



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR  
DIFUSO PARA UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO HÍBRIDO.**

**WENDY YAJAIRA ROMERO MEDINA**

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado  
ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito  
parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN  
INDUSTRIAL**

Riobamba – Ecuador

Noviembre – 2017



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad **Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado: “MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO PARA UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO HÍBRIDO.”, de responsabilidad de la Srta. Wendy Romero, ha sido minuciosamente revisada y se autoriza su presentación.

Tribunal:

ING.FREDY PROAÑO ORTÍZ; PhD.

**PRESIDENTE**

---

ING. ANDRÉS GORDÓN GARCÉS; M.Sc.

**DIRECTOR DE TESIS**

---

ING. PATRICIA CONSTANTE PRÓCEL; M.Sc.

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

---

ING. JOSÉ ANTONIO ROMERO PAGUAY; M.Sc.

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

---

Riobamba, Noviembre 2017

## DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Wendy Yajaira Romero Medina, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

WENDY YAJAIRA ROMERO MEDINA

N° Cédula: 160045246-8

©2017, Wendy Yajaira Romero Medina

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

---

WENDY YAJAIRA ROMERO MEDINA

Nº Cédula: 160045246-8

## DERECHOS DE AUTENTICIDAD

Yo, Wendy Yajaira Romero Medina, declaro que el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, noviembre de 2017.

---

WENDY YAJAIRA ROMERO MEDINA

N° Cédula: 1600452468

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a todas las personas que me han impulsado a seguir adelante, especialmente a mi familia: padres (Diego, Jhaneth) / hermanas (Jakelyn, Janina, Jeimy) que han sido un apoyo constante, y a mi abuelito Jorge Romero que pese a la distancia que hoy nos separa sigue presente en mi corazón, por todo el amor que me demostraste mientras Dios me permitió disfrutar de tu presencia, por el orgullo de llevar tu apellido, donde Dios te permita estar, este logro es para ti Alfredito.

Wendy Romero

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecida por la vida que Dios me ha permitido disfrutar, por la cual he podido lograr mis metas, de igual manera agradezco a todas las personas que han aportado de alguna manera al desarrollo de la presente tesis, a mi familia que han sido y seguirán siendo el impulso para seguir luchando, a mis amigas Verónica, Pamela y Sandra porque sin ustedes nada hubiese sido igual, a Javier por ser mi apoyo incondicional. A la Universidad Estatal Amazónica de la ciudad de Puyo por la apertura brindada. A la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO por abrirme las puertas de su prestigiosa institución. Un agradecimiento especial al Ing. José Romero M.Sc, por ser la persona que más me ha guiado en el desarrollo de la presente, a la Ing. Patricia Constante M.Sc e Ing. Andrés Gordón M.Sc por ayudarme en este proceso de titulación.

Wendy Romero

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	xii
SUMMARY .....	xiii

### CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Justificación de la investigación .....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo general .....	3
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
1.4. Hipótesis .....	4

,

### CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	5
2.1. Estudio del Arte .....	5
2.2. Fundamentación Teórica.....	6
2.2.1. Acondicionamiento de Aire .....	6
2.2.2. Clasificación de Máquinas de Refrigeración .....	8
2.2.4. Refrigerante.....	9
2.2.5. Modelación: Algoritmo de Regresión.....	10

### CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA INVESTIGATIVA .....	15
3.1. Recolección de Información .....	15
3.2. Análisis del Sistema .....	15

3.3.	Selección y Dimensionamiento de Dispositivos .....	15
3.4.	Software SCILAB .....	25
3.4.1.	FISLAB .....	25

## CAPÍTULO IV

4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	27
4.1.	Modelación .....	27
4.2.	Simulación .....	34
4.3.	Regeneración con Energía Renovable. ....	40
4.5.	Validación de la Hipótesis .....	44

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-4:</b> Datos experimentales Sistema Híbrido – Control convencional.....	29
<b>Tabla 2-4:</b> Variables Independientes .....	31
<b>Tabla 3-4:</b> Variables Independientes Externas (Medio Ambiente) .....	31
<b>Tabla 4-4:</b> Potencias de Linealización.....	32
<b>Tabla 5-4:</b> Comportamiento de Variables del Sistema de Enfriamiento .....	34
<b>Tabla 6-4:</b> Tabla de Reglas .....	36
<b>Tabla 7-4:</b> Comparación valores de T y W Control Difuso / Control Manual .....	38
<b>Tabla 8-4:</b> Consumo Eléctrico Sis. Híbrido - Control Difuso / Control Manual.....	40
<b>Tabla 9-4:</b> Ahorro de consumo de energía Resistencia E/Panel S.....	40
<b>Tabla 10-4:</b> Consumo Eléctrico del Sistema de Enfriamiento –C. Manual.....	41
<b>Tabla 11-4:</b> Valores de Temperatura y Humedad / Control Manual .....	42
<b>Tabla 12-4:</b> Valores de Temperatura y Humedad / Control Difuso .....	43
<b>Tabla 13-4:</b> Comparación de Control difuso / convencional.....	45
<b>Tabla 14-4:</b> Tabla de Contingencia.....	45

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b> Sistema Integral .....	7
<b>Figura 2-2:</b> Sistema Dividido .....	7
<b>Figura 3-2:</b> Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor .....	9
<b>Figura 4-2:</b> Proceso de Inferencia Difusa .....	14
<b>Figura 1-3:</b> Sistema de enfriamiento experimental híbrido con rueda desecante.....	15
<b>Figura 2-3:</b> Entorno de Scilab.....	26
<b>Figura 1-4:</b> Sistema de Enfriamiento Híbrido / Control Manual.....	28
<b>Figura 2-4:</b> Sistema de Enfriamiento Híbrido / Control Difuso .....	30
<b>Figura 3-4:</b> Entorno Regresión Múltiple .....	33
<b>Figura 4-4:</b> Representación Control Difuso .....	37
<b>Figura 5-4:</b> Etapa de defusificación .....	39
<b>Figura 6-4:</b> Diagrama psicrométrico / Control Manual.....	43
<b>Figura 7-4:</b> Diagrama psicrométrico / Control Difuso .....	44
<b>Figura 8-4:</b> Distribución Chi Cuadrado.....	47

## RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo modelar y simular un control difuso para un sistema de enfriamiento híbrido empleando software libre, para obtener valores de confort tanto en temperatura como humedad, usando como base fundamental en sistema de enfriamiento híbrido controlado de manera manual, mismo que se encuentra instalado en la Universidad Estatal Amazónica de la provincia de Pastaza, la cual ha facilitado los datos experimentales necesarios para la comparación y validación del controlador difuso, el mismo que busca mejorar dos de los aspectos más importantes dentro de la utilización de sistemas de enfriamiento híbridos, que son la disminución del consumo energético y mejorar el rendimiento del sistema, para optimizar el proceso de generación de frío, sabiendo que a nivel nacional aún no existe mucha información del empleo de sistemas de enfriamiento híbrido con rueda desecante. Con la implementación de un control difuso para un sistema de enfriamiento híbrido, se logra hacer un análisis del comportamiento de cada subsistema e ir modificando valores de ingreso para observar su comportamiento en las variables deseadas, reduciendo así la etapa de compresión de vapor que hasta ahora se tomaba en cuenta para un sistema de enfriamiento híbrido controlado de manera manual, lo cual se refleja en la reducción de 20,27 % de consumo energético, control que se implementó en el software SCILAB 5.5.2, con el uso del Fuzzy Logic Toolbox 0.4.7. Se recomienda analizar la inclusión de energía solar en la sección de regeneración de sílica gel, ya que es posible cubrir por medio de captación solar un gran porcentaje del consumo eléctrico que se requiere en esta sección del sistema.

**Palabras Claves:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, <SISTEMA DE ENFRIAMIENTO>, < SISTEMA DE ENFRIAMIENTO HÍBRIDO>, <RUEDA DESECANTE>, <CONTROL DIFUSO >, <ENERGÍA SOLAR>

## **ABSTRACT**

The objective of this research work is to model and simulate a diffuse control for a hybrid cooling system using free software to obtain comfort values in both temperature and humidity by using the manually controlled hybrid cooling as a fundamental basis system, located in the Amazon State University of the province of Pastaza, which has provided the necessary experimental data for the comparison and validation of the diffuse controller that seeks to improve two of the most important aspects of the use of hybrid cooling systems: decrease energy consumption and improve the performance of the system to optimize the process of generation of cold, knowing that at national level there is not much information yet, on the use of hybrid cooling systems with desiccant wheel. With the implementation of a fuzzy control for a hybrid cooling system, it is possible to perform a behavior analysis of each subsystem by modifying steam compression values that were taken into account for a manually controlled hybrid cooling system, reflected in the reduction of 20, 27% of energy consumption, control that was implemented in the software SCILAB 5.5.2, with the use of Fuzzy Logic Toolbox 0.4.7. It is recommended to analyze the inclusion of solar energy in the silica gel regeneration section because it is possible to cover by means of solar collecting a large percentage of the electrical consumption that is required in this section of the system.

**Key words:** <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES>, <AUTOMATIC CONTROL>, <COOLING SYSTEM>, <HYBRID COOLING SYSTEM>, <DESICCANT WHEEL>, <DIFFUSION CONTRACT>, <SOLAR ENERGY

# CAPÍTULO I

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de cubrir áreas que apoyen al desarrollo productivo del país, ha impulsado el estudio de nuevas investigaciones, como el deseo de mejorar los resultados obtenidos por medio del equipo de compresión de vapor de aire que en la actualidad es el más usado en el área de acondicionamiento de aire, implementando sistemas que brinden mejores prestaciones, con el adecuado control de las variables críticas del sistema, buscando eficiencias energéticas y el confort deseado tanto en refrigeración como en deshumidificación.

## 1.2. Planteamiento del problema

Con el afán de incluir sistemas que permitan ayudar a incrementar en diferentes aspectos la estructura productiva del país, se efectúan opciones de mejora, como la implementación de sistemas de enfriamiento y deshumidificación, sistemas que son muy importantes tanto en la industria de producción que busca tener un ambiente de conservación de sus productos elaborados como en la industria de servicios que desea ofrecer un buen ambiente de confort para sus usuarios, estos sistemas se encuentran presentes en todo tipo de áreas como son: salud, alimentación, educación, transporte, comercio, entretenimiento, etc.

El sistema de aire acondicionado (compresor/evaporador) es un sistema que involucra equipos que demanda altos consumos energéticos. La refrigeración supone un alto porcentaje del consumo energético tanto nacional como mundial. Así, la escasez de recursos energéticos y el ahorro de los mismos se convierten en un aspecto cada vez más urgente de abordar y en este proceso la implementación de un control juega el papel central y el más importante (Alfaya, J, 2014).

Hoy en día los sistemas de enfriamiento con uso de desecantes están en auge y empiezan a ser implementados por sus características de absorción de humedad con el propósito de mejorar la calidad de aire generado en sistemas de aire acondicionado y preservar el medio ambiente (Carbonell. T, 2006).

Mientras pasa el tiempo el consumo energético va en ascenso y se prevé que seguirá aumentando, por lo que desafiando las barreras de investigación en la industria del acondicionamiento del aire, se analiza la posibilidad de elevar la calidad de aire a bajo consumo de energía.

Al ser un sistema poco aplicado aún en el país, es importante empezar a trabajar sobre la identificación de un modelo que permita regir este sistema y de esta manera poder realizar la simulación del controlador, ayudándose de principios y leyes que rigen la termodinámica y la transferencia de calor, se trata de desarrollar un conjunto de ecuaciones que describen la dinámica del ciclo, permitiendo así analizar el comportamiento bajo un sistema de control difuso.

