/Mega.

Características:

- Voltaje de funcionamiento: 5V
- Tamaño: 20x28mm
- Interfaz: SPI
- Compatible: MicroSD (TF)

Figura 31: Modulo Micro SD



Fuente: Elaboración propia

- **MODULO RCT**

Este módulo incorpora una batería para alimentar el dispositivo de forma independiente, es decir que se puede desconectar la fuente de alimentación principal y el dispositivo seguirá funcionando sin perder el conteo, además incorpora un oscilador interno el cual hace que la precisión no se vea afectada a largo plazo, por lo cual puede mantener segundos, minutos, hora, día, mes y año con una muy buena precisión (Figura 32).

Características:

- Voltaje de entrada de 3.3 a 5 V
- Chip DS3231
- Soporte calendario hasta el año 2100

Figura 32: Modulo RCT



Fuente: Elaboración propia

- **PANTALLA TFT**

Este módulo es un display a colores que permite conectar fácilmente una pantalla táctil LCD a color a cualquier desarrollo con microcontroladores. El panel tiene integrado un controlador ILI9341 y un controlador táctil XPT2046. El módulo dispone también de una ranura de conexión para una tarjeta SD. El LCD se controla mediante un bus serial SPI (Figura 33).

El controlador posee un buffer RAM, disminuyendo los requerimientos del microcontrolador a usar.

Características:

- Voltaje de Operación: 3.3 V
- Interface: SPI (CS, RS, SCL, SDA, RST)
- Nivel lógico de SPI: 3.3V
- Resolución de la pantalla: 240×320 pixeles
- Regulador de 3.3 Volts incluido
- Pantalla LCD TFT de 2,4"
- El módulo SD card utiliza SPI, es necesario soldar los pines previamente (CS / MOSI / MISO / SCK).

Figura 33: Modulo pantalla TFT





Fuente: Elaboración propia

- **ACTUADOR RELAY**

Un relevador, también conocido como relé o relay, es un interruptor cuyo control corre por cuenta de un circuito eléctrico. a través de una bobina y un electroimán incide sobre diversos contactos para la apertura o el cierre de otros circuitos, que funcionan de manera independiente. Lo que hace la bobina es crear un campo magnético que lleva los contactos a establecer una conexión. El electroimán, por su parte, permite el cierre de los contactos. De esta forma, el relevador actúa como un interruptor que puede fomentar el paso de la corriente eléctrica o su interrupción.

Los relevadores, en definitiva, permiten desarrollar una conmutación a distancia, controlando altas tensiones con un bajo voltaje en retorno. También sirven para interrumpir la alimentación de corriente alterna (Figura 34).

Características:

- Tensión de bobina 5 VCD
- Terminales soldables
- Fabricado en plástico sellado con resina epoxi
- Terminales 3

Figura 34: Relay

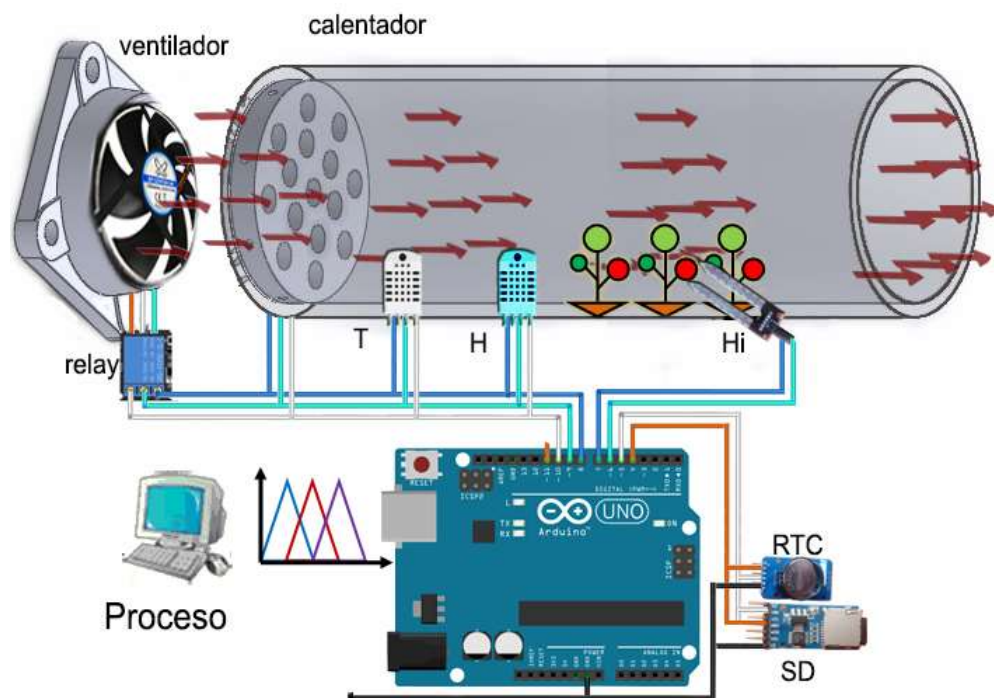


Fuente: Elaboración propia

- **CIRCUITO MONTAJE:**

El esquema del circuito con los componentes electrónicos que se usan en el presente trabajo se lo muestra en la Figura 35:

Figura 35: Diseño de la planta deshidratadora



Fuente: Elaboración propia

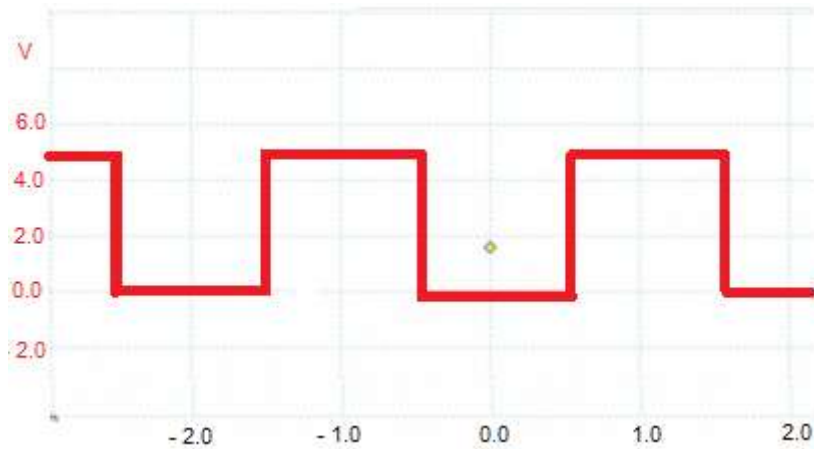
El diseño experimental consta de un ventilador que hace que la masa de aire caliente que ingresa empuje hacia afuera a la masa de aire húmedo o vapor expelida por el fruto, un calentador, que consta de resistencias convencionales, sensores, que determinan la temperatura de la cámara y la humedad relativa en el interior del deshidratador y un sensor, que registra la humedad del alimento. A estos dispositivos se anexan un modulo que suministra el tiempo en el que se ha deshidratado cada fruto y otro modulo en el cual se almacenan todos los datos adquiridos en el funcionamiento del deshidratador. Además, se tiene el software del código difuso, que se localiza en la memoria del microcontrolador Arduino, los pines de entrada/salida son de características analógicas y digitales dependiendo de la variable y el tipo de sensor; mientras que, la parte visual se la realiza en programación Java en IDE Processing. Esta parte visual tiene como complemento el uso de una pantalla LCD FTT o se lo presenta en la pantalla de un monitor de una PC.

3.3.1. Modulación por ancho de pulso, PWM

PWM significa modulación por ancho de pulso y es una técnica para transferir información o energía a un dispositivo con una señal cuadrada. La señal está compuesta por un valor alto y un valor bajo, en nuestro caso 5 y 0 voltios respectivamente (Figura 36).

La relación entre el tiempo que la señal está en alto en comparación con la que está en bajo se conoce como ciclo de trabajo y normalmente se expresa en un tanto por ciento (%). Una señal como la siguiente esta 1ms arriba y 1 ms a cero, por lo que su ciclo de trabajo es de un 50%. La tarjeta arduino nos permite la modulación de ancho de pulso (PWM).

Figura 36: Pulso de forma cuadrada



Fuente: hoja de datos del dispositivo Arduino

3.4. Etapa experimental

Después de considerar el proceso de secado (ver anexos) se procede a generar el mapa de reglas de valoración para la velocidad del ventilador se muestra en la Figura 37.

El análisis, en base a los conocimientos previos, es el siguiente:

El proceso se ejecuta, hasta que, la humedad del alimento sea menor o igual al 20%, para esto, el sistema, hace un control de la temperatura del deshidratador, cambiando el flujo de aire, para sacar el vapor que se genera, debido a la evaporación del alimento dentro del deshidratador. Por ejemplo, si la humedad de la fruta se halla en el rango de [10-20]%, y si la temperatura está en el rango de [10-25] °C, entonces, la velocidad del ventilador estará en el rango de [5-10]%. Dependiendo de la cantidad de humedad en la fruta, el sistema difuso disminuye o incrementa la velocidad del ventilador.

La aplicación de la lógica de control difuso, es capaz de tomar decisiones y realizar acciones respectivas sobre el ventilador, que es el dispositivo encargado de forzar el flujo de la masa de aire caliente-húmedo, generando el calor necesario para producir la deshidratación. Ya que, la lógica de control difuso, que se plantea

en el presente trabajo, consiste en hacer que la temperatura a la que se encuentra la fruta a ser deshidratada este en función de la cantidad de humedad que tiene la misma, ambas variables irán decreciendo a medida que transcurra el tiempo, es decir, ambas serán dependientes del tiempo de forma implícita.

Figura 37: Mapa de reglas para la velocidad del ventilador para el Plátano

VELOCIDAD (%)		HUMEDAD (%)		
		10-20	20-60	60-90
TEMPERATURA	10-25	[5..10]	[10..25]	[25..50]
	25-55	[0..5]	[25..50]	[50..75]
	55-80	0	[50..75]	[75..90]

Fuente: Elaboración propia

La fuente de calor, es suministrado por una resistencia eléctrica, a la que se le complementa un ventilador, que funcionando en sincronía proporcionan flujo de aire caliente en la cámara de deshidratación. De acuerdo a los análisis y después de las pruebas de deshidratación para diversos productos, los alimentos deshidratados poseen bajo contenido de humedad y un buen estado de conservación. Los siguientes mapas son pruebas para otros productos (plátano Figura 37, pera Figura 38 y manzana Figura 39),

Figura 38: Mapa de reglas de la velocidad del ventilador para la Pera

VELOCIDAD (%)		HUMEDAD (%)		
		10-20	20-60	60-90
TEMPERATURA	10-25	[10..25]	[25..50]	[50..75]
	25-50	[0..5]	[25..50]	[50..75]
	50-80	[0..5]	[50..75]	[75-90]

Fuente: Elaboración propia

Figura 39: Mapa de reglas de la velocidad del ventilador para la Manzana

VELOCIDAD (%)		HUMEDAD (%)		
		10-20	20-60	60-90
TEMPERATURA	10-25	[5..10]	[25..50]	[50..75]
	25-50	[0..5]	[25..50]	[50..75]
	50-80	[0..5]	[50..75]	[75-90]

Fuente: Elaboración propia

En todos los casos las pruebas se verificaron, utilizando el método de deshidratación del sistema on/off, a diferentes temperaturas. En la Figura 40 y Figura 41, se muestran los resultados para las temperaturas de 30 y 50 grados centígrados respectivamente. El procedimiento fue el siguiente:

Muestra 1: En este caso se tiene una muestra de 200 gramos de plátano, los cuales se deshidratan en rodajas de 2 mm de espesor. El tiempo de secado es

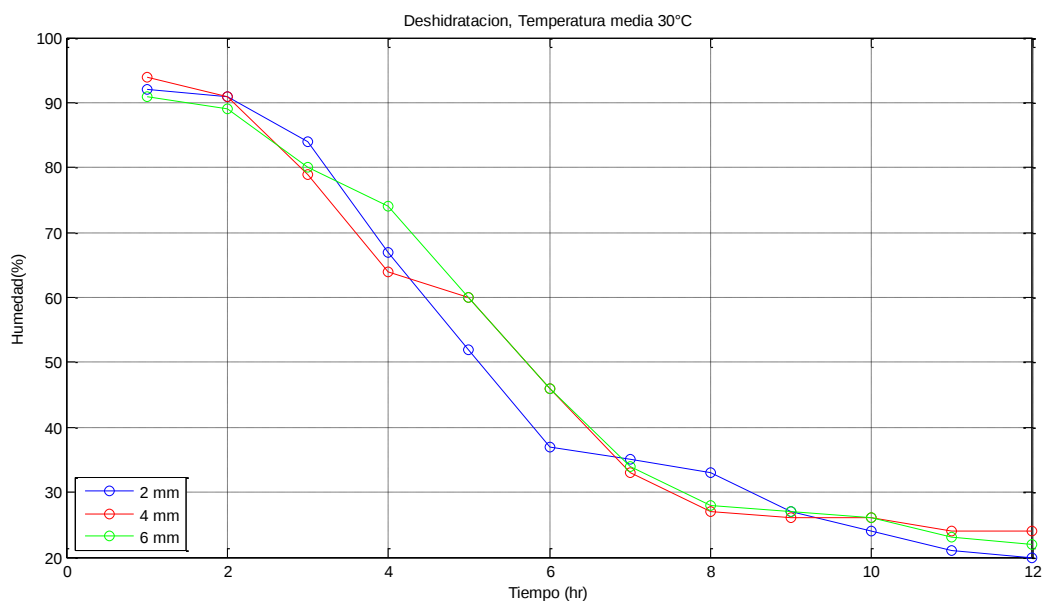
de 12 horas, presentándose en la siguiente tabla los resultados obtenidos para la mencionada muestra.