La determinación de reglas de conducta obtenidas a partir de modelos de optimización para la operación recomendable de estos sistemas de enfriamiento con desecantes es un campo prácticamente inexplorado (Dhar.P, 2001), por lo que la investigación presentada resulta muy novedosa en el campo de la modelación y optimización.

La base fundamental en un sistema de enfriamiento híbrido es un correcto control que una vez que se encuentre bien planteado, permite reducir el consumo de energía comparado con otras tecnologías existentes para generación el aire fresco.

Al unir equipos de deshumidificación y enfriamiento se satisface las actuales exigencias de producción, confort y ahorro de energía (Copeland Corporation, 2007).

### **1.3. Justificación de la investigación**

El clima cálido húmedo en Ecuador ocupa gran dimensión territorial, involucrando las regiones costa, oriente e insular, lo que dificulta a la gran mayoría de industrias brindar sus servicios o

conservar sus productos bajo temperaturas adecuadas, al saber lo malo que puede ser estar bajo humedad y temperaturas altas, la industria instala sistemas de aire acondicionado y adquiere equipos que ofrecen eliminar la humedad del medio, mismos sistemas que consumen grandes cantidades de energía eléctrica.

Por lo que nace la idea de modelar un sistema de enfriamiento híbrido y simular un controlador difuso que permita gobernar el proceso, cubriendo la necesidad de acondicionar el aire en lugares cerrados, oficinas, hogares, almacenes, etc. optimizando la condición de circulación de aire y reducción de energía.

La factibilidad de utilizar los sistemas de enfriamiento con desecantes sólidos, resalta el ahorro energético que se pueden obtener sobre todo cuando se utiliza fuentes de energías de desecho o alternativas en la etapa de reactivación del desecante, gracias a que en las regiones con clima cálido-húmedas del país se cuenta con valores significativos de radiación solar, esto permitiría incluir energía solar en la etapa de regeneración de la sílica gel del presente proyecto.

Diseñar una máquina briquetadora

El beneficio de aplicar software libre para el desarrollo del proyecto es que permite diseñar el control del sistema, sin estar restringido a limitaciones económicas como al momento de adquirir un software propietario, apoyando de esta manera al creciendo tecnológico del país a costos muy reducidos.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. *Objetivo general***

Modelar y simular un control difuso para un sistema de enfriamiento híbrido empleando software libre.

#### **1.4.2.      *Objetivos específicos***

- Analizar el funcionamiento de los subsistemas para comprender el proceso correcto del sistema de enfriamiento.
- Obtener el modelo del sistema que permita simular el controlador difuso.
- Estudiar el cambio de la eficiencia energética entre el sistema de enfriamiento híbrido con control difuso y el sistema de enfriamiento con un control convencional.
- Comparar el rendimiento que genera el sistema de enfriamiento híbrido con un control difuso.
- Analizar el beneficio de emplear energía solar térmica como fuente renovable de energía aplicada en la regeneración del sistema de deshumidificación.
- Simular el control difuso para el sistema de enfriamiento desecante sólido híbrido con el software SCILAB.

#### **1.5.      Hipótesis**

¿El modelamiento y simulación de un control difuso para un sistema de enfriamiento híbrido con desecante sólido permitirá incrementar la eficiencia energética?

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1. Estudio del Arte

La necesidad de cubrir áreas que apoyen al desarrollo productivo del país, ha impulsado el estudio de nuevas investigaciones, como es el caso de suplir el sistema convencional de aire acondicionado por sistemas que brinden mejores prestaciones, con el adecuado control de las variables críticas del sistema, buscando eficiencias energéticas y el confort deseado tanto en refrigeración como en deshumidificación para áreas cerradas.

Existe limitada información sobre el desarrollo del sistema de refrigeración híbrido con desecantes sólidos, proyectos e investigaciones han dado inicio, estudiando modelos que permitan mejorar el sistema de control que gobierna el sistema automático, los mismos que se citan a continuación:

Subramanyam.N, “Application of desiccant wheel to control humidity in Air Conditioning Systems. Applied thermal Engineering” (2004) su estudio lo hace sobre la humedad, analizando que es el aspecto más importante para obtener aire acondicionado de buena calidad.

El estudio de Sphaier y Worek “Analysis of heat and mass transfer in porous sorbents used rotary regenerators” (2004), se basa en la conducción de calor que se produce en la parte de uso del desecante, indicando que pese a los estudios sobre modelos matemáticos de ruedas desecantes no existe un modelo puntual que rijan su comportamiento.

Fatemeh “Modeling and simulation of desiccant Wheel for air conditioning” (2006), realiza una simulación del comportamiento de una rueda desecante 1:1, con un modelo unidimensional, obteniendo las ecuaciones de transferencia y logrando valores de temperatura y humedad la salida de la rueda.

En el trabajo de Shenglan y Radermacher (2010), “Temperature Controller by Using Fuzzy Logic”, con la ayuda de un microcontrolador realiza el seguimiento de un control de temperatura aplicando lógica difusa.

Mireles J. (2010), “Simulación y Comparación Energética de un Sistema de Enfriamiento por Ciclo de Absorción”, implanta un modelo matemático con bases termodinámicas basado en un ciclo Icyball, finalmente compara un sistema de refrigeración de absorción con uno de compresión.

Por su parte Ormeño E, (2012), “Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de presión en una planta de refrigeración”, con la ayuda de Matlab, realiza un reconocimiento del modelo usando una base de datos experimentales, que arroja un mini sistema de refrigeración implementado para el desarrollo del trabajo

José Antonio Romero Paguay, (2013) presenta "Tecnologías de fuentes renovables de energía para emplear en sistemas de refrigeración por sorción en la provincia de Pastaza, Ecuador". Realiza un estudio de las energías renovables aplicadas a sistemas de enfriamiento en la Amazonía.

José Enrique Alonso Alfaya, (2014) con el tema “Modelado y control multivariable de un sistema de refrigeración por compresión de vapor”, implementan un control robusto y otro predictivo para un sistema de refrigeración por compresión de vapor, aplica un sistema multivariable enlazado, estudiando las variables de entrada y salida de dicho sistema.

José Antonio Romero Paguay, (2016) “Estudio Experimental De Un Sistema De Enfriamiento Con Rueda Desecante En La Amazonía Ecuatoriana”, avanza a nivel nacional con la implementación de un sistema de enfriamiento usando rueda desecante, arrojando datos experimentales de todo el sistema.

## **2.2. Fundamentación Teórica**

### **2.2.1. *Acondicionamiento de Aire***

Este sistema elimina el calor que se infiltra en la estructura desde el exterior-interior y lo devuelve. Cuando las noches son cálidas (temperaturas sobre los 24 °C) y la humedad del ambiente alta, es difícil sentirse suficientemente a gusto.

El acondicionamiento del aire es similar a la refrigeración comercial, ya que se emplean los mismos componentes para enfriar el aire: evaporador, compresor, condensador, dispositivo dosificador. Hay diferentes formas de combinar estos elementos para alcanzar el mismo objetivo como integrales y dividido, (Whitman y Johnson, 2000).

#### 2.2.1.1. *Equipos integrales de acondicionamiento de aire.*

Con los equipos integrales, todos los elementos se incorporan en único armario o contenedor, por lo que se les llama también equipos autocontenidos,



**Figura 1-2: Sistema Integral**

Fuente: (York, S/A, p.9)

#### 2.2.1.2. *Sistema dividido de acondicionamiento del aire.*

En este caso el condensador se coloca en el exterior del edificio, lejos del evaporador, utilizando conducción de refrigerante para conectar ambas partes del sistema.



**Figura 2-2: Sistema Dividido**

Fuente: (York, S/A, p.9)

### **2.2.2. Clasificación de Máquinas de Refrigeración**

Las máquinas frigoríficas se pueden clasificar, según el sistema utilizado para la recogida de vapores, en la siguiente forma:

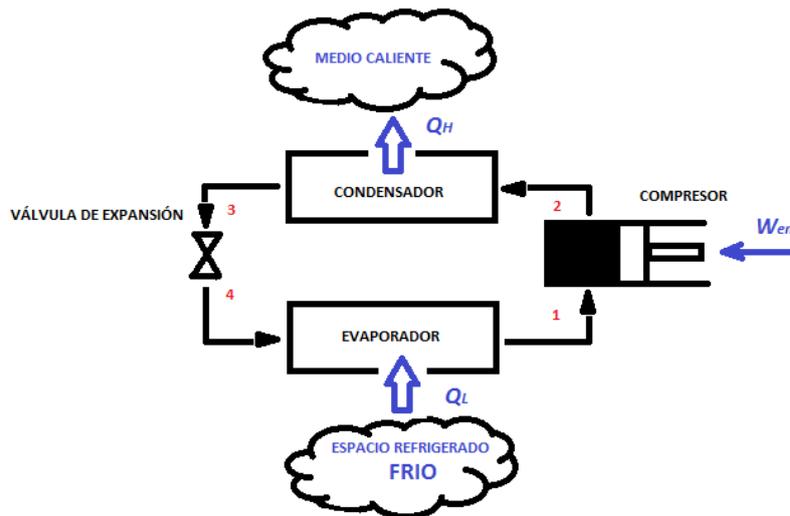
- **Máquinas de adsorción:** Utiliza absorbentes sólidos para adsorber el vapor.
- **Máquinas de absorción:** Utiliza absorbentes líquidos para absorber el vapor que se forma por la exposición al calor.
- **Máquinas de compresión:** Utiliza un compresor para extraer y comprimir el vapor del sistema, luego trabaja un condensador donde se licua el vapor. Se usan compresores de embolo o rotativos de igual manera pueden o no tener refrigeración intermedia. En la industria frigorífica se basa puntualmente en compresores de embolo y funcionan de manera automática.
- **Máquinas de eyección:** En las que los vapores son arrastrados por el efecto Venturi que genera el paso de otro fluido a gran velocidad (Máquez, 2011).

### **2.2.3. Ciclo De Refrigeración Por Compresión De Vapor**

Para la compresión a vapor existen consideraciones a tomar con respecto al ciclo de Carnot, mencionadas a continuación:

- El fluido de trabajo, debe estar en la etapa de vapor, para el proceso de compresión,
- Se implementa una válvula de estrangulamiento, para la expansión del refrigerante por ser un elemento más económico y casi nada de mantenimientos
- La temperatura de condensación no debe limitarse a la zona de saturación.

Varios características asociados al ciclo invertido de Carnot, se suprime al evaporar el refrigerante completamente antes de que se comprima y al sustituir la turbina con un dispositivo de estrangulamiento, tal como una válvula de expansión o tubo capilar (Máquez, 2011).



**Figura 3-2: Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor**

Fuente: (Yunis Cengel y Michael Boles, S/A, p.30)

Para cada proceso, la ecuación general de energía en régimen estacionario por unidad de masa, despreciando la variación de la energía cinética y potencial está dada por:

$$q + w = h_{salida} - h_{entrada} \quad \text{Ecuación 1-2.}$$

La capacidad de refrigeración, es el flujo de calor transferido en el evaporador planteada así:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad \text{Ecuación 2-2.}$$

En el compresor y en el proceso de estrangulamiento no se transfiere calor, mientras que sólo existe trabajo en el proceso de compresión. El coeficiente de operación del ciclo está dado por:

$$COP_{REF} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{W_{comp}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad \text{Ecuación 3-2.}$$

#### 2.2.4. Refrigerante

Un refrigerante de manera general es un cuerpo que provoca enfriamiento, extrayendo calor de un cuerpo o sustancia. Si se habla de refrigeración mecánica por evaporar un líquido y comprimir vapor, se habla de un refrigerante como el medio para transportar calor desde un punto de ebullición a baja temperatura hasta donde lo saca al condensarse a alta temperatura y presión.

En refrigeración mecánica son insustituibles los refrigerantes. Las sustancia que cambie de líquido-vapor y contrario son refrigerantes y dependiendo del rango de presiones y temperaturas a que haga estos cambios, va a tener una aplicación útil comercialmente (VALYCONTROL, 2011).

La letra R representa a los refrigerantes, La ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), plantea la identificación para los refrigerantes.

#### 2.2.4.1. *Propiedades Termodinámicas*

- Presión
- Temperatura
- Volumen
- Entalpía
- Densidad
- Entropía

#### 2.2.4.2. *Propiedades Físicas y Químicas*

- No tóxico, no venenoso.
- No explosivo, no inflamable.
- No debe tener efecto sobre otros materiales.
- Fácil de detectar cuando se fuga.
- Debe ser miscible con el aceite.
- No debe reaccionar con la humedad.
- Debe ser un compuesto estable.

#### 2.2.5. *Modelación: Algoritmo de Regresión*

Dentro de la teoría estadística, el análisis de regresión es de gran utilidad en casi todas las disciplinas científicas, y en particular en todas las especialidades de ingeniería. Se emplea para estimar la relación existente entre variables, en la mayoría de los casos se puede determinar la ecuación que mejor representa la relación que existe entre las variables analizadas (Arzola, 2000). Las ecuaciones de regresión se clasifican en lineales y no lineales.

Siguiendo el proceso mencionado por Magnani y Nocedal para conseguir las ecuaciones finales por el método de regresión es:

1. Selección de todos los factores “sospechosos” de ejercer influencia sobre la variable dependiente y generación de estos factores. Aquí se pueden utilizar procedimientos auxiliares diferentes. Por ejemplo, de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente se hallan modelos monomiales por el algoritmo expuesto, a los que se pueden adicionar los logaritmos de las variables independientes (los que de todas formas quedan disponibles como resultado de la generación de la función monomial original).
2. Se encuentra la ecuación de regresión con todos los factores “sospechosos” (sean, por ejemplo, k factores).
3. Se busca el coeficiente de correlación múltiple y el error estándar de la ecuación.
4. Se elimina el factor con menor coeficiente de correlación parcial y se halla una nueva ecuación de regresión con k - 1 factores. Este proceso se repite mientras se observe el incremento del coeficiente de correlación múltiple o la reducción del error estándar (inicialmente ambos coeficientes mejoran, con posterioridad el coeficiente de correlación múltiple comienza a disminuir y continúa reduciéndose el error estándar).
5. Finalmente, se verifica el cumplimiento de los requisitos formulados con anterioridad. Si ellos se cumplen, para valores del error estándar tales que  $2\sigma \leq \delta$  donde  $\sigma$  es el error estándar de la ecuación y  $\delta$  es el error máximo permisible en la estimación de la variable dependiente, se puede dar por definido el modelo buscado.

En la práctica, si el coeficiente de correlación múltiple es superior a 0,9; el error de apreciación es inferior al permisible y más de 95 % de los errores de estimación son inferiores a  $\pm 2\sigma$ , se cumplen generalmente los requisitos señalados (Carbonell, 2008).

#### 2.2.5.1. *Determinación de coeficientes de linealización.*

El problema de estimar la ecuación de regresión, es decir, determinar los coeficientes del modelo, se realiza de forma tal de asegurar el mínimo error de estimación. Se utiliza el criterio:

$$\min_{\substack{\text{parámetros} \\ \text{de la ecuación}}} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{Ecuación 4-2.}$$

Donde:

$y_i$ : Resultados experimentales.

$\hat{y}_i$ : Valor calculado de  $y$  para los mismos valores de las variables independientes, para los que se obtuvieron los respectivos valores  $y_i$ .

Los coeficientes de la ecuación de regresión calculados en correspondencia con (2.4) se denominan estimadores mínimo cuadráticos y la ecuación correspondiente ecuación de regresión mínimo cuadrática (Carbonell, 2008).

#### 2.2.5.2. *Linealización del modelo*

El empleo de determinadas transformaciones, permiten convertir una gran cantidad de modelos no lineales en los parámetros de modelos lineales, y por tanto, se aplican las técnicas de regresión lineal a este grupo de modelos.

A continuación se puede ver uno de estos modelos y las transformaciones que se deben emplear para su linealización (Arzola, 2006).

#### 2.2.5.3. *Modelo Monomial*

El modelo monomial (Magnani, 2005), es de la forma:

$$y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_n^{b_n} . \quad \text{Ecuación 5-2.}$$

Empleando logaritmo de cualquier base, se obtiene el modelo lineal siguiente:

$$\log y = \log b_0 + b_1 \log x_1 + b_2 \log x_2 + \dots + b_n \log x_n \quad \text{Ecuación 6-2.}$$

Dónde los coeficientes  $b_0, b_1, \dots, b_n$ ; corresponden a las potencias de mejor ajuste del modelo monomial original.

La suma de una o más monomiales, corresponden a la función de la forma:

$$\varphi(x) = \sum_{k=1}^m c_k x_1^{\alpha_{1k}} x_2^{\alpha_{2k}} \dots x_n^{\alpha_{nk}} = \sum_{k=1}^m c_k \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_{ik}} \quad \text{Ecuación 7-2}$$

Dónde  $c_k > 0$ , se denomina posinomial, con  $m$  términos de las variables:  $x_1, \dots, x_n$ .

Esta función se denomina signomial; si a esta función se incluyen en la suma términos logarítmicos de las variables independientes, entonces la función de aproximación resultante se denomina logarítmico signomial (Magnani, 2005), y (Nocedal, 1999).

La elaboración de funciones posinomiales se obtienen a partir de las funciones monomiales mediante la regresión no lineal; mientras que la elaboración de las funciones signomiales y logarítmico signomiales pueden obtenerse con la ayuda de las técnicas de regresión lineal, mediante el procedimiento de la selección de la mejor ecuación de regresión (Arzola, 2000).

#### **2.2.6. *Lógica Difusa***

El sistema de inferencia difusa es una estructura computacional muy común aplicada en los conceptos de la teoría difusa, en reglas del tipo si-entonces. La lógica difusa, actualmente ya tiene aplicaciones exitosas dentro de una gran variedad de áreas tales como el control automático, la clasificación de datos, el análisis de decisiones, los sistemas expertos, la predicción de series de tiempo, la robótica y en el reconocimiento de patrones. A causa de su naturaleza multidisciplinaria, los sistemas de inferencia difusa son conocidos como sistemas experto, modelos difusos, controladores lógicos difusos o simplemente como sistemas difusos (Wen Yu Liu, 2005).

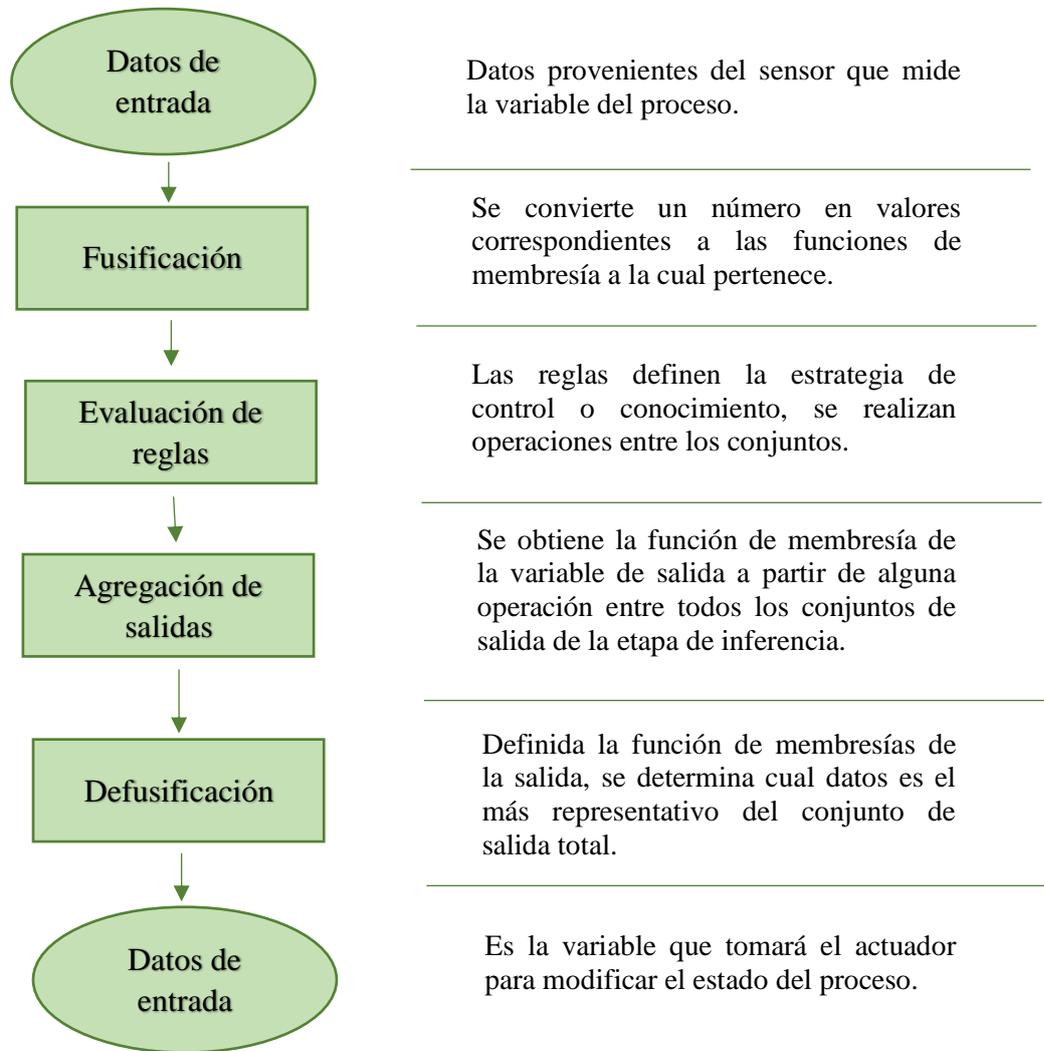
#### **2.2.7. *Lógica Difusa y Sistemas de Control***

La incorporación de lógica difusa a los sistemas de control da lugar a lo que se llama sistemas de control difuso. Los sistemas de control cubre dos aspectos importantes: el modelado o identificación y el control propiamente dicho o control directo. El enfoque se basa en el control de procesos suponiendo conocido el modelo de este.

La idea es muy simple, se trata de determinar de manera lógica lo que se debe hacer para lograr los objetivos de control de mejor manera posible a partir de una base de conocimiento entregado por un operador, sin esta base no es posible desarrollar una aplicación y que esta funcione de manera correcta.

Se utiliza el conocimiento y experiencia de un operador humano para construir un controlador que emule el comportamiento del sistema, comparado con el control convencional (manual), el control difuso tiene dos ventajas prácticas, una es que el modelo matemático del proceso a controlar no es requerido y otra es que se obtiene un controlador no lineal desarrollado empíricamente sin complicaciones matemáticas, en realidad los desarrollos matemáticos de este tema todavía están en su infancia (Molina y Del Brio, 2002).

Los controladores difusos emplean reglas, que combinan varios conjuntos borrosos de entrada llamados antecedentes o premisas y le asocian un conjunto borroso de salida llamado consecuente o consecuencia. Involucran a conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa. A estas reglas se les llama reglas difusas o “fuzzy rules”. Son afirmaciones del tipo SI-ENTONCE, (Hualpa y Huby, 2016).



**Figura 4-2: Proceso de Inferencia Difusa**

Fuente: (Molina y Del Brio, 1997, p.12)

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA INVESTIGATIVA

#### 3.1. Recolección de Información

Para el presente proyecto se recopiló información de libros, internet, revistas científicas, trabajos de investigación, papers, patentes, guía del tutor para el desarrollo del proyecto, etc.