Muestra 2: En la muestra 2 también se tomó una masa de 200 gramos: el tiempo de secado se prolongó en 12 horas, esto se debe a que la muestra 2 tiene un espesor de aproximadamente 4 mm

Muestra 3: Continuando con un tercer experimento donde se puso rodajas de aproximadamente 6 mm de espesor.

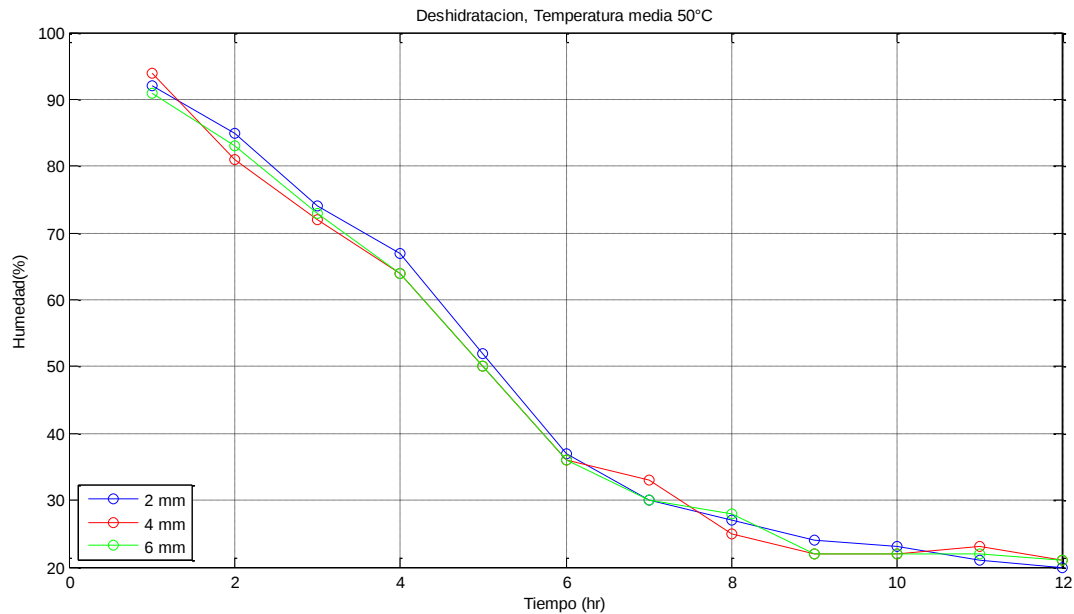
Como se puede comprender, las muestras de los alimentos, fueron cortadas en pequeños trozos, con la idea de apresurar la deshidratación.

Figura 40: Curvas experimentales de secado a 30 grados centígrados de temperatura



Fuente: Elaboración propia

Figura 41: Curvas experimentales de secado a 50 grados centígrados de temperatura



Fuente: Elaboración propia

De los resultados anteriores, se puede mencionar que, el tiempo de secado depende del volumen que tiene cada rodaja; si el trozo o la rodaja del producto es más delgada, se observa que, la deshidratación se realiza en menor tiempo.

El estudio y desarrollo experimental, de la deshidratación de los productos, que sustentan el presente trabajo de investigación, ha empezado desde preparación del producto (lavado y cortado), manipulación (determinación de la masa y espesor), hacer el seguimiento del tiempo de deshidratación, lecturas de temperatura y humedad y el control de las variables termodinámicas (humedad del producto al inicio del experimento).

Toda la parte experimental explicada anteriormente, es el fundamento con el que se procedió a definir las reglas difusas que modelan el comportamiento del deshidratador difuso (ver anexos).

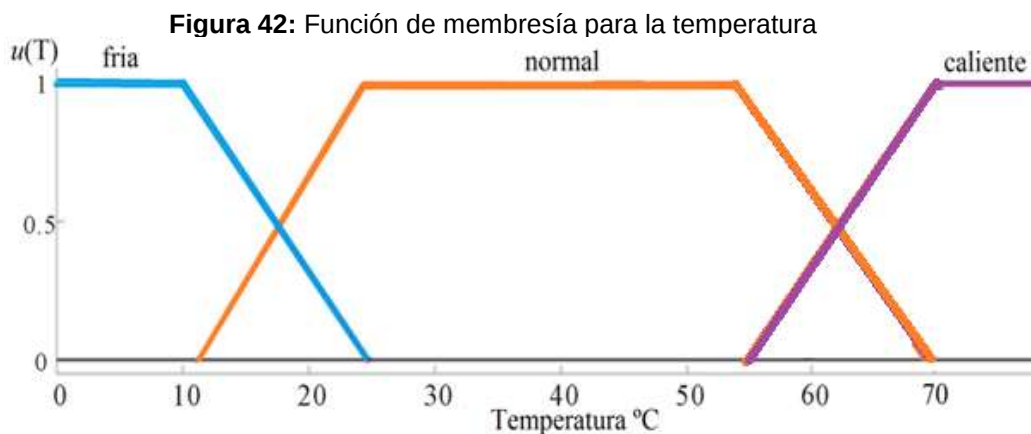
3.4.1. Diseño del controlador difuso

El modelo se mide tres variables termodinámicas, que son: la humedad relativa y la temperatura dentro del deshidratador y la humedad de la fruta a deshidratar. Estas variables termodinámicas, modulan el funcionamiento del ventilador (aumentando o disminuyendo la potencia del mismo) y la fuente de calor.

El proceso de trabajo, que realiza el deshidratador, es el siguiente: El punto de ajuste del deshidratador es menor o igual al 20% de humedad del producto (este valor es determinado a partir de las pruebas experimentales), que se desea deshidratar, dependiendo de que se ha alcanzado o no, la humedad requerida, el algoritmo difuso, cambiará la velocidad del ventilador y/o la temperatura, lo que causara que el aire húmedo o vapor dentro del deshidratador sea expulsado, y si el deshidratador, muestra que la humedad relativa está seca o próxima, verifica el valor de la humedad de la fruta, y si esta humedad está muy cercana al valor de ajuste, entonces el proceso se detiene.

3.4.2. Funciones de membresía

Las funciones de membresía, se diseñan en función a los resultados experimentales obtenidos en la deshidratación, las relaciones óptimas de las variables intervinientes en el proceso de deshidratación, tal como se aprecia en el mapa de reglas de valoración (Figuras 39, 38 y 37), con la ayuda de estos mapas, iniciamos la construcción de la función de membresía, tanto para la temperatura como para la humedad de la fruta (Figuras 42 y 43).



Fuente: Elaboración propia

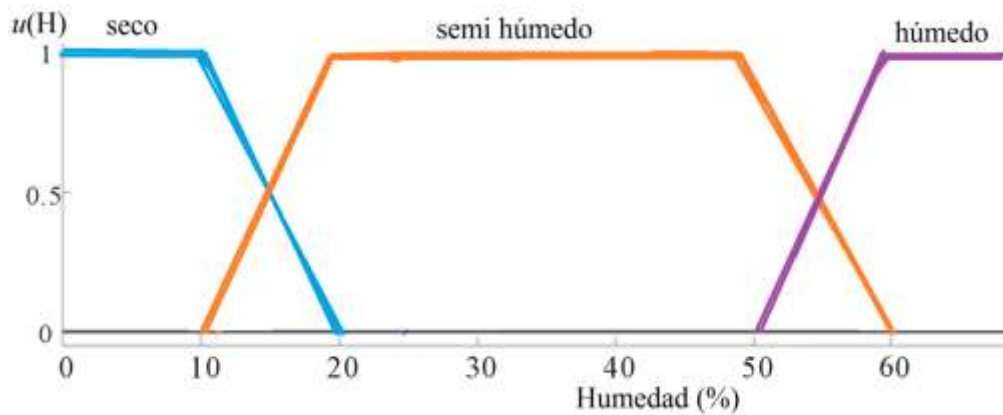
En la Figura 42, determinamos la función de membresía para la variable termodinámica, temperatura, y en la siguiente ecuación se consideran sus cinco funciones y rangos.

$$\mu(T) = \begin{cases} T_1 = 1 & T \leq 10^\circ\text{C} \\ T_2 = \frac{1}{15}[(25 - T) \cap (T - 10)] & 10 < T \leq 25^\circ\text{C} \\ T_3 = 1 & 25 < T \leq 55^\circ\text{C} \\ T_4 = \frac{1}{15}[(70 - T) \cap (T - 55)] & 55 < T \leq 70^\circ\text{C} \\ T_5 = 1 & T > 70^\circ\text{C} \end{cases}$$

Ecuación 3: Función de membresía para la temperatura

De una manera similar, se procede a la construcción de la función de membresía para la variable de la humedad (Figura 43), donde se consideran también cinco funciones y rangos como muestra la ecuación 4.

Figura 43: Función de membresía para la humedad



Fuente: Elaboración propia

$$\mu(H) = \begin{cases} H_1 = 1 & H \leq 10\% \\ H_2 = \frac{1}{10}[(20 - H) \cap (H - 10)] & 10 < H \leq 20\% \\ H_3 = 1 & 20 < H \leq 50\% \\ H_4 = \frac{1}{10}[(60 - H) \cap (H - 50)] & 50 < H \leq 60\% \\ H_5 = 1 & H > 60\% \end{cases}$$

Ecuación 4: Función de membresía para la humedad

Las reglas difusas, en este caso, se efectúan mediante combinaciones de múltiples entradas, dentro de un comando sencillo “IF-THEN”.

Considerando los objetivos del presente trabajo, desarrollamos un controlador de dos entradas, que son: temperatura y humedad de la fruta, y como salida, la velocidad del ventilador, entonces, definimos las variables de entrada, sea: H = Humedad y T = Temperatura, y Z = velocidad del ventilador, es la respuesta al control difuso. En realidad, el problema se reduce a analizar todas las combinaciones posibles entre las dos variables, determinando su salida, se puede pensar como el producto cartesiano de la humedad y la temperatura ($H \times T$), es decir, 25 elecciones posibles.

Las reglas para el presente trabajo se representan en el siguiente Mapa de reglas que trae la Figura 44 para las entradas que son la temperatura de la cámara y la humedad de la fruta.

Figura 44: Mapa de reglas para el controlador difuso

		TEMPERATURA (°C)				
		0 - 10	10 - 25	25 - 55	55 - 70	70 - 90
HUMEDAD (%)	0 - 10	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	10 - 20	OFF	OFF	FAST_0_2	FAST_0_3	OFF
	20 - 50	FAST_2_2	FAST_2_3	FAST_1_1	FAST_1_2	FAST_0_2
	50 - 60	FAST_2_3	FAST_2_2	FAST_1_3	FAST_1_4	FAST_0_3
	60 - 90	FAST_2_4	FAST_2_3	FAST_1_2	FAST_1_3	FAST_0_4

Fuente: Elaboración propia en base a las ecuaciones 2 y 3

Donde FAST_{i,j} se debe entender que, i representa 1 o 2 calentadores eléctricos y j varía desde 1 hasta 4, que representa a la velocidad que puede tener el ventilador (desde el 0%, apagado, hasta el 100%, girando a su velocidad máxima). A pesar, de que las resistencias de calefacción, pueden tomar únicamente 3 estados diferentes (ON, ON), (ON, OFF) y (OFF, OFF), la velocidad del ventilador,

puede encontrarse en uno de los siguientes 4 estados: (0-25%), (25-50%), (50-75%) y (75-100%), sin embargo, estos 4 estados, son determinados de acuerdo a las variables de entrada, si un valor se halla en el rango de (25-50%), dependiendo del valor de entrada, la velocidad del ventilador podrá estar más cerca del 25% o más cerca del 50%, es decir, dependerá de las reglas dadas por las ecuaciones (2) y (3), para esto, se utiliza la función propia del Arduino y del manejo del criterio de PWM, que significa, modulación por ancho de pulso.