#### 3.2. Análisis del Sistema

Una vez que se ha obtenido la información necesaria acerca de la investigación, esta será procesada de manera ordenada y sistemática.

Los resultados serán analizados y presentados de manera técnica cumpliendo con los objetivos planteados.

#### 3.3. Selección y Dimensionamiento de Dispositivos

Para el funcionamiento de un sistema de refrigeración en la región oriental del Ecuador usando como referencia el proyecto “ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON RUEDA DESECANTE EN LA AMAZONÍA ECUATORIANA” (José Romero, 2016).



**Figura 1-3: Sistema de enfriamiento experimental**

Fuente: (Romero J, 2016, p.25)

Para empezar con la selección de equipos lo primero que se debe realizar es el cálculo de carga térmica del lugar a climatizar tomando en cuenta las siguientes cargas térmicas:

***Cargas exteriores:***

- Carga a través de paredes, cubiertas y suelos;
- Carga a través de superficies con cristales, ventanas y claraboyas;
- Carga por ventilación carga por infiltración.

***Cargas interiores:***

- Carga por ocupantes;
- Carga por iluminación;
- Carga debida a máquinas y motores;
- Carga debida a procesos industriales;
- Carga debida a la propia instalación;
- Carga debida a paso de conductos.

Para realizar el cálculo de carga se ha utilizado el programa informático Carrier, el cual es muy intuitivo y de fácil manejo; además tiene en cuenta muchos parámetros que serían complejos de considerar si los cálculos se realizaran manualmente.

Si se desea calcular el análisis con las ecuaciones empíricas, basados en la metodología de cálculo, se debería trabajar con el siguiente planteamiento (Stoecker, 1987)

**3.3.1. *Estimación de la carga sensible***

**3.3.1.1. *Carga por transmisión.***

Al existir una diferencia de temperatura a través de cualquier estructura, se producen transmisiones de calor por conducción al interior de un espacio refrigerado a través de las paredes, techos y suelo. La cantidad de calor transmitida en la unidad de tiempo dependerá de la resistencia que ofrezca dicha estructura entre los dos puntos considerados.

El flujo de calor se calcula a partir de la ecuación:

$$Q_t = A * U (t_0 - t_1)$$

**Ecuación 1-3.**

Dónde:

$Q_t$  = calor transmitido por unidad de tiempo (kW)

$U$  = coeficiente total de transmisión de calor, (kW/ m<sup>2</sup>°C)

$A$  = superficie, (m<sup>2</sup>)

$t_0$  = temperatura ambiente media, (°C)

$t_1$  = temperatura del espacio acondicionado, (°C)

### 3.3.1.2. Transmisión por radiación.

La carga transmitida se explica como la energía incidente en los locales a través de los rayos del sol que penetran por las ventanas y cuya energía es almacenada en cualquier cuerpo que se vea expuesto a ellos. Viene determinada por la siguiente expresión:

$$Q_{\text{rad}} = A_{\text{crist}} * I * f \quad \text{Ecuación 2-3.}$$

Dónde:

$Q_{\text{rad}}$  = calor por radiación, (kW)

$I$  = irradiación, (kW/m<sup>2</sup>°C)

$A_{\text{crist}}$  = área de la superficie acristalada a través de los cuales penetran los rayos del sol, (m<sup>2</sup>)

$f$  = factor de transmitancia dependiente del tipo de cristal, uso de cortinas, etc. Para este trabajo se consideró el uso de cortinas  $f = 0,6$

### 3.3.1.3. Carga aportada por los ocupantes.

Los seres humanos y demás criaturas vivientes desprenden constantemente calor. El cuerpo humano, en razón de su metabolismo, producen calor interno y lo entregan por radiación, convección y evaporación por medio del sistema respiratorio, este calor depende de la acción física que se encuentre realizando y la temperatura ambiente.

La ecuación utilizada en este caso es la siguiente:

$$q_{\text{so}} = N(\text{ICSP})F_p \quad \text{Ecuación 3-3.}$$

Donde:

$Q_{s0}$  = calor sensible aportado por las personas, (kW)

N = número de personas en los locales.

ICSP = índice de calor sensible por persona, (kW)

$F_p$  = factor de presencia de las personas en los locales.

#### 3.3.1.4. *Carga aportada por equipos eléctricos.*

De los equipos eléctricos, contribuyen a la carga de enfriamiento las luces, los motores y otros dispositivos. Los elementos de iluminación convierten la energía eléctrica en luz y calor, aportando solamente carga sensible. El calor desprendido por las luces viene dado por la ecuación:

$$q_i = 1.25 * F_u * N_b * P \quad \text{Ecuación 4-3.}$$

Dónde:

$Q_i$  = carga sensible aportada por la iluminación, (kW)

$F_u$  = factor de utilización

$N_b$  = número de bombillas

P = potencia instalada, (W)

El calor aportado por los motores eléctricos depende de que el motor esté o no situado en el local climatizado. Si toda la energía suministrada al motor permanece en el local climatizado, la potencia eléctrica total se convierte en calor. Este sería el caso de los motores de equipos eléctricos o mecánicos que están ubicados en el consultorio médico, el mismo que corresponde al motor del refrigerador.

$$q_e = N * m * fu \quad \text{Ecuación 5-3.}$$

Donde:

$q_e$  = carga sensible aportada por equipos, (kW)

fu = factor de utilización

m = número de bombillas

### 3.3.1.5. *Infiltraciones.*

Esta carga que se añade es a causa del aire frío que es desplazado por el aire exterior que entra a través de las grietas alrededor de las puertas y ventanas o cuando se abre una puerta. Conociéndose el volumen de aire que entra por infiltración, la carga sensible que entra debido a esta infiltración se calcula por la ecuación:

$$q_{in} = V * \rho * C (t_0 - t_1) \quad \text{Ecuación 6-3.}$$

Dónde:

$Q_{in}$  = carga sensible por infiltración, (kW)

V = caudal de aire infiltrado, (m<sup>3</sup>/h)

$\rho$  = densidad del aire, (kg/m<sup>3</sup>)

C = calor específico del aire = 1,0245 (J/ kg°C)

### 3.3.1.6. *Ventilación.*

Para disminuir al mínimo los olores y para mantener la frescura del aire, debe suministrarse continuamente una cantidad de aire exterior a cualquier local ocupado por el público. Esta carga viene determinada por dos términos, uno sensible referido a la potencia calórica que se introduce por el simple hecho de tener dos fluidos a distintas temperaturas y otro latente que cuantifica la potencia calórica debido a la humedad relativa del aire.

La ecuación necesaria es la siguiente:

$$q_{sv} = 1.2 * V_v (T_E - T_L) \quad \text{Ecuación 7-3.}$$

Dónde:

$Q_{sv}$  = Calor sensible aportado por el aire de ventilación, (kW)

$V_v$  = Volumen de ventilación, (m<sup>3</sup>/h)

$T_E$  = Temperatura del aire exterior, (°C)

$T_L$  = Temperatura en el interior del local, (°C)

### 3.3.1.7. *Carga sensible total.*

Se realiza sumando solo las cargas sensibles:

$$Q_{ST} = q_t + q_{rad} + q_{so} + q_i + q_e + q_{in} + q_{sv} \quad \text{Ecuación 8-3.}$$

### 3.3.2. *Estimación de la carga latente.*

En el diseño de instalaciones que requieren control de humedad, una de las tareas más importantes es la cuantificación de la carga de humedad que debe ser eliminada del sistema. Sin un claro entendimiento de las dimensiones de esta carga, su frecuencia y fuente, es imposible diseñar un sistema que la elimine.

En la selección de las condiciones de diseño, las grandes diferencias de humedad entre el espacio controlado y los alrededores, dependen de la carga que aporte cada elemento.

Analizando esto, queda claro que el primer y más importante paso en el cálculo de la carga latente es la determinación de la temperatura y las cargas de humedad tanto dentro como fuera del espacio controlado. Las condiciones internas son determinadas por el producto o proceso y puede haber tantas especificaciones como diversas aplicaciones.

Existen realmente dos grupos de condiciones exteriores que deben ser seleccionados para el cálculo de la carga de humedad. El primero incluye las condiciones inmediatas de los alrededores del espacio controlado. Estos pueden ser usados para calcular las cargas que penetran a través de las paredes, apertura de puertas y fugas de aire. El segundo grupo de condiciones es la temperatura y humedad del aire fresco que entra al espacio para ventilación o para renovar el aire en la sala. Una vez seleccionadas las condiciones de diseño, externas e internas, se puede realizar el cálculo de carga de humedad para cada elemento.

Existen 7 fuentes principales de humedad:

- Infiltraciones a través de piso, techo y paredes.
- Evaporación debido al sudor y la respiración de las personas.
- Desorción de productos húmedos.
- Evaporación de superficies húmedas o tanques abiertos.
- Infiltraciones de aire a través de agujeros o aperturas de puertas.
- Aire exterior para ventilación.

- Generación de humedad por combustión.

El presente trabajo analiza las siguientes fuentes de humedad:

- **Infiltraciones por suelo, techo y paredes.**

La humedad se puede difundir a través de los materiales sólidos a una razón proporcional a la diferencia de presión de vapor a través del material e inversamente proporcional a la porosidad del mismo.

Para calcular esta infiltración de humedad se utiliza la expresión:

$$q_{Li} = P * A (\Delta VP) \quad \text{Ecuación 9-3.}$$

Dónde:

$q_{Li}$  = carga latente por infiltración, (kW)

P = coeficiente de infiltración del material, (kW/m<sup>2</sup>kPa)

A = área de la superficie del material, (m<sup>2</sup>)

$\Delta VP$  = diferencia de presión de vapor a través del material, (KPa)

- **Humedad aportada por el personal de trabajo.**

Como estas personas trabajan en el local deshumidificado, aportan humedad debido a su respiración y a la evaporación del sudor de su piel. La razón depende de cuan duro sea el trabajo y en cierto grado del nivel de humedad existente.

En el caso del consultorio médico, corresponden a 54,4 kJ/h por personas es decir 27,2 kJ/h por persona en forma de calor sensible y 27,2 kJ/h en forma de calor latente.

Esta carga viene dada por la expresión:

$$q_{l0} = N (ICLP)F_p \quad \text{Ecuación 10-3.}$$

Dónde:

$q_{l0}$  = calor latente aportado por las personas, (kW)

$N$  = número de personas en los locales

ICLP = índice de calor latente por persona, (kW)

$F_p$  = factor de presencia de las personas en los locales

- **Infiltraciones de aire.**

Ninguna construcción o sistema de manejo de aire es herméticamente sellada, todas los locales o conductos dejan pasar una cierta cantidad de aire que transporta humedad dentro del espacio condicionado. La humedad se introduce en los locales mediante flujos de aire que penetran a través de grietas en las paredes.

Estas infiltraciones son más importantes que las que se producen a través del material de la pared. Por ejemplo, una grieta de 0.0015 m de ancho y 0.3 m de largo, deja pasar humedad a razón de 0.09472 kg/h en una ligera brisa, estas infiltraciones se calculan por la siguiente expresión:

$$q_{lg} = A * \rho * 60 * V_a(M_o - M_i) \quad \text{Ecuación 11-3.}$$

Dónde:

$q_{lg}$  = carga latente debido a infiltraciones por grietas o aberturas, (kW)

$A$  = área de la abertura, (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = densidad del aire de infiltración, (kg/m<sup>3</sup>)

$V_a$  = velocidad del aire a través de la abertura, (m/s)

$M_o$  = humedad fuera de la habitación, (g/kgaire seco)

$M_i$  = humedad dentro de la habitación, (g/kgaire seco)

- **Carga latente aportada por el aire de ventilación.**

Existen tres razones fundamentales para introducir aire fresco dentro de un sistema: para suministrar ventilación a las personas, para remplazar el aire que descargan los ventiladores y para mantener una presión de aire positiva en la habitación comparada con la de los alrededores. La cantidad de aire para cada una de estas funciones puede variar para diferentes aplicaciones.