Para hacer el seguimiento se tendrá una interfaz visual desarrollada en Processing (Figura 45) donde muestra el comportamiento de las variables que se muestran en el proceso de deshidratación(humedad de la fruta, temperatura, Velocidad del ventilador y Humedad relativa del deshidratador).

Figura 45: Interfaz visual del sistema de control



Fuente: Elaboración propia

3.5. Resultados

A) Análisis de la Humedad del producto.

Los datos que se estudian en esta sección corresponden a los de la variable humedad, estos registros se obtuvieron desde ambos experimentos: el de LOGICA DIFUSA y por ON-OFF, los mismos se tienen tabulados en las Tablas 1 y 2:

Fuente: Elaboración propia
MUESTRAS HUMEDAD DEL PLÁTANO POR LÓGICA DIFUSA

21,7	20,3	20,8	19,7	20,3
20,3	18,7	19,2	20,8	21,3
21,3	19,7	21,3	19,2	20,3
20,3	20,8	20,3	19,7	20,8
19,7	21,3	19,2	21,7	20,3
20,8	20,3	22,2	19,7	20,8

Tabla 1: Datos de humedad del plátano deshidratada según el método Lógica Difusa

MUESTRAS HUMEDAD DEL PLÁTANO POR ON/OFF

20,8	20,8	22,7	20,3	22,2
21,3	22,2	19,7	21,7	20,8
21,7	22,7	20,8	19,2	20,3
21,7	21,3	22,2	20,8	22,2
22,7	20,8	20,3	20,3	21,3
21,3	19,7	22,2	21,3	21,7

Tabla 2: Datos de humedad del plátano deshidratada por el método ON-OFF

Se analizan los datos de humedad obtenidos de cada modelo (LOGICA DIFUSA vs ON-OFF), estos registros fueron obtenidos desde cada uno de los sensores de humedad adjuntos a cada trozo de fruta que se estuvo deshidratando. Los mismos datos nos informan sobre la calidad del producto, es decir, que método ha sido el más eficaz para realizar el deshidratado de frutas.

Para realizar este estudio nuestras hipótesis las planteamos de la siguiente manera:

H0 = NO existe una diferencia significativa entre la media de los datos de humedad del método ON-OFF vs el modelo de LOGICA DIFUSA.

H1= Existe una diferencia significativa entre las medias de los datos de humedad del grupo ON-OFF y la media del método obtenido por LOGICA DIFUSA.

Determinación de la significancia α :

Sabemos que el nivel α es el porcentaje de error que estamos dispuesto a cometer en la realización de nuestra prueba estadística, tomaremos en nuestro caso el nivel de significancia igual al 5 por ciento.

Elección de la prueba estadística

Puesto que se requiere comparar los datos deshidratación de plátanos y la variable humedad del método de deshidratación ON-OFF de aquel realizado por el método de LOGICA DIFUSA, debemos el tipo estudio de nuestro análisis (tabla 3)

Fuente: Elaboración propia en base al libro de Garrett 2012, England

		PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS			PRUEBAS PARAMÉTRICAS
Variable aleatoria Variable Fija		NOMINAL DICOTÓMICA	NOMINAL POLITÓMICA	ORDINAL	NUMÉRICA
Estudio Transversal Muestras independientes	Un grupo	χ^2 Bondad de Ajuste Binomial	χ^2 Bondad de Ajuste	χ^2 Bondad de Ajuste	T de Student (una muestra)
	Dos grupos	χ^2 Bondad de Ajuste - Corrección de Yates - Test exacto de Fisher	χ^2 de Homogeneidad	U Mann - Withney	T de Student (muestras independientes)
	Más de dos grupos	χ^2 Bondad de Ajuste	χ^2 Bondad de Ajuste	H Kruskal - Wallis	ANOVA con un Factor INTER sujetos
Estudio Longitudinal Muestras Relacionadas	Dos medidas	Mc Nemar	Q de Cochran	Wilcoxon	T de Student (muestras Relacionadas)
	Más de dos medidas	Q de Cochran	Q de Cochran	Friedman	ANOVA para medidas Repetidas (INTRA sujetos)

Tabla 3: Variables de elección de pruebas estadísticas

Puesto que nuestros registros de la variable humedad en cada proceso de deshidratación son distintos e independientes para ambas muestras. El análisis corresponde a un estudio transversal ya que, todo el proceso de deshidratación se ha realizado en un mismo momento, siendo la variable aleatoria la numérica, es decir:

Fuente: Elaboración propia en base al libro de Garrett 2012, England

		PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS			PRUEBAS PARAMÉTRICAS
Variable aleatoria Variable Fija		NOMINAL DICOTÓMICA	NOMINAL POLITÓMICA	ORDINAL	NUMÉRICA
Estudio Transversal Muestras independientes	Un grupo	χ^2 Bondad de Ajuste Binomial	χ^2 Bondad de Ajuste	χ^2 Bondad de Ajuste	T de Student (una muestra)
	Dos grupos	χ^2 Bondad de Ajuste - Corrección de Yates - Test exacto de Fisher	χ^2 de Homogeneidad	U Mann - Withney	T de Student (muestras independientes)
	Más de dos grupos	χ^2 Bondad de Ajuste	χ^2 Bondad de Ajuste	H Kruskal - Wallis	ANOVA con un Factor INTER sujetos
Estudio Longitudinal Muestras Relacionadas	Dos medidas	Mc Nemar	Q de Cohran	Wilcoxon	T de Student (muestras Relacionadas)
	Más de dos medidas	Q de Cohran	Q de Cohran	Friedman	ANOVA para medidas Repetidas (INTRA sujetos)

Tabla 4: Prueba paramétrica elegida para comparación de los resultados.

Lectura del valor de significancia: P- valor

Para el caso de la prueba de t-student la que consiste de dos muestras independientes tenemos que confirmar antes los tres supuestos de:

1. Normalidad de la variable **humedad**
2. Igualdad de varianza
3. Independencia

1. En el caso de **normalidad**. Se debe confirmar que la variable aleatoria en ambos grupos se distribuye normalmente. Para ello se utiliza la prueba de **Kolgomorov-Smirnov**, K-S una muestra cuando las muestras son grandes ($n > 30$) (prueba de **Shapiro Wilk** cuando el tamaño de la muestra es < 30). El criterio para determinar si la varianza se distribuye normalmente es:
 - $P\text{-valor} \geq \alpha$, Entonces, aceptar H_0 = Los datos provienen de una distribución normal.
 - $P\text{-valor} < \alpha$, Entonces, aceptar H_1 = Los datos NO provienen de una distribución normal.
2. Mientras que la **igualdad de varianza** (Prueba de Levene) se debe corroborar la igualdad de varianza entre los grupos.
 - $P\text{-valor} \geq \alpha$. Entonces aceptar H_0 = Las varianzas son iguales.
 - $P\text{-valor} < \alpha$. Entonces aceptar H_1 = Existe diferencia significativa entre las varianzas
3. El supuesto de **independencia** se lo aplica a aquellos sucesos en los cuales los datos registrados son independientes uno de otro, es decir, que los datos considerados fueron adquiridos en pruebas independientes, tal como ocurre en nuestra investigación, los datos del método ON-OFF son independientes del método de LOGICA DIFUSA.

Calculo de P-valor de la prueba

En la tabla 5 se tiene a algunos estadígrafos de los parámetros de tendencia central y de dispersión de ambos conjuntos de datos (LOGICA DIFUSA y ON-OFF). Mientras que en la tabla... es un ajuste a la prueba de Kolgomorov-Smirnov, de donde se observa un valor de $p=0.137$ para el método de LOGICA DIFUSA y $p=0.200$ (ON-OFF) que confirma a nuestros datos como ajustable a una distribución normal (distribución simétrica)

Fuente: Elaboración propia

Descriptivos				
Método			Estadístico	Error estándar
LOGICA DIFUSA	Media		20,4267	0,15365
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	20,1124	
		Límite superior	20,7409	
	Media recortada al 5%		20,4241	
	Mediana		20,3000	
	Varianza		0,708	
	Desviación estándar		0,84156	
	Mínimo		18,70	
	Máximo		22,20	
	Rango		3,50	
	Rango intercuartil		1,23	
	Asimetría		0,004	0,427
	Curtosis		-0,405	0,833
ON-OFF	Media		21,2333	0,17109
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	20,8834	
		Límite superior	21,5833	
	Media recortada al 5%		21,2556	
	Mediana		21,3000	
	Varianza		0,878	
	Desviación estándar		0,93710	
	Mínimo		19,20	
	Máximo		22,70	
	Rango		3,50	
	Rango intercuartil		1,52	
	Asimetría		-0,223	0,427
	Curtosis		-0,596	0,833

Tabla 5: Estadígrafos de los datos de humedad para comparación de los resultados.

Fuente: Elaboración propia

Pruebas de normalidad						
Método	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
LOGICA DIFUSA	0,140	30	0,137	0,968	30	0,484
ON-OFF	0,116	30	0,200*	0,958	30	0,280
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Tabla 6: Ajuste de Kolmogorov –Smirnov para nuestros productos finales.

En la siguiente figura se tiene el diagrama de tallo y hojas correspondiente a ambos métodos de nuestro estudio.

Fuente: Elaboración propia

x Stem-and-Leaf Plot for Metodo = LOGICA DIFUSA			x Stem-and-Leaf Plot for Metodo = ON-OFF		
Frequency	Stem &	Leaf	Frequency	Stem &	Leaf
1,00	18 .	7	1,00	19 .	2
3,00	19 .	222	2,00	19 .	77
5,00	19 .	77777	4,00	20 .	3333
8,00	20 .	33333333	6,00	20 .	888888
6,00	20 .	888888	5,00	21 .	33333
4,00	21 .	3333	4,00	21 .	7777
2,00	21 .	77	5,00	22 .	22222
1,00	22 .	2	3,00	22 .	777
Stem width:	1,00		Stem width:	1,00	
Each leaf:	1 case(s)		Each leaf:	1 case(s)	
(a) LOGICA DIFUSA			(b) ON-OFF		

Figura 46: Grafico de tallo y hojas para los métodos de deshidratación.

Un gráfico Q-Q, Cuantil-Cuantil permite observar cuan cerca está la distribución de un conjunto de datos a alguna distribución ideal en nuestro caso a la distribución normal con el objeto de comparar la distribución de dos conjuntos de datos. En la figura 47 se muestra esta correlación de nuestros datos.

Fuente: Elaboración propia

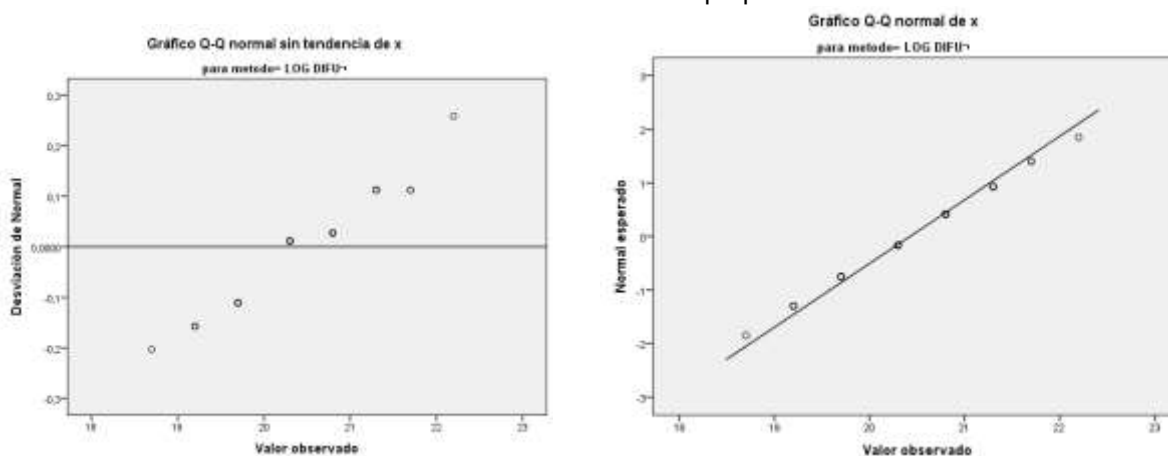


Figura 47: Figuras Q-Q normales

El diagrama de cajas y bigotes (Figura 48) nos informa sobre la mediana considerando los cuartiles, en ambas cajas, el 50 por ciento de los datos se encuentran dentro de ellas, observe los datos correspondientes al método de LOGICA DIFUSA, se muestran los datos de la variable humedad con valores menores en comparación a aquellos obtenidos por el método ON-OFF.

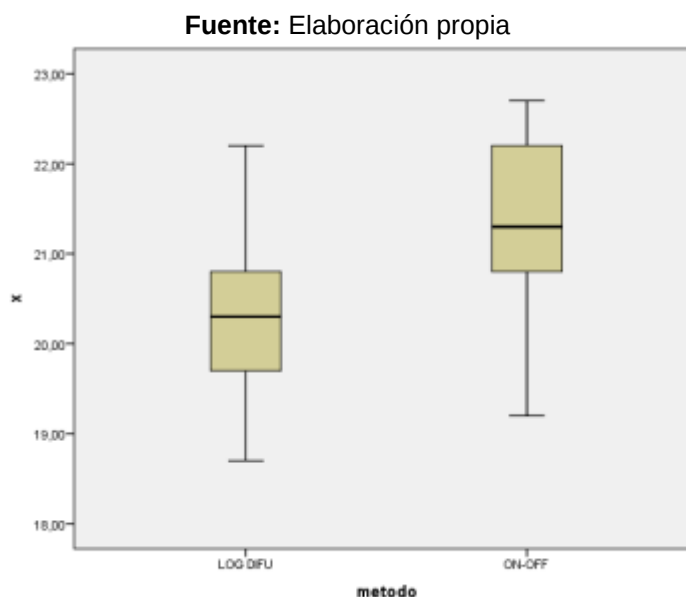
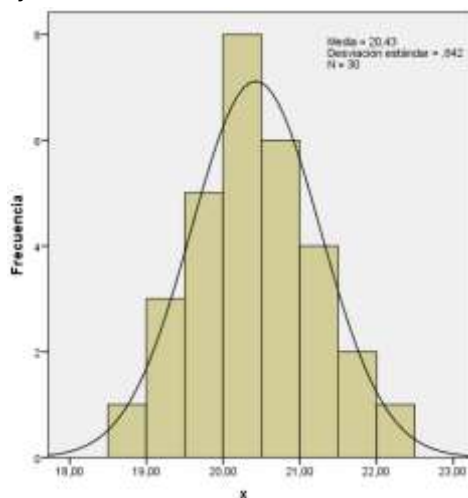


Figura 48: Diagramas de cajas para ambos métodos.

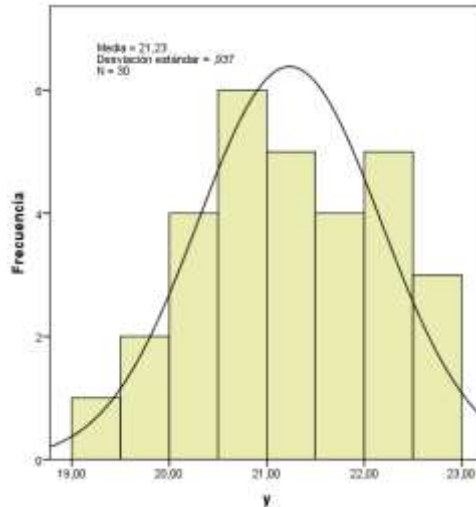
En las Figuras 49 y 50 se tienen a los datos de humedad ajustados a una distribución normal para ambos métodos LOGICA DIFUSA y ON-OFF.

Figura 49: Datos ajustados a la distribución normal. LÓGICA DIFUSA



Fuente: Elaboración propia

Figura 50: Datos ajustados a la distribución normal. ON-OFF



Fuente: Elaboración propia

Criterio para determinar Normalidad

De la Tabla 7 correspondiente a las pruebas de normalidad observamos que siguiendo el análisis de Kolmogorov –Smirnov que se ajusta en nuestro caso a:

- $P\text{-valor} \geq \alpha$. Entonces aceptar H_0 = Los datos provienen de una distribución normal
- $P\text{-valor} < \alpha$. Entonces aceptar H_1 = Los datos NO provienen de una distribución normal

Entonces el fundamento de nuestros resultados da como conclusión:

Fuente: Elaboración propia

Normalidad (datos de la humedad)		
P-valor (LOGICA DIFUSA) = 0.137	>	$\alpha = 0.05$
P-valor (ON-OFF) = 0.200	>	$\alpha = 0.05$
CONCLUSION: La variable humedad en ambos métodos LOGICA DIFUSA y ON-OFF se comparta siguiendo una distribución normal.		

Tabla 7: Normalidad de la humedad

Supuesto de igualdad de varianza

Por otro lado, el requisito de igualdad de varianza, se deduce con el análisis t-student (Tabla 8).

Fuente: Elaboración propia

Prueba de muestras independientes									
	Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
	F	Sig.		gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
								Inferior	Superior
Se asumen varianzas iguales	0,488	0,488	-3,508	58	0,001	-0,80667	0,22996	-1,26697	-0,34636
No se asumen varianzas iguales			-3,508	57,342	0,001	-0,80667	0,22996	-1,26709	-0,34625

Tabla 8: Prueba de muestras independientes

Igualdad de varianza

Nuestra hipótesis era:

- $P\text{-valor} \geq \alpha$. Entonces aceptar H_0 = Las varianzas son iguales.
- $P\text{-valor} < \alpha$. Entonces aceptar H_1 = Existe diferencia significativa entre las varianzas

Según estos últimos resultados, la significancia es 0.488, por lo tanto, la conclusión es:

Fuente: Elaboración propia

Igualdad de varianza (datos de la humedad)		
P-valor = 0.488	>	$\alpha = 0.05$
CONCLUSION: Como el P-valor es mayor que α , entonces las varianzas son iguales.		

Tabla 9: Igualdad de varianza de la humedad

Por lo tanto, se cumple con los tres supuestos, de independencia, de normalidad, así como de igualdad de varianza.

Ahora, observando los resultados de arriba, el análisis **t-student** nos da un valor de significancia igual a 0,001 (en ambos casos se tiene el mismo valor)

Como el criterio de hipótesis considerado es:

- Si la probabilidad obtenida $P\text{-valor} > \alpha$, Entonces NO rechace H_0 , (se acepta H_0)

- Si la probabilidad obtenida $P\text{-valor} \leq \alpha$, Entonces rechace H_0 , (se acepta H_1)

Fuente: Elaboración propia

Prueba t-student		
P-valor = 0.001	<	$\alpha = 0.05$
CONCLUSION: Como el P-valor es mucho menor que α , entonces se rechaza la hipótesis H_0 , aceptando H_1 . Es decir, que ambos datos son diferentes. En este caso el método de la LOGICA DIFUSA tiene un valor medio de la variable humedad igual a 20.4, la que es menor al método realizado por el método ON.OFF (21.2)		

Tabla 10: Prueba t-student

Adicionando al análisis de la humedad del producto se realizaron pruebas químicas en el laboratorio de Bromatología para determinar la calidad del producto teniendo en cuenta su humedad y las proteínas que contiene, ver Anexos.

B). Análisis del tiempo de secado

De acuerdo a las diferentes pruebas realizadas con las frutas (plátano, manzana y pera), se obtuvieron los siguientes resultados

1.- Para el proceso difuso, utilizando el modelo de Takagi-Sugeno-Kang, el plátano alcanza su límite de deshidratado (20%), después de lapsos de tiempo,

menores a 8 horas (dependiendo del espesor o tamaño de corte), esto ocurre debido a la rápida expulsión de masa de aire caliente húmeda (vapor del deshidratado) mediante el ventilador, que puede adoptar cuatro rangos de velocidades [0-25%, 25-50%, 50-75%, 75-100%], dependiendo de la temperatura y de la humedad dentro de la cámara del deshidratador, así como también, de la humedad presente en el plátano. La Figura 51 permite apreciar las curvas de deshidratación entre el modelo de Takagi-Sugeno-Kang y el modelo ON/OFF.

Fuente: Elaboración propia

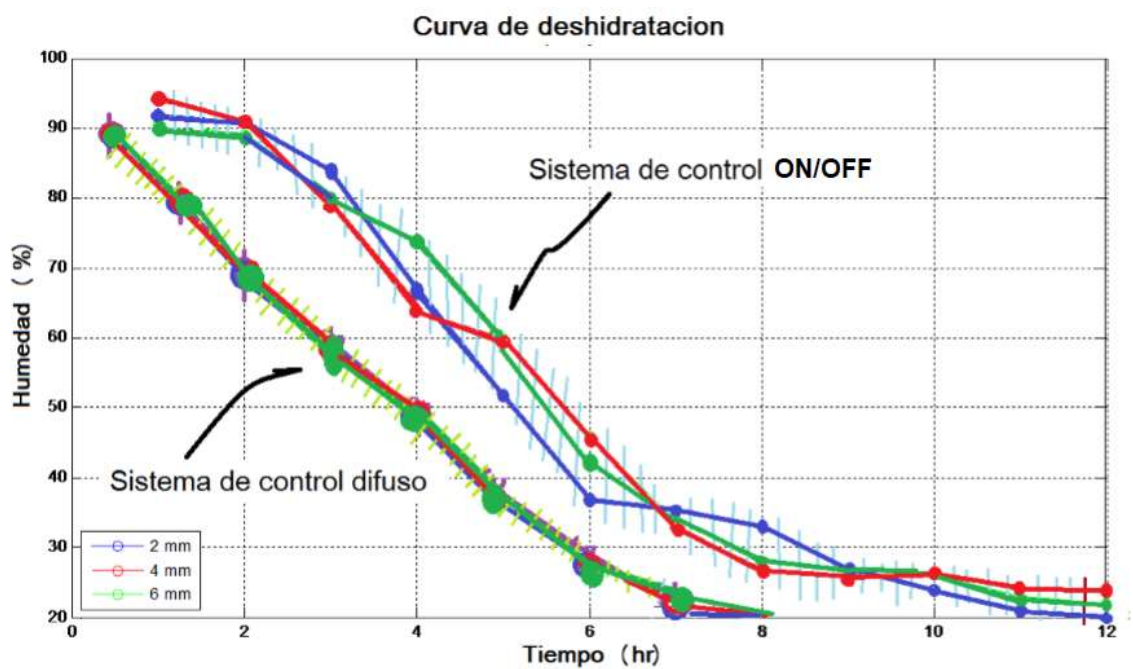


Figura 51: Curva de deshidratación de control Difuso vs ON/OFF

2.- El comportamiento de la cámara deshidratadora ofrece una mejoría para los tiempos de deshidratación de frutas, en relación a los procesos ON/OFF, es decir, existe una reducción, en el tiempo del proceso de deshidratado, esto se puede apreciar en la Tabla 11. De acuerdo a estos resultados, se puede decir que, el proceso difuso, mejora los tiempos de deshidratación, tal como ya se había mencionado antes, esto es debido a que, el modelo TSK, utiliza la expulsión de la masa de aire caliente húmedo, mediante el método de convección forzada. La Tabla 11 muestra la diferencia de tiempos ponderados entre ambos métodos.

Fuente: Elaboración propia

Sistema difuso			Sistema ON/OFF	
tiempo (hr)	Humedad (%)	$t \times H$	Humedad (%)	$t \times H$
1	90	90	90	90
2	82	164	85	170
3	70	210	75	225
4	62	248	68	272
5	53	265	52	260
6	41	246	38	228
7	35	245	30	210
8	22	176	28	224
9			25	225
10			22	220
11			20	220
12			19	228
	$\sum H_i = 455$	$\sum t_i H_i = 1644$	$\sum H_i = 552$	$\sum t_i H_i = 2574$
	$\langle t \rangle = \frac{\sum t_i H_i}{\sum H_i} = \frac{1644}{455} = 3.6 \text{ hr}$		$\langle t \rangle = \frac{\sum t_i H_i}{\sum H_i} = \frac{2574}{552} = 4.7 \text{ hr}$	

Tabla 11: Comparación de tiempos de deshidratado

3.- Debido a que el trabajo es novedoso, y las relaciones termodinámicas existentes en los textos de estudio, o son solamente teóricas, o se adaptan a otros ambientes, se analizaron las dependencias entre la temperatura, la humedad y la expulsión de masa de aire, de la cámara del deshidratador, por el método de convección forzada. A estas relaciones luego, se les aplico las reglas de inferencia del modelo difuso Takagi-Sugeno-Kang.

Donde la salida son funciones lineales dependientes de la humedad y temperatura, (A , B , C y D son constantes que se determinaron mediante procesos de

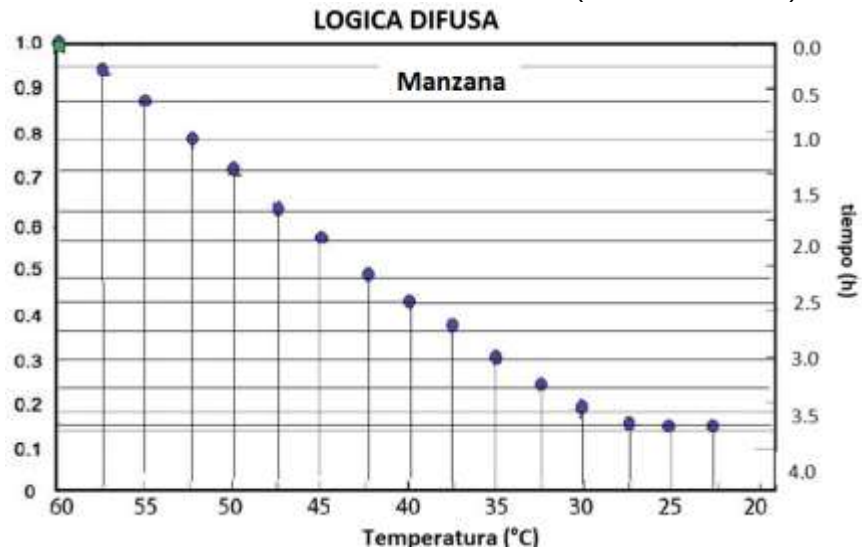
$$\text{if } \sum_{i=1}^n [(H \neq H_i)] \text{ and } [(T \neq T_i)] \text{ then } z = (A + BH_i) \pm (C + DT_i)$$

regresión lineal múltiple) tal y como lo exige el modelo de TKS.