Esta carga se calcula con la siguiente ecuación:

$$q_{lv} = 2970 * V_v(W_E - W_L) \quad \text{Ecuación 12.3}$$

Dónde:

$Q_{lv}$  = Calor latente aportado por el aire de ventilación, (kW)

$V_v$  = Volumen de ventilación, (m<sup>3</sup>/h)

$W_E$  = Humedad absoluta del aire exterior, (kg<sub>vapor de agua</sub>/kg<sub>aire seco</sub>)

$W_L$  = Humedad absoluta del aire en el local, (kg<sub>vapor de agua</sub>/kg<sub>aire seco</sub>)

- **Carga latente total.**

La carga latente total en el local se calcula mediante la sumatoria de las cargas latentes antes expuestas.

$$Q_{LT} = q_{li} + q_{lo} + q_{lg} + q_{lv} \quad \text{Ecuación 13.3}$$

- **Carga total.**

La carga total existente en el local es la suma de la carga sensible más la carga latente.

$$Q_{total} = Q_{latente} + Q_{sensible} \quad \text{Ecuación 14.3}$$

Basados en los cálculos descritos o con ayuda de un software especializado como en éste caso, ingresando toda la información descrita se obtiene:

- **Carga Térmica**

Carga Sensible total del sistema: 7,4 kW

Carga Latente total del sistema: 2,8 kW

Carga Total: 10,2kW / 2,9 TR

Flujo de aire: 2.192,53  $\frac{m^3}{h}$

- **Características Ambientales del lugar a climatizar**

Ubicación: 77,9° de longitud / 1,3° de latitud

Elevación: 564 msnm

Temperatura: (19-32) °C

Humedad: (40-97) %

El sistema debe vencer la carga térmica de 10,2kW he ingresar un flujo másico de aire de  $2.192,53 \frac{m^3}{h}$ . Una vez analizada la información obtenida se selecciona el sistema de refrigeración adecuado para compensarlas, de acuerdo a la capacidad de generar el requerimiento que el sistema de enfriamiento requiere una vez acoplados los subsistemas, para vencer la carga térmica del área a refrigerar.

Teniendo en el mercado los siguientes equipos con su respectiva información:

- ***Rueda Desecante***

Diámetro: 350 mm

Profundidad: 200 mm

Relación: 75:25

Flujo de aire proceso:  $600 \frac{m^3}{h}$

Flujo de aire regeneración:  $200 \frac{m^3}{h}$

Velocidad de rotación: (5, 10, 15) rph

- ***Rueda Entálpica***

Diámetro: 600 mm

Profundidad: 200 mm

Relación: 50:50

Flujo de aire proceso:  $600 \frac{m^3}{h}$

Flujo de aire enfriamiento:  $600 \frac{m^3}{h}$

Velocidad de rotación: (20, 25) rpm

- ***Compresor de vapor***

Potencia: 10 HP

Refrigerante: R-410a ecológico

Capacidad de enfriamiento (condensador): 60.000Btu/h

Potencia (evaporador): 460 W

Flujo de aire:  $2.200 \frac{m^3}{h}$

- **Resistencias**

Potencia: 7,2 KW

Temperatura de Regeneración: (100 a 120) °C

### **3.4. Software SCILAB**

Scilab es un software numérico computacional, en un ambiente amigable para el usuario. Es un software similar a MATLAB, para resolver problemas de algebra lineal, control, procesamiento de señales, simulaciones, optimizaciones, etc.

Fue desarrollado por una prestigiosa institución de investigación Francesa llamada INRIA. Scilab es distribuido de manera gratuita, con un código de fuente binario (Scilab, 2015).

#### **3.4.1. FISLAB**

Es un tool-box de sistemas de inferencia difusa para Scilab. Fislab permite diferentes operaciones aritmética, algoritmo de fusificación y defusificación, relaciones de implicación, y diferentes métodos de razonamiento aproximado como composición de la regla de interferencia (CRI) y Razonamiento analógico aproximado basado en la medida de similitud.

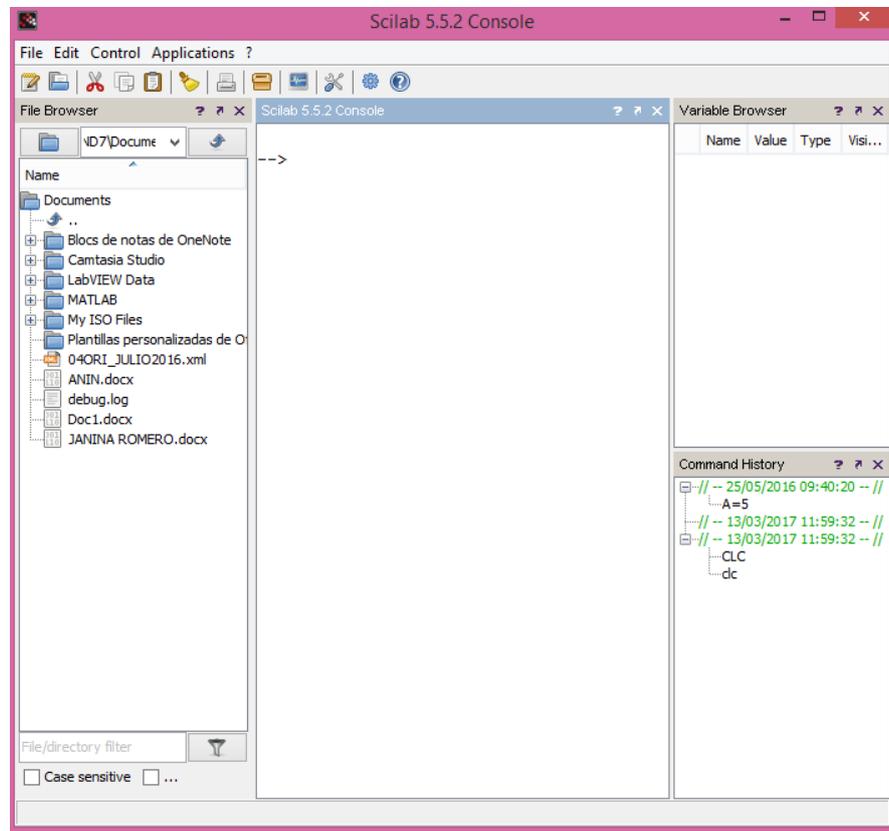
Fislab se basa en tool-box de interferencia de MATLAB desarrollada por el Prof. Zadeh, llamado Fismat.

Fislab está fuertemente basado en Fismat. Las estructuras de datos son las mismas, los sistemas de inferencia difusa son las mismas y el proceso de fusificación y defusificación son muy similares. Como se ve, las principal diferencia están en que Fislab representa la salida y los resultados del proceso de defusificación (Ortega, 1997).

Fislab es un sistema de inferencia difusa compuesto de los siguientes subsistemas:

- Un subsistema de fusificación,
- Una base de datos de conocimiento,
- Un mecanismo de razonamiento difuso (control de lógica difusa),
- Un subsistema de defusificación,

El usuario del tool-box comienza construyendo los universos del discurso para las variables del controlador. Luego la base de datos de reglas. Finalmente, el usuario activará los diferentes motores de inferencia proporcionados en la herramienta.



**Figura 2-3: Entorno de Scilab**

Fuente: (SCILAB, S/A, S/P)

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Modelación

Se inicia describiendo el diseño y comportamiento de los dos sistemas a los cuales se refiere el presente proyecto, como primero caso el sistema de enfriamiento híbrido controlado de manera manual (convencional), observándose en la Figura 4.1, y el segundo un sistema de enfriamiento híbrido con un control difuso, Figura 4.2.

Estudiando las características dinámicas del sistema de enfriamiento híbrido – control convencional, basados en el trabajo experimental “Estudio experimental de un sistema de enfriamiento con rueda desecante en la Amazonía Ecuatoriana”. (Romero J, 2016), se señala las siguientes:

Las condiciones meteorológicas del lugar a climatizar corresponden a un clima cálido y húmedo, la temperatura ambiente diaria varía entre 24,9°C a 30,9°C, y la humedad relativa ambiente diaria varía de 73,7% a 86,7%.

De acuerdo a las condiciones ambientales de confort según (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2006) se requiere una temperatura de bulbo seco menor de 20°C y una humedad relativa menor de 60%, valores que se buscan obtener con el control difuso a implementar.

Para empezar se describe el sistema de enfriamiento híbrido / control manual, punto (1) ingresa el aire del exterior y entra en contacto con la rueda desecante de sílica gel, que por medio de un proceso de sorción se obtiene la reducción de humedad y el aumento de la temperatura del aire en el punto (2).

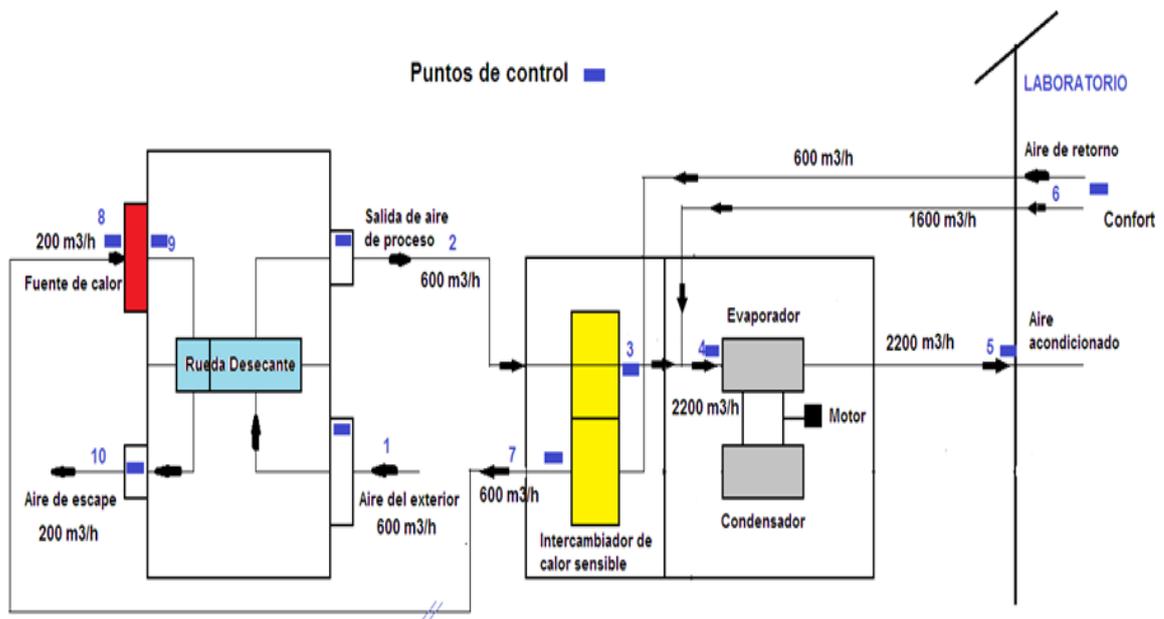
El aire caliente y seco del punto (2) se enfría en el intercambiador de calor, saliendo en por el punto (3) con una temperatura más baja al punto anterior. Inmediatamente este flujo de aire se mezcla con el flujo de aire de la condición en el punto (6) que retorna del lugar a climatizar e

ingresa en la condición del punto (4) el cual pasa por un sistema de enfriamiento que reduce la temperatura del aire provocando el aumento de humedad relativa pasando por el evaporador, hasta llevarlo a las condiciones dadas en el punto (5) donde ingresa el aire al lugar a climatizar.