4.- Para un estudio completo, se han construido dos prototipos de deshidratador, el primero posee una geometría cúbica o paralelepípedo, mientras que el segundo, posee una geometría tubular. Los análisis realizados en el primer prototipo (cúbico) han mostrado la existencia de un flujo no laminar de la masa de aire expulsado por convección forzada, es decir, se presentan pequeños remolinos en las aristas de la cámara (esto fue determinado mediante mediciones realizadas durante las primeras etapas de la investigación) medidos por un sensor de flujo YF-S201, esta medición, fue realizada durante el proceso de la toma de datos para la formulación del modelo. El hecho de la existencia de pequeños remolinos de aire, hacían que en los resultados se presentaban fluctuaciones de una medición a otra, debido a este hecho, se procedió a la construcción de una cámara tubular, en la cual, este efecto desaparece ya que, debido a la geometría de la cámara, los flujos de masa de aires son flujos laminares.

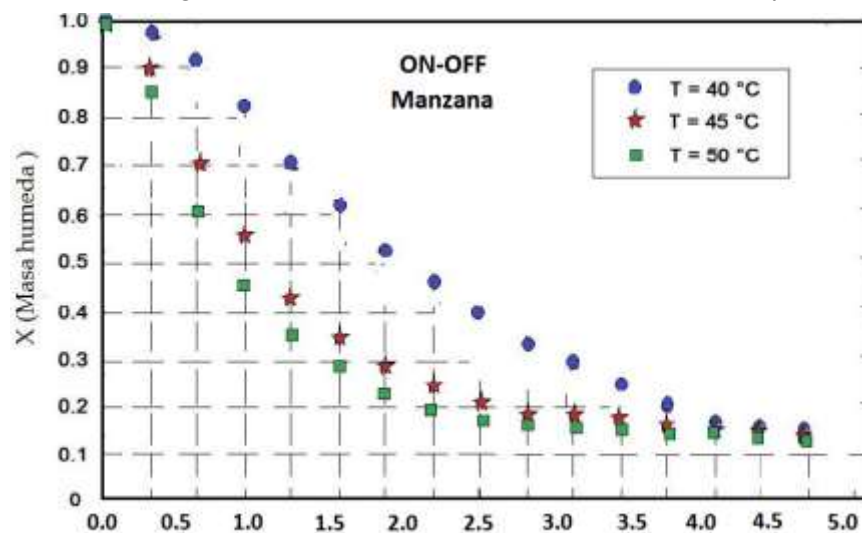
5.- Con relación a las otras frutas el comportamiento de deshidratación es similar a la que ocurre con el plátano, es decir se reduce el tiempo del proceso como muestran las siguientes figuras.

Figura 52: Curva de deshidratación de la manzana (LOGICA DIFUSA)



Fuente: Elaboración propia

Figura 53: Curva de deshidratación de la manzana (ON/OFF)



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el tiempo es reducido siguiendo el método de la LOGICA DIFUSA en lugar del método ON-OFF. En el caso de la pera, por el método ON-OFF el tiempo de deshidratación se encuentra entre 3 y 4 horas; mientras que por LOGICA DIFUSA se tiene un lapso cerca a las 3 horas (ver Tabla 11).

3.6. Comprobación de la hipótesis

De acuerdo a los resultados obtenidos, la aplicación de algoritmos difusos en un sistema de control automatizado de un deshidratador de frutas proporciona una mejora frente a métodos por convección forzada.

Esta mejora se puede observar en el tiempo de deshidratación de la fruta, donde se obtuvo un menor tiempo en el control difuso que en el control On/Off.

Respecto a la calidad del producto, el modelado difuso proporciona una distribución más homogénea del deshidratado de frutas frente al control On/Off. Además, se realizó una prueba físico-química realizada por una institución bromatológica de especialidad, la cual certifica sobre la calidad del producto obtenido realizando una descripción de porcentaje humedad y cantidad de proteínas que posee la fruta deshidratada estudiada, desde esta certificación se puede manifestar que efectivamente en el control difuso se conservan más proteínas y se tiene un producto más seco que el de control On/Off.

Así, se puede confirmar nuestra hipótesis previamente planteada.

3.7. Conclusiones y recomendaciones

- El presente trabajo de investigación presenta un sistema de deshidratación automatizado que ayuda a deshidratar frutas. Estas frutas deshidratadas se utilizan complementando la alimentación en el estado nutricional de la población; además, creemos que nuestro aporte a la propuesta gubernamental del “vivir bien”, se encuentra en el hecho de que estos prototipos implementados en este trabajo de investigación pueden ser replicados por una amplia gama de personas, ya sea dedicadas o no al ámbito de la alimentación; ya que, con la introducción de las cámaras de deshidratación similares al prototipo, la población interesada puede dar inicio a la formación de microempresas familiares (Mypes) de productos deshidratados.
- Se realizó con instrumentación propia y no costosa el respectivo análisis de los procesos termodinámicos que intervienen en el deshidratado de frutas.
- Todos los algoritmos matemáticos han sido determinados a partir del trabajo experimental, para lo cual se determinaron las curvas de deshidratación de las frutas estudiadas, este es un paso fundamental para desarrollar el algoritmo difuso para luego poner a prueba la hipótesis, además, es una de las etapas de la metodología científica.
- Las cámaras de deshidratación fueron construidas, con materiales accesibles en nuestro medio y tales cámaras realizan sus funciones mediante un sistema de control automatizado, el cual está fundamentado en un algoritmo de la lógica difusa del modelo

Takagi-Sugeno-Kang relacionando las variables termodinámicas que intervienen en el proceso de deshidratación.

- Se estudio la mejor alternativa de control para la deshidratación de frutas, es decir, aquella que pueda mejorar el contenido nutricional del producto final.
- Se obtuvo una certificación externa por medio de una institución nacional dedicada al ámbito de los alimentos con el objeto de apoyar la hipótesis planteada.
- Finalmente, y lo más importante, se ha demostrado que el proceso de deshidratación utilizando la lógica difusa y la extracción de las masas de aire por convección forzada, permiten una ganancia en factores temporales y de calidad, frente al deshidratado convencional, tal como lo es el sistema ON/OFF.
- Se recomienda trabajar en estructuras tubulares más que en las cúbicas, debido a la existencia de pequeñas perturbaciones de flujo de masas de aire caliente en las esquinas dentro de la cámara de la estructura cúbica, en cambio en la estructura tubular el flujo de aire es más homogéneo.

IV. Referencias

A., Ibrahim. 2010. *Fuzzy logic for embedded systems applications*. Amsterdam : Elsevier Science, 2010.

A., Taher. 2012. *Fuzzy systems*. Croacia : Vukovar, 2012.

A., Terwari. 2004. *Modern control desing with MATLAB and SIMULINK*. New York : Jhon Wiley & Sons, 2004.

Alcántara, Ada Hazael Ruiz. 2007. *Control difuso Vs. Control PID: Análisis y simulación numérica*. Hidalgo : s.n., 2007.

Alonso, Maritza Itzel Valencia. 2014. *Diseño, Construcción y Evaluación de un prototipo de secado solar para el proceso de secado de tomates*. Veracruz : s.n., 2014.

Automatización de un Secador Convectivo de Aire Caliente para fines de Docencia en Ingeniería de Alimentos. Saavedra, Jorge, y otros. 2008. Santiago : Información Tecnológica, 2008, Vol. 19.

Barrera, Jacqueline Hurtado de. 2008. *Metodología de la investigación, una comprensión holística*. Caracas : Quirón-Sypal, 2008.

Blanik, Deshidratador de alimentos. Manual de usuario BDA020.

Bojadziev, G. y Bojadziev , M. 2008. *Fuzzy logic for bussiness, finance and managment*. New Jersey. USA : World scientific, 2008. 2ed.

BOLIVIA. 2009. Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia. 2009.

Bolivia entre los países con mayor desnutrición. Día, El. 2011. 2011.

Cinetica de secado del Pimenton. Vega, A. 2005. Chile : s.n., 2005.

Comparación entre un controlador difuso y un controlador pid para un motor universal.

J., Díaz y F., Muñoz. 2012. 2, s.l. : Revista electrónica de la facultad de ingeniería, 2012, Vol. 1.

Control de Temperatura Utilizando Lógica Difusa. **Palacio-Gómez, C. y García-Sucerquia, J. 2010.** Colombia : Revista Colombiana de Física, 2010.

Control difuso de una plataforma móvil para el seguimiento de trayectorias. **Alzarte, Alfonso. 2007.** Pereira : Scientia et Technica, 2007.

Control Mediante Lógica Difusa. **R., Samir Kouro y M., Rodrigo Musamel. 2012.** s.l. : Técnicas Modernas de Automática, 2012.

D., Gustafson. 2006. *Software engineering.* s.l. : McGraw Hill, 2006.

Díaz, Jhon A. y Muñoz, Freddy E. 2012. *Diseño e implementación de un controlador Pid análogo para un motor universal.* 2012.

E., Mamdani. 1975. *Técnicas de compresión de tablas de datos mediante regresiones lineales, redes neuronales y sistemas fuzzy.* s.l. : Anaya, 1975.

El 13% de infantes sufre desnutrición crónica. **Pinto, Wendy. 2017.** Bolivia : Pagina Siete, 2017.

El boliviano consume más masas, frituras y bebidas ultraprocesadas. **Cuevas, Alwja. 2015.** Bolivia : La Razón, 2015.

En Bolivia baja la desnutrición, pero alertan por la mala alimentación. **Veliz, Rafael. 2017.** Bolivia : El Deber, 2017.

Espinosa, J., Vanderwalle, J. y Wertz , V. 2007. *Fuzzy logic identification and predictive control.* London : Springer-Verlag, 2007.

Garret, Henry E. 2012. *Statistics in psychology and education.* England : Longmans, green and Co., 2012.

Introducción al método científico y sus etapas. **Castán, Yolanda.** s.l. : Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud.

J., Carbonell, y otros. 2010. *Deshidratación de frutas y hortalizas con aire ambiente.* Valencia. España : Instituto de Agroquímica, 2010.

J., Galindo, A., Urrutia y M., Plattini. 2008. *Fuzzy databases: modeling, desing and implementation.* London : Idea group publishing, 2008.

J., Harris. 2010. *Fuzzy logic applications in engineering science.* s.l. : Springer, 2010. 2da Ed.

J., Rios. 2005. *Análisis y diseño de controladores basados en lógica difusa.* Guatemala : s.n., 2005.

J., Ruiz. 2013. *Metodología científica.* Brasil : Atlas, 2013.

L., Wang. 2009. *Model predictive control system design and implentation using Matlab.* London : Springer, 2009.

Linares Aguirre, Cecilia Carolina y Turcios Maquez, Abraham Orlando. 2017. *Diseño y construcción de un equipo de climatizado evaporativo automatizado para fines didácticos.* Salvador : s.n., 2017.

M, Bonifacio. *Redes neuronales y sistemas difusos.* España : RA-MA. 2da Ed.

Marin, Patricio Valdéz. 2014. *Manual de deshidratación I.* 2014.

Martín, Miguel Ángel Moreno. *Filosofía Lean aplicada a la Ingeniería del Software.* España : s.n.

Modelado difuso Takagi-Sugeno para sintonizar un controlador por calefacción en un invernadero . **Fernández, Julio C. Ramos, y otros. 2015.** s.l. : Research in Computing Science, 2015.

Mujumdar, Arum. 2000. *Practical guide to industrial drying.* s.l. : Sakamon Devahastin, 2000.

Núñez, Arturo Espino. 2017. *CONTROL DE TEMPERATURA CON LÓGICA DIFUSA PARA UN SISTEMA DE ESPECTROSCOPIA LÁSER.* Mexico : s.n., 2017.

OCON y VIAN. 1952. *Elementos de la Ingeniería Química.* Madrid : Aguilar, 1952.

P., Demo. 2009. *Metodología científica en ciencias sociales*. Curitiba : Atlas, 2009. 3ra Ed..

Paucara, Ruben Oswaldo Nacho. 2016. *Sistema de control domotico basado en arduino, aplicación movil y voz*. La Paz : s.n., 2016.

Peleeeger, Shari Lawrence. *Ingeniería de software*.

R., Dorf. 2001. *Sistemas de control moderno*. s.l. : Addison Wesley Publishing Company, 2001. 6ta Ed..

R., Pressman. 2010. *Ingeniería del software. Un enfoque practico* . s.l. : McGraw Hill, 2010. 7ma Ed.

R., Young y D., Veldman. 2005. *Introducción a la estadística aplicada a las ciencias*. México : Trillas, 2005. 3ra Ed.

Ríos Rivas, Juan Ricardo. 2005. *Análisis y diseño de controladores basados en lógica difusa*. Guatemala : s.n., 2005.

Robert E, Treyball. *Operaciones con tranferencia de masa*. s.l. : McGraw-Hill.

Ruiz, Ramón. 2007. *El método científico y sus etapas*. México : s.n., 2007.

S., Ross. 2007. *Simulación*. Mexico : Prentice Hall, 2007. 2da Ed.

Science-Based Economic Development. **U., Raymon S. 1996.** New York : Academy of Sciences, 1996, Vol. 798.

SilveiraJ., Da y N., de Souza. 2010. *Fundamentos de la metodología científica*. s.l. : Pearson, 2010. 3ra Ed.

T., Ross. 2010. *Fuzzy logic with engineering applications*. s.l. : Wiley, 2010. 3ra Ed.

Un modelo de estimación de proyectos de software. **Gómez, Adriana, y otros. 2010.** 2010.

Velásquez, Luz Maria Contreras. *Aspectos teóricos de la operación de secado y su aplicación en productos sólidos.*

ANEXO A

CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

MEDIDAS

37 cm

44 cm

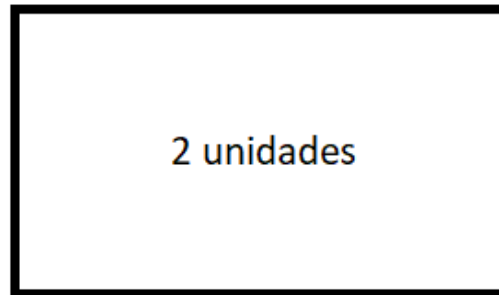


Vidrio de la parte superior

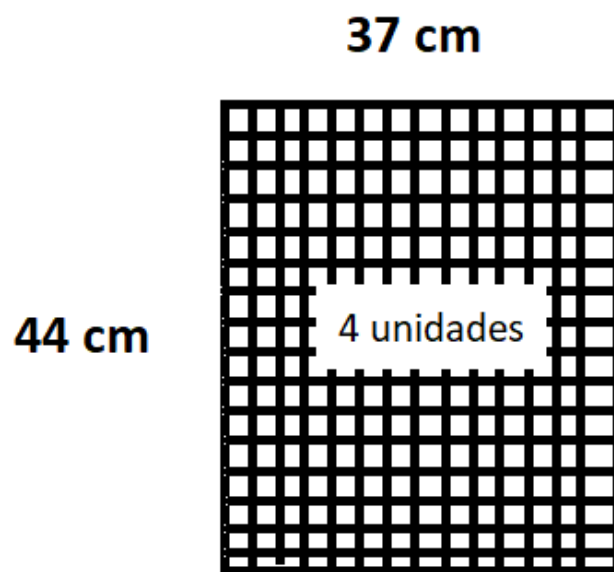
44 cm

32 cm

2 unidades

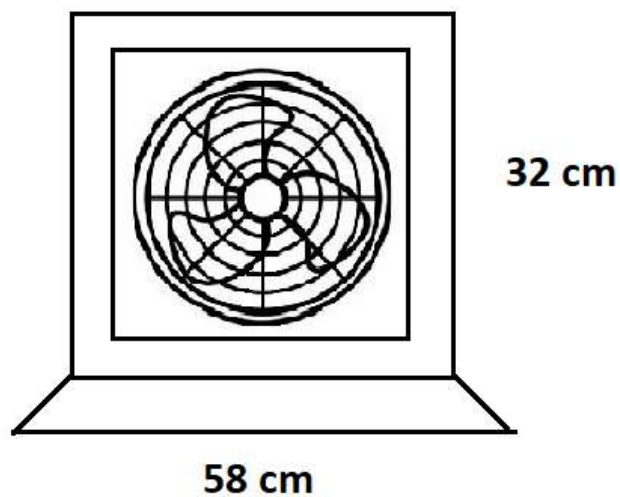


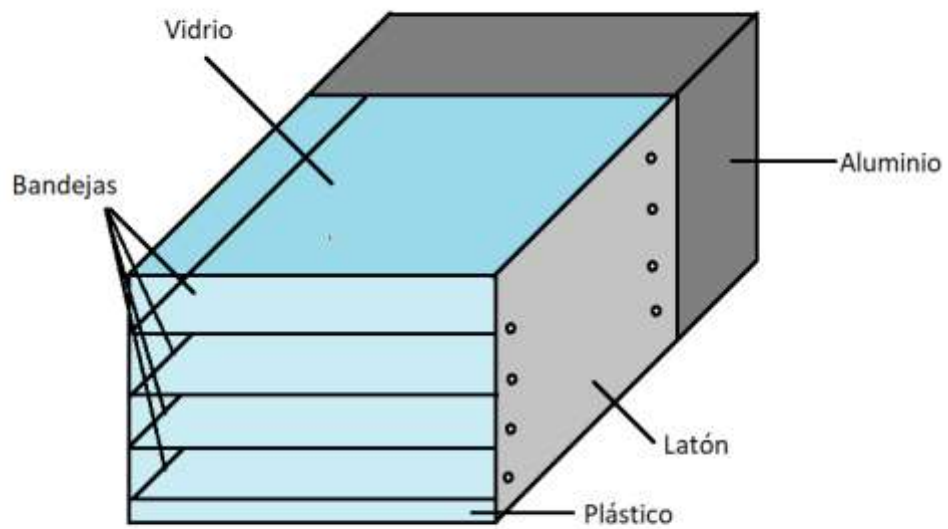
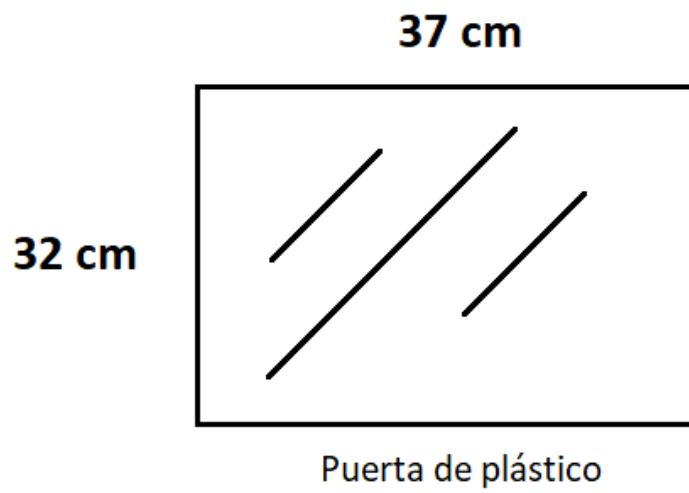
Latón de las partes
laterales tanto izquierda
como derecha



Bandeja con orificios donde se
secará el producto

Laminas de aluminio para cubrir
el ventilador y la parte inferior del
prototipo





Prototipo del deshidratador



Bandeja



Vista superior



Vista frontal



Vista trasera



Vista lateral



Vista general

ANEXO B

COSTOS

A continuación, se muestra los costos estimados del deshidratador, con todos los materiales utilizados.

Tabla 12: Costos de construcción

Componente	Cantidad	Valor unitario (Bs)	Valor total (Bs)
Placa Arduino UNO	1	80	80
Sensor de Temperatura	1	25	25
Sensor de humedad	1	30	30
Modulo Micro SD	1	35	35
Modulo RCT	1	40	40
Pantalla TFT	1	120	120
Relay de 5V	1	30	30
Protoboard	1	20	20
Conectores	40	0,5	20
Ventilador generador de calor	1	60	60
Resistencia eléctrica	1	50	50
Lamina de aluminio	2	20	40
Lamina de plástico	1	40	40
Vidrio	1	15	15
Bandejas	4	15	60
Aditivos	varios	-	30
		TOTAL	695Bs

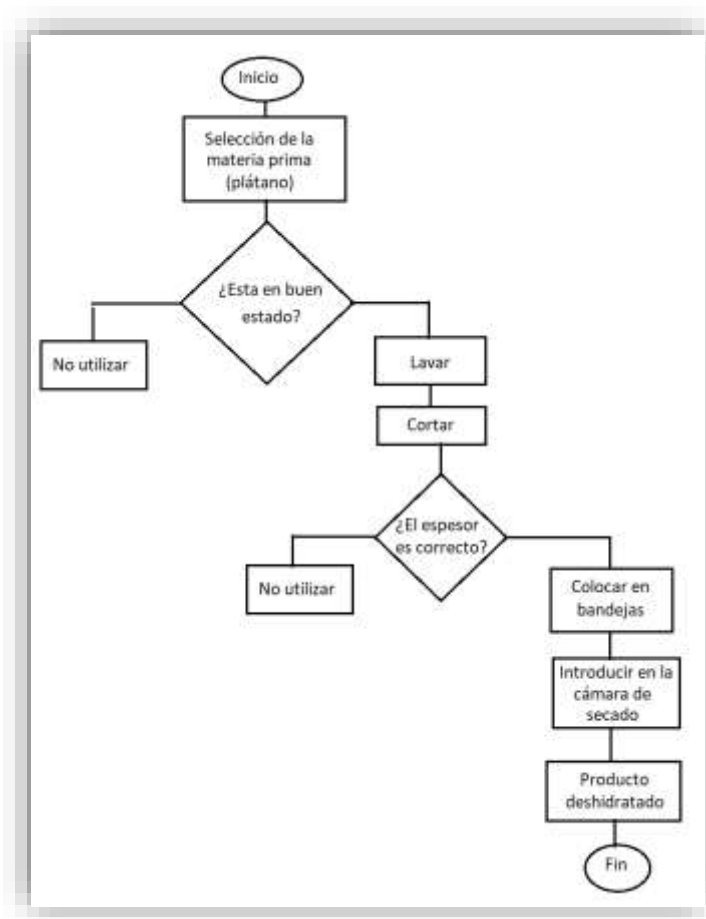
Fuente: Elaboración propia

ANEXO C

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

El presente trabajo de investigación, se fundamenta en el diseño experimental, donde se controla las siguientes variables: tiempo de deshidratación, temperatura y humedad. El proceso de secado y selección de producto se muestra en la siguiente figura.

Figura 54: Proceso del deshidratado y elección de la fruta



Fuente: Elaboración propia

Los plátanos fueron lavados y separados, luego fueron cortados en rodajas de 2, 4 y 6 mm de grosor como se muestran en las siguientes figuras.

En las pruebas se pesó la masa total del producto para comprobar la pérdida de humedad en el peso final y así obtener su peso sólido.



Figura 55: Plátano lavado y separado



Figura 56: Plátano cortado

Fuente: Elaboración propia

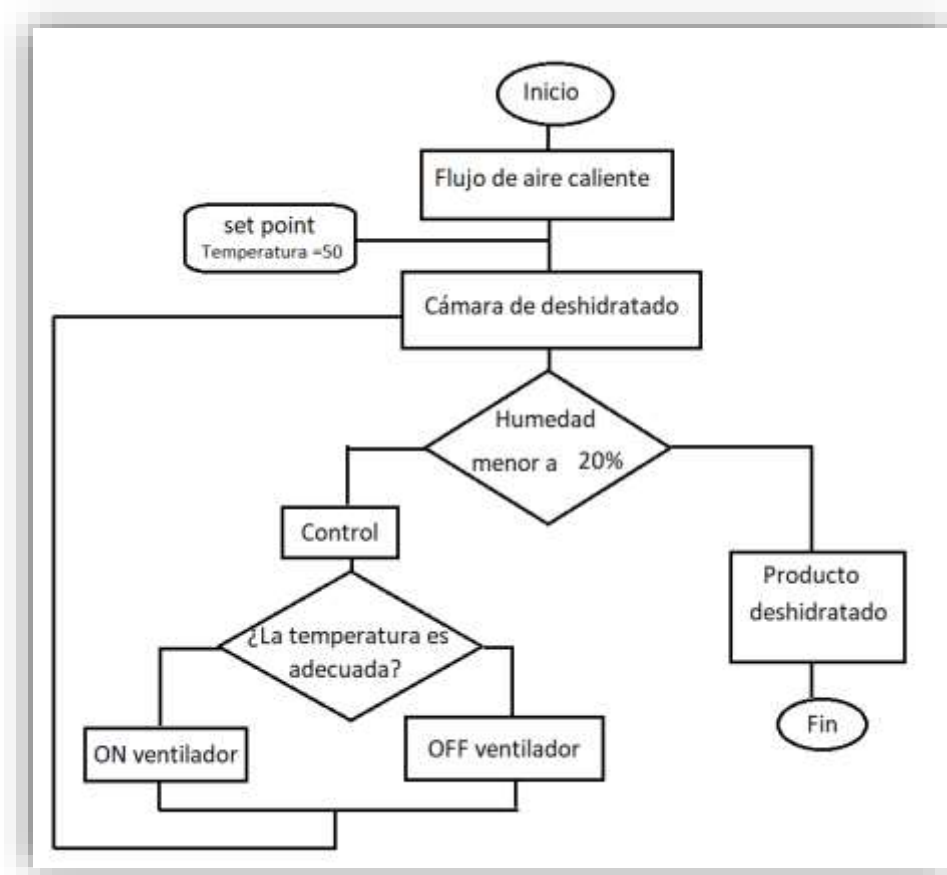
Una vez introducidos los plátanos a la cámara de secado se determinó que los mismos se encontraban secos cuando su humedad era menor a los 20 % ya que no perderán su agua en un 100%, para tener una explicación más clara del proceso de secado ver figura 54.