Para la regeneración de la sílica gel se toma el aire de retorno del punto (6) que pasa en contraflujo por el intercambiador para enfriar el aire del proceso.

La salida del punto (7) se emplea para alcanzar la temperatura de regeneración en el punto (8) requerida para evaporar el agua adsorbida por la rueda desecante, en esta sección se encuentra trabajando para que una gran cantidad de calor se emitida por un panel solar de aire y en situaciones donde el panel no avance a cubrir la temperatura de regeneración se use niquelinas que permitan llegar a la temperatura deseada, las mismas que actualmente producen el total de temperatura necesario para la regeneración de la sílica gel.

El aire a la entrada de la rueda desecante en el punto (9) se encuentra a la temperatura de regeneración y pasa a través del rotor desecante siendo descargado al exterior en el punto (10) con una temperatura menor y una humedad mayor que en el punto (9).



**Figura 1-4: Sistema de Enfriamiento Híbrido / Control Manual**

Fuente: (Romero J, 2016, p. 22)

Sistema del cual Romero José, (Romero J, 2016), extiende los siguientes datos obtenidos después de las pruebas realizadas de manera experimental:

**Tabla 1-4:** Datos experimentales Sistema Híbrido – Control convencional

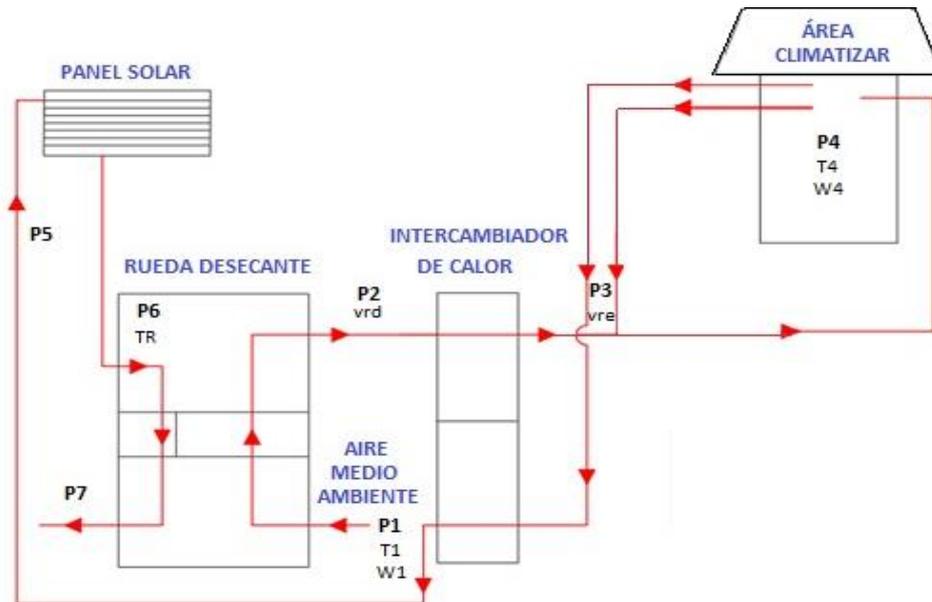
Exp	vrđ	TR	vre	T1	w1	HR1	T4	w4	HR4	T5	W5	HR5	T6	W6	HR6
1	5	60	20	27,6	20,2	80,4	21,4	8,8	52	14,1	6,9	64,5	19,3	7,6	51,2
2	5	60	25	26,3	19,8	85,2	21,3	8,9	52,6	14,2	6,9	64,1	19,4	7,7	51,3
3	5	70	20	26,9	20,3	84,3	21,5	8,8	51,5	14,1	6,8	63,6	19,2	7,6	51,2
4	5	70	25	27,1	20,1	82,5	21,2	8,9	52,9	14,3	6,6	61,1	19,4	7,5	50,2
5	5	80	20	27,4	19,3	77,9	21,9	8,5	48,7	14,1	6,5	60,4	19,3	7,5	50
6	5	80	25	27,9	19,4	76,1	21,6	8,6	50	14,2	6,3	58,2	19,2	7,4	49,8
7	10	60	20	27	20,3	83,8	21,4	8,7	51	14,1	6,8	63,6	19,3	7,5	50,3
8	10	60	25	27,3	20,3	82,3	21,4	8,9	52,4	14,1	6,8	63,6	19,4	7,6	50,9
9	10	70	20	28,1	20,5	79,3	21,6	8,6	50,1	14,1	6,8	63,6	19,3	7,5	50
10	10	70	25	28,3	20,4	78	21,4	8,7	51,1	14,2	6,9	63,6	19,4	7,3	48,9
11	10	80	20	26,2	19,5	84,4	22,1	8,4	47,4	14	6,4	60,2	19,3	7,4	49,5
12	10	80	25	26,6	19,3	81,7	22,1	8,4	47,4	14,1	6,3	58,6	19,2	7,3	49
13	15	60	20	26,4	20,2	86,3	21,6	8,9	51,7	14,1	6,8	63,6	19,1	7,6	51,5
14	15	60	25	28,1	20,9	81	21,4	8,7	51,1	14,1	6,8	63,6	19,3	7,5	50,3
15	15	70	20	26,8	20,5	85,6	21,6	8,4	48,6	14	6,5	61,2	19,1	7,2	49
16	15	70	25	26,2	20,5	88,7	21,1	8,8	54,2	14,1	6,8	63,6	19,3	7,7	51,3
17	15	80	20	26,7	19,5	82	21,4	8,2	45,5	14	6,3	59,4	19,2	7,2	48,8
18	15	80	25	26,3	19	81,9	22,1	8,5	46,3	14,1	6,2	58,2	19,3	7,1	47,4

Fuente: (Romero J, 2016, p.40)

Analizando la Tabla 4.1, se compara todos los puntos encontrando que los valores en el P4 y P6 poseen valores muy semejantes, el P4 es el ingreso al aire acondicionado (equipo de compresión de vapor) y el P6 es el valor obtenido al final del desarrollo de todo el sistema (área climatizada), por lo que se desea encontrar la variable que más influye, para que el sistema funcione hasta el P4 provocando los mismos valores que en el sistema de enfriamiento híbrido – control manual arroja en el P6, teniendo como objetivo suprimir el uso del equipo de compresión de vapor.

Para describir el segundo caso que es el sistema de enfriamiento híbrido - control difuso, para lo cual se ha realizado el siguiente diseño, eliminando el equipo de aire acondicionado (compresor de vapor), para una vez estudiado realizar su respectivo control el mismo que permitirá decidir los valores más precisos para lograr pese a la reducción de energía, la misma eficiencia del

sistema de enfriamiento híbrido convencional descrito anteriormente, planteando el sistema que se muestra en la Figura 4.2:



**Figura 2-4: Sistema de Enfriamiento Híbrido / Control Difuso**

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

Para poder plantear el control difuso como primera etapa se tiene el estudio de toda la bibliografía posible que han desarrollado trabajos relacionados con sistemas de enfriamiento, especialmente aquellos que contienen principios y aplicaciones de sistemas de enfriamiento con rueda de desecante, dentro de los estudios con mayor influencia se tiene (Yadav Y and Kaushik S, 1991), (Carbonell T, 2008), (Wang R, Ge T, 2010) Y (Romero J, 2016).

De los cuales se analiza los mejores valores de trabajo para la rueda de sílica gel, rueda entálpica conjuntamente con un sistema convencional de compresión a vapor, para simular un sistema de enfriamiento híbrido.

- vrd, Velocidad de rueda de desecante (Sílica Gel): De (5, 10, 15) rph
- vre, Velocidad de rueda entálpica: De (20, 25) rpm
- TR, Temperatura de Regeneración Sílica Gel: De (60, 70, 80) °C

En vista que se tiene un sistema MIMO (múltiples entradas – múltiples salidas) se elige, simular un control difuso, por la posibilidad que presta dicho control a utilizar el conocimiento y experiencia adquirida por el personal que ha estudiado o manejado de manera practica el sistema y sin la necesidad de obtener un modelo matemático muy complejo para su estudio, por lo que en este caso lo que se hace es buscar un modelo matemático utilizando datos

experimentales, permitiéndonos tener un análisis más preciso para plantear el control, esperando obtener valores cercanos a la realidad de las dos variables de salida deseadas.

Al tener un sistema MIMO, es difícil tratar de predecir el comportamiento de cada variable de manera predictiva, por lo que pese a trabajar sobre un control difuso es necesario saber de alguna manera el comportamiento de las variables dependientes cuando se lleva a superar los límites de trabajo recomendados por la bibliografía revisada, valores que sirven para limitar los rangos donde cada subsistema es correctamente funcional, obteniendo:

**Tabla 2-4:** Variables Independientes

VARIABLES	RANGO
vrd	5,10,15
vre	20,25
TR	60,70,80

Fuente: (Romero J, 2016, p.15)

A más de las variables mencionadas gracias a la estación geoestacionaria instalada en la Amazonía se tiene el siguiente rango con respecto a T1y W1, que son los valores que alcanzan la Temperatura y Humedad Ambiente, las mismas que serán modificadas por el sistema de enfriamiento híbrido hasta llegar a los valores recomendados:

**Tabla 3-4:** Variables Independientes Externas (Medio Ambiente)

VARIABLES	RANGO
T1	(26-29) °C
W1	19-21(73.7-88.8)%

Fuente: (Romero J, 2016, p.15)

Como se puede observar el rango de la información del operario no cubre toda el área de posibilidades, por lo que se busca una relación con mayor dependencia entre las variables que influyen en T4 y W4, buscando el comportamiento de cada variable cuando se inclinan a sus extremos superior e inferior.

Para la modelación del sistema se empieza ingresando la información experimental del comportamiento en cada uno de los putos que fueron obtenidos del proyecto: “ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON RUEDA DESECANTE EN LA AMAZONÍA ECUATORIANA”, (Romero J, 2016), que permitirá plantear el control difuso con mayor precisión.

Una vez analizada gran parte de la bibliografía que trabajan en modelado de sistemas relacionados con el sistema de enfriamiento híbrido se ha concluido que el uso de regresión Múltiple es el más recomendado a utilizar en estos sistemas:

Lo primero es analizar las variables de interés para obtener las condiciones deseadas.