Se realizó tres experimentos con tres diferentes tipos de cortadura en rodajas en una temperatura constante de 50°C donde cada experimento tubo determinado tiempo

de finalización y se vio que el grosor del producto tiene una participación significativa en el tiempo de secado.

Mientras más grosor tenía el producto tardaba más tiempo en llegar a su pérdida de humedad y en el caso contrario a menor grosor tenía una respuesta más corta de secado, pero se tiene que tomar en cuenta que al introducir el producto con un grosor bajo y con una temperatura alta el mismo podría llegar a su cocción. Es por este motivo es que se estableció un rango de 2mm a 6mm de grosor como máximo, en resultados se muestra los datos obtenidos de cada experimento.

Figura 57: Proceso de deshidratado on / off



Fuente: Elaboración propia

Dichos resultados fueron obtenidos en el módulo de control de proceso y se ejecuta de manera continua. Éste tiene como función el control de temperatura del deshidratador mediante un controlador ON/OFF, además de llevar a cabo la adquisición de la temperatura actual y el monitoreo de forma local mediante el despliegado de los datos en la interfaz del software del arduino establece un nivel deseado de temperatura se controlaba el calor encendiendo y apagando el ventilador (Figura 57).

RESULTADOS

Muestra 1

En este caso se tiene una muestra de 200 gramos de plátano, los cuales se deshidratan en rodajas denominadas M1(grosor 2mm). El tiempo de secado es de 8 horas, presentándose en la siguiente tabla los resultados obtenidos para la mencionada muestra.

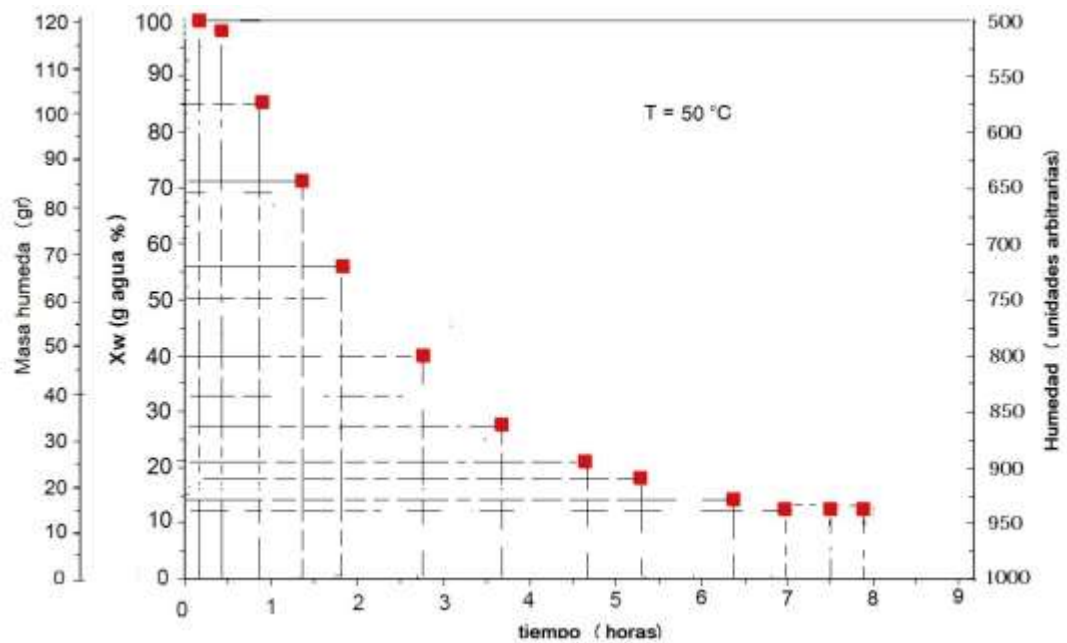
Tabla 13: Resultados muestra 1

Muestra	Mi (gr)	Ms (gr)	Tiempo (h)	MASA DE AGUA Mi –Ms (gr)	MASA HUMEDA (%)	(Mi- Ms)/Ms (gr H2O/gr solido)	HUMEDAD
1	200	104	0	96	100	0,92	550
1	196,56	104	0,5	96,3	100	0,89	555
1	188,24	104	0.8	84,24	87	0,81	590
1	171,6	104	1,3	74,3	77	0,65	675
1	158,08	104	1,8	71,01	73	0,52	745
1	141,44	104	2.76	40,09	41	0,36	820
1	128,96	104	3.8	24,96	26	0,24	879

1	122,72	104	5.5	18,72	19	0,18	910
1	121,68	104	6.5	17,68	18	0,17	923
1	121,68	104	7.1	17,68	18	0,17	923
1	118,56	104	7.5	14,56	15	0,14	930
1	118,56	104	8	14,56	15	0,14	930

Fuente: Elaboración propia

Figura 58: Curva de secado muestra 1



Fuente: Elaboración propia

Muestra 2

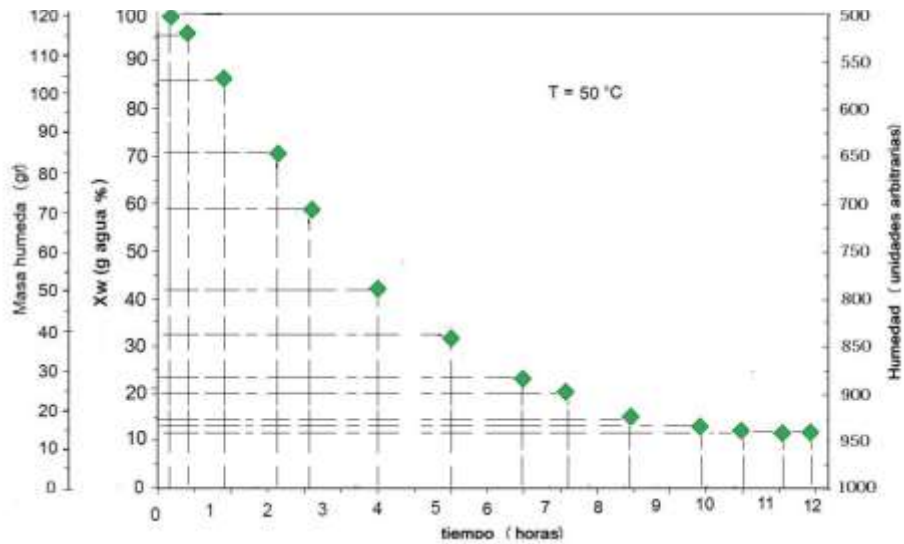
En la muestra 2 también se tomó una masa de 200 gramos: sin embargo el tiempo de secado se prolongó en 12 horas, esto se debe a que la muestra 2 tiene una rodaja mayor que la anterior (4mm). Los resultados se observan en la siguiente tabla:

Tabla 14: Resultados muestra 2

Muestra	Mi (gr)	Ms (gr)	Tiempo (h)	MASA DE AGUA (Mi -Ms) (gr)	MASA HUMEDA (%)	(Mi-Ms)/Ms (gr H2O/gr solido)	HUMEDAD
2	250	130	0	120	100	0,92307692	540
2	247	130	0,6	117	97	0,9	555
2	241,8	130	1,2	111,8	93	0,86	615
2	223,6	130	2,4	93,6	78	0,72	690
2	182	130	4	52	43	0,4	690
2	165,1	130	5,4	35,1	29	0,27	774
2	156	130	6,5	26	21	0,2	840
2	153,4	130	7,4	23,4	19	0,18	900
2	149,5	130	8,7	19,5	16	0,15	920
2	149,5	130	10,2	14,4	12	0,15	920
2	149,24	130	11,3	14,4	12	0,148	930
2	149,24	130	12	13,4	11	0,148	930

Fuente: Elaboración propia

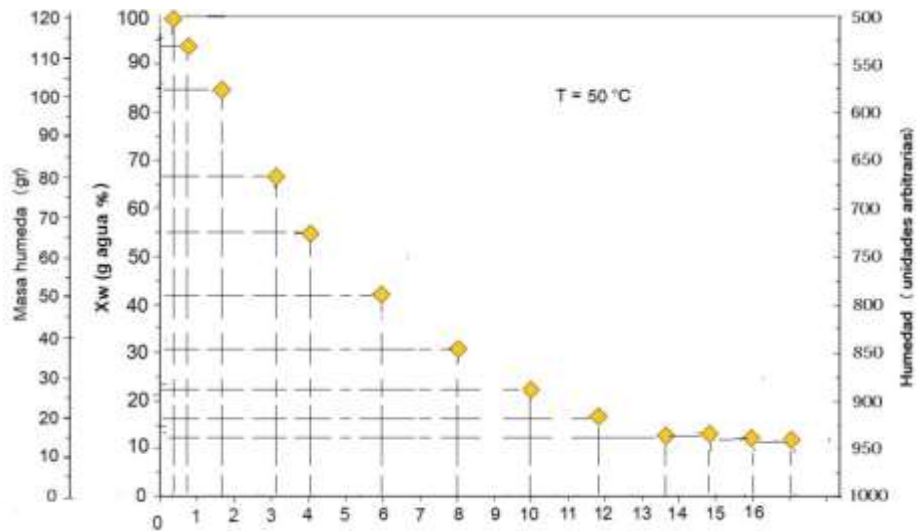
Figura 59: Curva de secado muestra 2



Fuente: Elaboración propia

Continuando con un tercer experimento donde se puso rodajas de 6 mm se obtuvo la siguiente curva de secado:

Figura 60: Curva de secado muestra 3



Fuente: Elaboración propia

ANEXO D

PROCESO DE SECADO

Según Treyball, en su libro “Operaciones con transferencia de masa”, sostiene que el secado es “la extracción de humedad de una sustancia” (Robert E). Entonces el proceso de secado será la operación unitaria en la cual se retira, por medios artificiales o naturales, el agua contenida en los sólidos.

Para muchas industrias químicas es importante el secado de los alimentos y la razón por la que se la realiza puede ser la siguiente:

- Facilita el manejo posterior del producto.
- Permite el empleo satisfactorio del mismo.
- Reduce el costo en un embarque.
- Aumenta la capacidad en los aparatos.
- Preserva los productos durante el almacenamiento y transporte.
- Aumenta el valor o la utilidad de productos residuales (OCON, y otros, 1952)

Convección Forzada

Los deshidratadores cuya transferencia de calor es por convección son utilizados para secar alimentos en forma de láminas o pastas. El calor se suministra a través de aire caliente o gas, el cual fluye por la superficie del sólido. El aire, los gases inertes, el vapor sobrecalentado o gases de combustión directa pueden ser utilizados en sistemas de secado convectivos (Mujumdar, 2000).

Algunos tipos de deshidratadores convectivos son:

- 1. Secadores en bandejas o charolas:** Funciona con un ventilador que recircula el aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las

charolas. También puede usar calor eléctrico. Los secadores de bandeja o de armario por lo general funcionan en el régimen intermitente, estos están conformados por una cámara rectangular donde en la parte superior van apiladas bandejas perforadas para posicionar el alimento y en su parte inferior se encuentran alojadas las tuberías donde pasa vapor de agua para calentar el aire, el cual puede pasar de dos maneras al alimento a deshidratar: horizontalmente; si el aire circula paralelo al lecho a secar y vertical; si el aire circula normal a la superficie del alimento.

Sus rendimientos suelen estar entre el rango de 20 al 50% y se ocupan para pequeñas cargas de 25 a 50 kg. En estos se puede secar cualquier alimento pero la carga y descarga del producto en estos secadores genera que la mano de obra sea costosa, pero la calidad del producto obtenido hace costear el proceso.