1. Hallar los exponentes de linealidad aplicando el Modelo de Magnani:

$$T4 = a + b * \text{LOG}(T1) + c * \text{LOG}(W1) + d * \text{LOG}(vrd) + e * \text{LOG}(Tr) + f * (vre) \quad \text{Ecuación 1-4.}$$

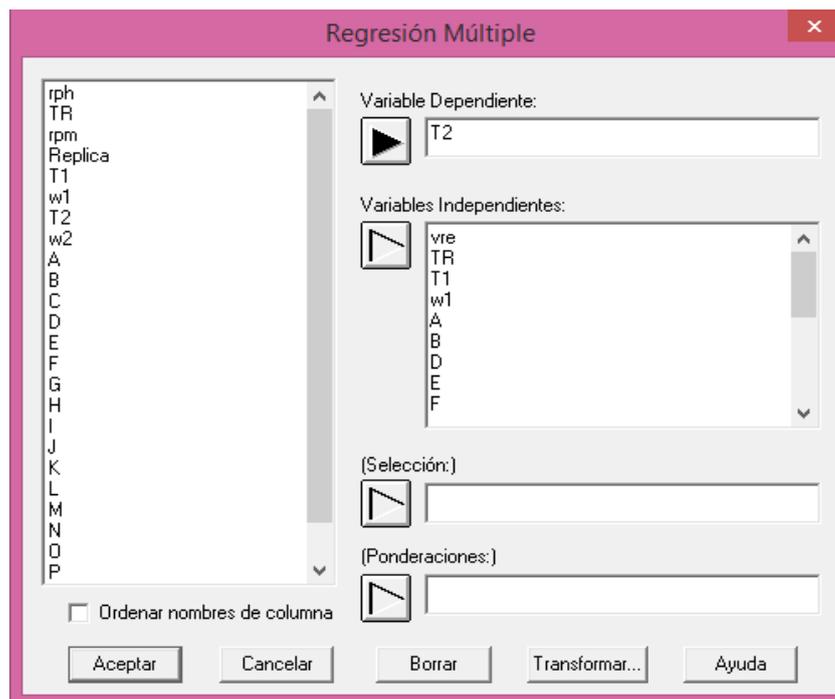
$$W4 = a + b * \text{LOG}(T1) + c * \text{LOG}(W1) + d * \text{LOG}(vrd) + e * \text{LOG}(Tr) + f * (vre) \quad \text{Ecuación 2-4.}$$

**Tabla 4-4:** Potencias de Linealización

Variables	Potencias para T4	Potencias para W4
T1	-0,314865	-0,893237
w1	-11,0458	5,14197
Vrd	0,237415	-0,174434
TR	0,255505	-0,767358
Vre	-0,152363	0,02976

Elaborador por: Romero, Wendy. 2017

2. Una vez que se tiene los exponentes de linealización, se plantea la ecuación logarítmica signomial, donde se plantea todas las relaciones posibles de las variables independientes insertando el exponente de linealización correspondiente a cada variable.
3. Una vez ya linealizada la ecuación se aplica Regresión Múltiple (Mínimos Cuadrados), para lo cual se debe ir eliminando los coeficientes de menor correlación parcial, hasta obtener las ecuaciones requeridas:



**Figura 3-4: Entorno Regresión Múltiple**

Fuente: (Statgraphics, S/A, S/P)

Obteniendo las siguientes ecuaciones tanto para la temperatura y humedad:

Ecuación para la temperatura (T4):

$$\begin{aligned}
 T4 = & 840803, + 1354,25*T1 - 4,88577*W1 + 0,0411249*vrd - 0,289211*TR - 0,208011*vre - \\
 & 153279,* \text{Ln}(T1) - 1,05021E6*(T1^{-0,314868}) - 5,32174E18*(W1^{-11,0458}) + \\
 & 1,49947E19*(T1^{-0,314868})*(W1^{-11,0458}) + 2107,61*(T1^{-0,314868})*(vrd^{0,237415}) + \\
 & 2,95978E18*(W1^{-11,0458})*(vrd^{0,237415}) + 9,90856E17*(W1^{-11,0458})*(TR^{0,255505}) + \\
 & 3,46638E18*(W1^{-11,0458})*(vre^{-0,152363}) - 246,621*(vrd^{0,237415})*(TR^{0,255505}) - \\
 & 1231,02*(vrd^{0,237415})*(vre^{-0,152363}) - 8,7887E18*(T1^{-0,314868})*(W1^{-11,0458}) \\
 & *(vrd^{0,237415}) - 2,78146E18*(T1^{-0,314868})*(W1^{-11,0458})*(TR^{0,255505}) - \\
 & 9,82025E18*(T1^{-0,314868})*(W1^{-11,0458})*(vre^{-0,152363}) - 5,32883E17*(W1^{-11,0458}) \\
 & *(vrd^{0,237415})*(TR^{0,255505}) - 1,7844E18*(W1^{-11,0458})*(vrd^{0,237415})*(vre^{-0,152363}) \\
 & + 407,531*(vrd^{0,237415})*(TR^{0,255505})*(vre^{-0,152363}) + 1,6457E18*(T1^{-0,314868}) \\
 & *(W1^{-11,0458})*(vrd^{0,237415})*(TR^{0,255505}) + 5,74891E18*(T1^{-0,314868}) \\
 & *(W1^{-11,0458})*(vrd^{0,237415})*vre^{-0,152363} - 8,25155E16*(W1^{-11,0458}) \\
 & *(vrd^{0,237415})*(TR^{0,255505})*(vre^{-0,152363})
 \end{aligned}$$

**Ecuación 3-4.**

Ecuación para la humedad (w4):

$$\begin{aligned}
 w4 = & 7480,17 + 11,6119*vrd + 15,965*TR - 0,141047*vre + 0,614396*T1 - 319,38*w1 + \\
 & 5072,35*\text{Ln}(W1) - 731,798*\text{Ln}(vrd) - 2594,86*\text{Ln}(TR) + 8031,23*(T1^{-0,893237}) + \\
 & 0,00254631*(W1^{5,14197}) - 0,0565403*(T1^{-0,893237})*(W1^{5,14197}) - 12257,6*(T1^{-0,893237}) \\
 & *(vrd^{-0,174434}) - 0,00473036*(W1^{5,14197})*(vrd^{-0,174434}) - \\
 & 0,00482799*(W1^{5,14197})*(TR^{-0,767358}) - 0,0020285*(W1^{5,14197})*(vre^{0,02976}) - \\
 & 201520,* (vrd^{-0,174434})*(TR^{-0,767358}) - 4299,0*(vrd^{-0,174434})*(vre^{0,02976}) - \\
 & 47507,6*(TR^{-0,767358})*(vre^{0,02976}) + 0,0844674*(T1^{-0,893237})*(W1^{5,14197})*(vrd^{-0,174434}) \\
 & + 0,100984*(T1^{-0,893237})*(W1^{5,14197})*(TR^{-0,767358}) + 0,046557*(T1^{-0,893237})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 0,893237*(W1^{5,14197})*(vre^{0,02976}) + 0,0331645*(W1^{5,14197})*(vrd^{-0,174434})*(TR^{-0,767358}) + 0,00394061*(W1^{5,14197})*(vrd^{-0,174434})*(vre^{0,02976}) + 187036,*(vrd^{-0,174434})*(TR^{-0,767358})*(vre^{0,02976}) - 0,150491*(T1^{-0,893237})*(W1^{5,14197})*(vrd^{-0,174434})*(TR^{-0,767358}) \\
& - 0,0694183*(T1^{-0,893237})*(W1^{5,14197})*(vrd^{-0,174434})*(vre^{0,02976}) - 0,0237276*(W1^{5,14197})*(vrd^{-0,174434})*(TR^{-0,767358})*(vre^{0,02976})
\end{aligned}$$

**Ecuación 4-4.**

Reemplazando valores máximos y mínimos en las ecuaciones anteriormente encontradas, es posible tener la reacción de las variables dependientes, mas no permite ser extremista con los valores a reemplazar ya que las ecuaciones están determinadas para un conjunto de datos de manera puntual, sin embargo, se observar en cada caso, el crecimiento o reducción de las variables, permitiendo plantear un comportamiento más real de la planta, este análisis se realiza para la variación de cada variable mientras las otras se mantienen dentro del rango establecido para su correcto funcionamiento, observando la inclinación a reducción o aumento de las variables dependientes, (Tabla 4.4) y de esta manera permitirnos plantear las reglas del control difuso.

**Tabla 5-4:** Comportamiento de Variables del Sistema de Enfriamiento

VARIACIÓN N #	VARIABLES						
	<i>vrd</i> (5,10,15)	<i>TR</i> (60,70,80)	<i>vre</i> (20, 25)	<i>T1</i> (26-29)	<i>w1</i> (19-21)	<i>T4 (°C)</i> <i>Calculada</i>	<i>W4 (g/kg)</i> <i>Absoluta</i>
1	5,5	60	20	26	19	20,3625416	9,28471068
2	16	80	25	28	21	17,1545575	9,64172837
3	5	59	20	26	19	20,2701031	7,75342598
4	15	81	25	28	21	17,1262478	9,92502721
5	5	60	19	26	19	20,2088281	7,83085262
6	15	80	26	28	21	17,1159675	9,91783275
7	5	60	20	25	19	19,2911022	7,21613905
8	15	80	25	29	21	18,572886	9,98879539
9	5	60	20	26	18	16,9263289	5,30568119
10	15	80	25	28	21,5	15,7717305	11,7886893

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

## 4.2. Simulación

Haciendo uso del software SCILAB, se empieza a diseñar el control difuso, declarando las variables Lingüísticas:

### **Variables Lingüísticas de entrada**

Temperatura Ambiente (T1)

Humedad Ambiente (W1)

Velocidad Rueda Desecante (vrd)

Temperatura de Regeneración (TR)

Velocidad Rueda Entálpica (vre)

### **Variables Lingüísticas salida**

Temperatura local (T4)

Humedad local (W4)

### Seguido se forma las Funciones de Membresía:

MEA: Menos Sorción / AN: Sorción Normal / MAA: Más Sorción

vrd: { $\mu$ MEA,  $\mu$ AN,  $\mu$ MAA}

MED: Menos Desorción / DN: Desorción Normal / MAD: Más Desorción

TR: { $\mu$ MED,  $\mu$ DN,  $\mu$ MAD}

MEE: Menos Enfriamiento / EN: Enfriamiento Normal / MAE: Más enfriamiento

vre: { $\mu$ MEE,  $\mu$ EN,  $\mu$ MAE}

MET: Meno Temperatura / TN: Temperatura Normal / MAT: Más Temperatura

T1: { $\mu$ MET,  $\mu$ TN,  $\mu$ MAT}

MEH: Menos Humedad / EH: Humedad Normal / MAH: Más Humedad

W1: { $\mu$ MEH,  $\mu$ HN,  $\mu$ MAH}

MAF: Más Frio / FN: Frio Normal / MEF: Menos Frio

T4: { $\mu$ MAF,  $\mu$ FN,  $\mu$ MEF}

MAS: Más Seco / SN: Seco Normal / MES: Menos Seco

W4: { $\mu$ MAS,  $\mu$ SN,  $\mu$ MES}

Obteniendo el siguiente análisis de relación:

**Tabla 6-4:** Tabla de Reglas

VARIABLES DEPENDIENTES		T4			W4		
VARIABLES INDEPENDIENTES	MEMBRESIAS	MAF (<19°C)	FN (19-20°C)	MEF (>20°C)	MAS (<45%)	SN (45-60%) 6,8-8	MES (>60%)
Vrd	MEA (1-5) rph			X			X
	AN (5-15) rph		X			X	
	MAA (15-30) rph	X			X		
TR	MED (40-60) °C			X			X
	DN (60-80) °C		X			X	
	MAD (90-100) °C	X			X		
Vre	MEE (10-20) rpm	X			X		
	EN (20-25) rpm		X			X	
	MAE (25-35) rpm			X			X
T1	MET (15-26) °C	X			X		
	TN (26-29) °C		X			X	
	MAT (29-40) °C			X			X
W1	MEH (15-19) g/kg			X	X		
	HN (19-21) g/kg		X			X	
	MAH (21-25) g/kg	X					X

**Elaborador por:** Romero, Wendy. 2017

Analizando la Tabla 4.8, la base de reglas queda expresada de la siguiente manera:

If (vrd is MEA) then (T4 is MEF) (W4 is MES)

If (vrd is AN) then (T4 is FN) (W4 is SN)

If (vrd is MAA) then (T4 is MAF) (W4 is MAS)

If (TR is MED) then (T4 is MEF) (W4 is MAS)

If (TR is DN) then (T4 is FN) (W4 is SN)

If (TR is MAD) then (T4 is MAF) (W4 is MES)

If (vre is MEE) then (T4 is MAF) (W4 is MAS)

If (vre is EN) then (T4 is FN) (W4 is SN)

If (vre is MAE) then (T4 is MEF) (W4 is MES)

If (T1 is MET) then (T4 is MAF) (W4 is MAS)

If (T1 is TN) then (T4 is FN) (W4 is SN)

If (T1 is MAT) then (T4 is MEF) (W4 is MES)

If (W1 is MEH) then (T4 is MEF) (W4 is MAS)

If (W1 is HN) then (T4 is FN) (W4 is SN)

If (W1 is MAH) then (T4 is MAF) (W4 is MES)

Una vez declaradas las variables y conjuntos difusos se procede a implementar el control difuso sobre la plataforma de SCILAB. Como primer punto se llama a la función ('editfls'), para aperturar la librería de Lógica Difusa (sciFLT), Anexo A, Anexo B.