2. Secadores de Túnel: Funciona con carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada una; un ventilador extrae aire hacia el exterior. Los secadores de túnel son semejantes a los de armario solo que estos operan en régimen continuo. Las bandejas son puestas en carros los cuales se van desplazando en una cámara larga rectangular en sentido opuesto al flujo de aire caliente, al sacar una carga de alimento seco se ingresa otra de alimento fresco al fin del túnel. Estos secadores también logran una buena calidad en el secado de los alimentos.

3. Secadores rotatorios: Constan de un pequeño cilindro que gira sobre su propio eje con cierta inclinación. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo de gases calientes mediante un flujo a contracorriente, o también, puede ser a través de la pared calentada del cilindro.

4. Secadores por aspersión: Un líquido se atomiza o rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas, las cuales se evaporan y

se obtienen partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. Las partículas obtenidas son porosas y ligeras.

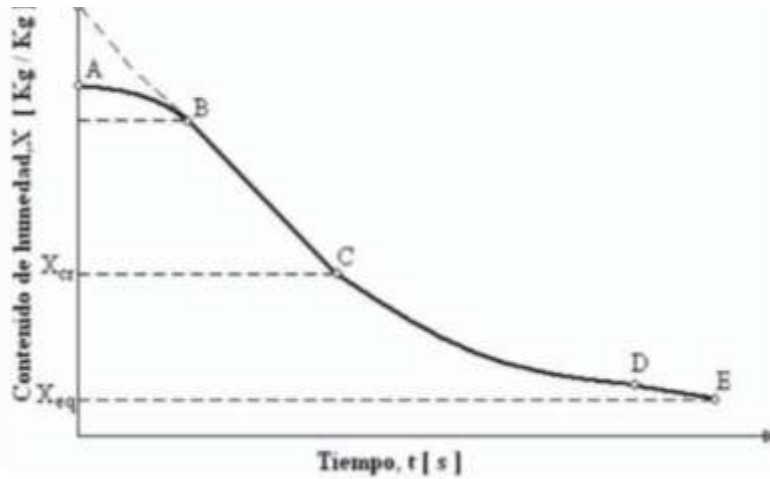
5. Secado de horno o estufa: Es simple y solo consta de una cámara dividida por una reja perforada que forma dos pisos dentro de la cámara donde en el piso inferior se calienta el aire de secado con un quemador, el aire caliente por convección, ya sea forzada (ayudada por un ventilador para generar el flujo de aire) o natural, atraviesa la reja perforada donde se encuentra el alimento húmedo. Su utilización en la industria es reducida utilizándose para secar manzanas, lúpulos (uno de los ingredientes de la cerveza) y follaje verde.

6. Secador de lecho fluido: Son secadores continuos donde el producto a secar debe ser granulado como cereal, arveja, granos, etc. El principio de estos secadores consta de mantener los alimentos suspendidos en el aire, por lo que están conformados por aire caliente que ingresa en la parte inferior del recorrido del alimento manteniéndolo levitando hasta la salida del secador donde se obtiene seco. El ingreso se realiza por un extremo superior y el aire que retira la humedad sigue su camino por una chimenea en la parte superior del secado.

Curvas de secado

Por medio de la siguiente curva se determina las condiciones para el proceso de secado, en donde se identifica el contenido de humedad a través del tiempo. A continuación, se detalla en la figura 61 las etapas que intervienen en la curva de secado.

Figura 61: Curva de humedad vs tiempo



Fuente: Udlap (2013, pag.68)

Primer periodo (A-B): La pendiente de la curva aumenta considerablemente con el tiempo, a esta etapa se la conoce como zona de inducción.

Segundo periodo (B-C): Se identifica como pendiente constante.

Tercer periodo (C-D): Se denomina a este como decrecimiento de la velocidad de secado.

Tiempo de secado.- Los factores que intervienen en el proceso de deshidratación y humedad del producto final, dependerán de la velocidad, temperatura de secado, condiciones climáticas del lugar y característica del producto.

Humedad.- El proceso de secado es una operación que consiste básicamente en la transferencia de masa, donde dicha transferencia surge con el contacto del sólido con el aire. El contenido de agua que se encuentra en un

sólido es evaporizado hacia gas: esto ocurre en base a la diferencia de presiones entre el vapor del sólido húmedo y el aire.

El mecanismo del proceso de secado dependerá de la forma en que el agua está relacionada con el sólido: mientras más compacto y molecularmente unido esté el alimento, más difícil será remover su humedad, Luz Contreras mantiene que “Durante el secado el enlace de la humedad con el material se altera” (Velásquez).

Humedad relativa.- Es la relación que existe entre la presión real y la presión parcial de saturación. En la carta psicométrica se representa con líneas curvas que se extienden desde la parte inferior izquierda hasta la parte superior derecha, cuando la humedad relativa del aire es constante; si la humedad relativa del aire es de 100% esta humedad es representada en la carta con la línea curva que limita a la gráfica y se le conoce como curva de saturación.

Temperatura de deshidratación. - Si la temperatura es muy baja al comienzo, pueden desarrollarse microorganismos antes que el producto sea adecuadamente deshidratado. Si la temperatura es muy elevada y la humedad muy baja, la superficie del producto puede endurecerse manteniendo la humedad interna.

Según Patricio Valdéz “la temperatura para deshidratar alimentos es de 50° a 70°C, a mayor calor cocina el alimento, y si es aun mayor, cocina su exterior impidiendo que la humedad interna escape” (Marin, 2014).

ANEXO E

CODIGO FUENTE

Codigo GUI

```
//Declaracion de variables

boolean firstTime = false;
int gaugeHandValue = 0;
gauge firstGauge,secondGauge,thirdGauge,forthGauge;
boolean start = false;
String error;
float in1,in2,in3,in4;

//construcción de la interfaz
void setup() {
  fullScreen();
  background(0);
  frameRate(20);
  in1 = 0.0; in2 = 0.0; in3 = 0.0; in4 = 0.0;
  try {
    arduinoPort = new Serial(this,Serial.list()[0],9600);
    arduinoPort.bufferUntil(lf);
    start = true;
    // Gauge indicator min, maxVal step
    firstGauge = new gauge(0,100,9); // Humedad del fruto
    secondGauge = new gauge(0,100,9); // Temperatura
    thirdGauge = new gauge(0,100,9); // Velocidad
    forthGauge = new gauge(0,100,9); // Humedad amb.
  }
  catch(Exception ex){
    error="SOFIA ALIAGA CONTROL \n Error de entrada, Numero de
Puerto ";
  }
}
//Dibujando los objetos
void draw() {
  if (start) {
```

```

fill(0);
stroke(255,30);
if (!firstTime) {
  drawBackgroundLines();
  firstTime = true;
}
gaugeHandValue++;
if (gaugeHandValue > 180) {
  gaugeHandValue = 0;
}
translate(0,10);

pushMatrix();
translate(width/4,height/4);
firstGauge.drawIndicator(in1,"HUMEDAD FRUTA (%) -
A0",color(255,0,0));
popMatrix();

pushMatrix();
translate( 3*(width/4),height/4);
secondGauge.drawIndicator(in2,"TEMP. AMBIENTE (°C) -
A1",color(0,255,0));
popMatrix();

pushMatrix();
translate( (width/4),3*(height/4));
thirdGauge.drawIndicator(in3,"VELOCIDAD (%) -
D10",color(0,0,255));
popMatrix();

pushMatrix();
translate( 3*(width/4),3*(height/4));
forthGauge.drawIndicator(in4,"HUMEDAD AMBIENTE -
A4",color(255,165,0));
popMatrix();
} else {
  pushMatrix();
  fill(255,0,0);
  textSize(23);

```

```

        translate(width/2,height/2);
        textAlign(CENTER);
        text(error,0,0);
        fill(0,255,0);
        textSize(16);
        text("Ovi. La Paz - Bolivia",0,textWidth(error));
        popMatrix();
    }
}
//-----
void serialEvent(Serial p) {
    serialString = p.readString();
    resolveSerialString(serialString);
}
//-----
void resolveSerialString(String serialData) {
    //-----
    float[] readingValues = float(split(serialData','));
    in1 = readingValues[0];
    in2 = readingValues[1];
    in3 = readingValues[2];
    in4 = readingValues[3];
    // println(in1);
    // println(in2);
    // println(in3);
    // println(in4);
}
//-----
void drawBackgroundLines() {
    //-----
    translate(0,0);
    stroke(255,20);
    for(int i=0; i < width; i+=20) {
        line(i,0,i,height);
    }
    for(int j=0; j < height; j+=20) {
        line(0,j,width,j);
    }
    fill(255);
}

```

```

    textSize(22);
    String companyText="La Salle 2018 ";
    textAlign(CENTER);
    pushMatrix();
    translate(width/2,height/2);
    text(companyText,0,0);
    popMatrix();

    fill(255,80);
    textSize(13);
    String author="Author OVI La Paz Bo";
    pushMatrix();
    translate(width/2,(height-40));
    text(author,0,0);
    popMatrix();
}
//-----
void mousePressed() {
//-----
    if(mouseButton == LEFT) {
        exit();
    }
}

```

Código CONTROLADOR

```

// librerías necesarias

#include <dht11.h>
dht11 DHT;
#define DHT11_PIN 4

// Declaracion de variables y puertos
const int sensorFC37 = A0; // Pin = A0 p/sensor Humedad fruta74
const int sensorLM35 = A1; // Pin = A1 p/sensor temperatura amb.
const int Pin_Ventila = 10; // Pin = D10
const int Pin_Calor_1 = 9; // Pin = D9
const int Pin_Calor_2 = 8; // Pin = D8

```

```

const int Vel_0 = 0; // 0% velocidad ventilador
const int Vel_1 = 64; // 25% velocidad ventilador
const int Vel_2 = 127; // 50% velocidad ventilador
const int Vel_3 = 191; // 75% velocidad ventilador
const int Vel_4 = 254; // 100% velocidad ventilador
//-----
const int PAUSA = 2000;
//-----
int SpeedFan = 0;
int i2Hum = 0;
int i2Temp = 0;
int iHum, iTemp;

```

Después de obtener el valor difuso las siguientes funciones controlarán el valor real y modificarán la salida en función a la entrada

```

void FAST_0_0() {
// Serial.print("FAST_0_0: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, HIGH);
digitalWrite(Pin_Calor_2, LOW);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_0);
SpeedFan = Vel_0;
delay(PAUSA);
exit(0);
}
//-----
void FAST_0_2() {
// Serial.print("FAST_0_2: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, HIGH);
digitalWrite(Pin_Calor_2, HIGH);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_2);
SpeedFan = Vel_2;
delay(PAUSA);
}
//-----
void FAST_0_3() {
// Serial.print("FAST_0_3: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, HIGH);
digitalWrite(Pin_Calor_2, HIGH);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_3);
SpeedFan = Vel_3;
delay(PAUSA);
}
//-----
void FAST_0_4() {
// Serial.print("FAST_0_4: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, HIGH);
digitalWrite(Pin_Calor_2, HIGH);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_4);
SpeedFan = Vel_4;
delay(PAUSA);
}
//-----
void FAST_1_1() {
// Serial.print("FAST_1_1: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, LOW);
digitalWrite(Pin_Calor_2, HIGH);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_1);
}
//-----

```

```

    SpeedFan = Vel_1;
    delay(PAUSA);
}
//-----
void FAST_1_2() {
// Serial.print("FAST_1_2: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, LOW);
digitalWrite(Pin_Calor_1, HIGH);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_2);
SpeedFan = Vel_2;
delay(PAUSA);
}
//-----
void FAST_1_3() {
// Serial.print("FAST_1_3: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, LOW);
digitalWrite(Pin_Calor_1, HIGH);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_3);
SpeedFan = Vel_3;
delay(PAUSA);
}
//-----
void FAST_1_4() {
// Serial.print("FAST_1_4: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, LOW);
digitalWrite(Pin_Calor_1, HIGH);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_4);
SpeedFan = Vel_4;
delay(PAUSA);
}

```

```

//-----
void FAST_2_2() {
// Serial.print("FAST_2_2: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, LOW);
digitalWrite(Pin_Calor_2, LOW);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_2);
SpeedFan = Vel_2;
delay(PAUSA);
}
//-----
void FAST_2_3() {
// Serial.print("FAST_2_3: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, HIGH);
digitalWrite(Pin_Calor_2, HIGH);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_3);
SpeedFan = Vel_3;
delay(PAUSA);
}
//-----
void FAST_2_4() {
// Serial.print("FAST_2_4: ");
digitalWrite(Pin_Calor_1, LOW);
digitalWrite(Pin_Calor_2, LOW);
analogWrite(Pin_Ventila, Vel_4);
SpeedFan = Vel_4;
delay(PAUSA);
}

```

ANEXO F

RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES QUE PRESENTA EL
PLATANO DESPUES DE SER DESHIDRATADO POR EL CONTROL
CONVENCIONAL FRENTE AL CONTROL DIFUSO