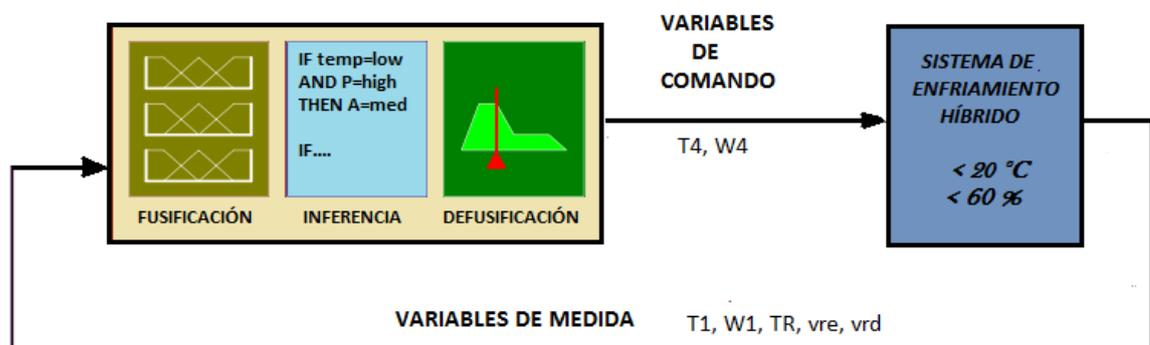
Existen autores que recomiendan un traslape de 10 a 50 %, para producir un control más suave, lo importante es que la suma de membresías del rango de traslape no deben pasar de uno, siguiendo esto, en el proyecto actual se tomara el 10 % de traslape para cada función.

Se continúa ingresando las variables de entrada, T1, W1, vrd, TR, vre, Anexo C, conjuntamente con las variables de salida, T4 y W4, Anexa D.

Tanto en la declaración de entrada como salida se ingresan los rangos de membresías.

Se forma la base de reglas, analizadas anteriormente, Anexo E.

Finalmente se obtiene la siguiente representación del Control Difuso:



**Figura 4-4: Representación Control Difuso**

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

Lo que prosigue es evaluar el control difuso en los mismos valores de trabajo del control manual para comprobar su correcto funcionamiento, Anexo F.

**Tabla 7-4:** Comparación valores de T y W Control Difuso / Control Manual

VARIACIÓN #	Valor Control Difuso			Valor Control Convencional (manual)		
	Temperatura	Humedad Absoluta	Humedad Relativa	Temperatura	Humedad Absoluta	Humedad Relativa
1	21,2	8,9	51,7	21,4	8,8	51,5
2	22	9	51,9	21,9	8,9	51,7
3	21,2	8,9	51,7	21,9	8,9	51,7
4	21,9	9	51,7	21,2	8,9	51,7
5	21,2	8,9	51,7	21,9	8,5	48,7
6	21,5	9	51,7	21,6	8,6	50,1
7	20,8	8,4	47,4	21,4	8,7	51
8	21,7	8,7	51	21,4	8,9	51,7
9	20,7	8,4	47,4	21,6	8,6	50,1
10	21,7	8,8	51,5	21,4	8,7	51
11	20,7	8,5	48,7	21,1	8,4	47,4
12	21,3	8,7	51	21,1	8,4	47,4
13	20,8	8,4	47,4	21,6	8,6	50,1
14	20,5	8,9	51,7	21,4	8,7	51
15	20,7	8,4	47,4	21,6	8,6	50,1
16	21	8,7	51	21,1	8,4	47,4
17	20,6	8,6	50,1	21,4	8,7	51
18	21,1	8,6	50,1	22,1	9,1	53,2

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

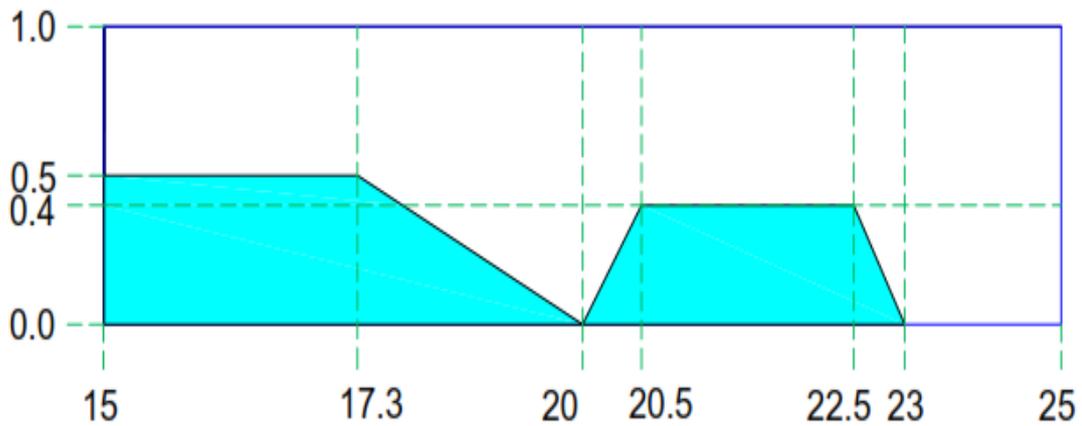
Una vez que se verifica que el control difuso de un sistema de enfriamiento híbrido entrega valores semejantes al de un control manual, se empieza a evaluar hasta conseguir los valores deseados en el (P4).

En el control difuso planteado se observa que reduciendo la variable vre, se logra los valores deseados tanto para T4 como para W4, Anexo G.

--> evalfls([15,80,15,26.2,20.9],P78)

ans = 18.565142 8.5061608

Para comprobar se realiza el cálculo de la salida (T4), que es la variable de mayor interés, por medio del cálculo del centroide, en la etapa de defusificación, donde se muestra de manera gráfica la solución de acuerdo a la variación de las variables independientes:



**Figura 5-4: Etapa de defusificación**

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

Se aplica el método del centroide:

$$\text{Salida} = \frac{\sum_{x=a}^b \mu(x) \cdot x}{\sum_{x=a}^b \mu(x)} \quad \text{Ecuación 5-4.}$$

$$= \frac{(15 \cdot 0.5) + (17.3 \cdot 0.5) + (20 \cdot 0) + (20.5 \cdot 0.4) + (22.5 \cdot 0.4) + (23 \cdot 0)}{0.5 + 0.5 + 0 + 0.4 + 0.4 + 0} = 18.53$$

De esta forma se comprueba el correcto funcionamiento del control difuso implementado para un sistema de enfriamiento híbrido de forma simulada y matemática.

Salida para T4:

$$T4_{simulada} = T4_{calculada}$$

$$18.565142 = 18.53$$

Por lo que eliminando la etapa del compresor de vapor, se tiene el siguiente consumo eléctrico:

**Tabla 8-4:** Consumo Eléctrico Sistema Híbrido - Control Difuso / Control Manual

EQUIPOS	CONSUMOS SIS. CONTROL MANUAL (KW)	CONSUMO SIS. CONTROL DIFUSO (KW)
Sistema de deshumidificación	2.81	2.81
Rueda entálpica	0.09	0.09
Resistencias eléctricas	3	3
Compreso a vapor	1.5	N/A
<b>CONSUMO ELETRICO TOTAL</b>	<b>7.4 KW</b>	<b>5.9 KW</b>

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

Provocando así un ahorro de energía eléctrica del 20,27% en la aplicación de un control difuso comparado con un control manual del sistema de enfriamiento híbrido.

### 4.3. Regeneración con Energía Renovable.

La forma en que se puede demostrar que la energía solar trae beneficio al sistema es analizando la sección de Regeneración de la sílica gel, proceso que se realiza por un flujo de aire caliente el cual elimina la humedad captada en la sílica gel.

La relación que determina el funcionamiento de una rueda desecante es: cámara de aire y cámara de regeneración y existen dos tipos: la primera con una relación 1:1 y la segunda con una relación 3:1, misma a la que se refiere el presente trabajo.

La cámara de regeneración del sistema de enfriamiento, cuenta en dicha área con resistencias eléctricas para cumplir este proceso, con un consumo de 3KW de los 7.4 KW del consumo total del Sistema de Enfriamiento –Control Manual.

Según Romero J. 2013, los valores promedios medidos de la radiación solar tomados en la Regio Oriente / Puyo oscilan entre 4.1 y 4.8 KWh/m<sup>2</sup> y su fracción solar es de 56%.

**Tabla 9-4:** Ahorro de consumo de energía Resistencia E/Panel S.

EQUIPO	CONSUMO ELECTRICO
Resistencias Eléctricas	3KW
Panel Solar	1.32 KW

Elaborador por: Romero, Wendy. 2017

Observando la Tabla 4.11, el ahorro obtenido aplicando energía renovable en la sección de regeneración de sílica gel es de 1.68 KW.

Por lo que se puede concluir que al aplicar energía solar se ahorra en un 56% del consumo eléctrico en la etapa de regeneración de sílica gel, donde actualmente se encuentran trabajando las resistencias eléctricas, teniendo el siguiente análisis:

**Tabla 10-4:** Consumo Eléctrico del Sistema de Enfriamiento –C. Manual.

EQUIPOS	CONSUMOS SIS. CONTROL MANUAL (KW)	CONSUMO SIS. CONTROL DIFUSO (KW)
Sistema de deshumidificación	2.81	2.81
Rueda entálpica	0.09	0.09
Resistencias eléctricas / Panel solar	3	1.32
Compreso a vapor	1.5	N/A
<b>CONSUMO ELETRICO TOTAL</b>	<b>7.4 KW</b>	<b>4.22 KW</b>

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

Teniendo un ahorro total:

$$\text{Ahorro} = 7.4 \text{ kw} - 4.22 \text{ kw} = 3.18 \text{ kw} (43 \%)$$

#### 4.4. Rendimiento del Sistema

$$Q_{\text{enf}} = M_T(h_1 - h_5) \quad \text{Ecuación 6-4.}$$

Dónde: Para evaluar el rendimiento del sistema de enfriamiento híbrido se debe calcular el COP, tomando en cuenta que el sistema de enfriamiento híbrido - control manual planteado por Romero J, posee un COP = 3,25.

La carga de enfriamiento del sistema híbrido - control difuso, ( $Q_{\text{enf}}$ ), se calcula de acuerdo a la ecuación:

$M_T$ : Flujo másico del aire total de enfriamiento (0,6967 kg/h)

$h_1$ : Entalpía del aire de proceso a la entrada de la rueda desecante (73,1 J/kg)

$h_5$ : Entalpía del aire de enfriamiento a la entrada del laboratorio (30.2 J/kg)

La carga de calentamiento del sistema híbrido ( $Q_{\text{cal}}$ ), se calcula según la ecuación:

$$Q_{\text{cal}} = M_R(h_9 - h_8) + W_T \quad \text{Ecuación 7-4.}$$

Dónde:

$M_R$ : Flujo másico del aire de regeneración (0,0633 kg/h)

$h_9$ : Entalpía del aire de regeneración (89,5 J/kg)

$h_8$ : Entalpía del aire a la entrada del sistema de calentamiento (56 J/kg)

$W_T$ : Potencia total de los equipos eléctricos (4.22KW)

El rendimiento del sistema de enfriamiento (COP), se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$COP = \frac{Q_{enf}}{Q_{cal}} \quad \text{Ecuación 8-4.}$$

Reemplazando valores se tiene que el COP para el Sistema de Enfriamiento Híbrido es el siguiente:

$$COP = 4,7$$

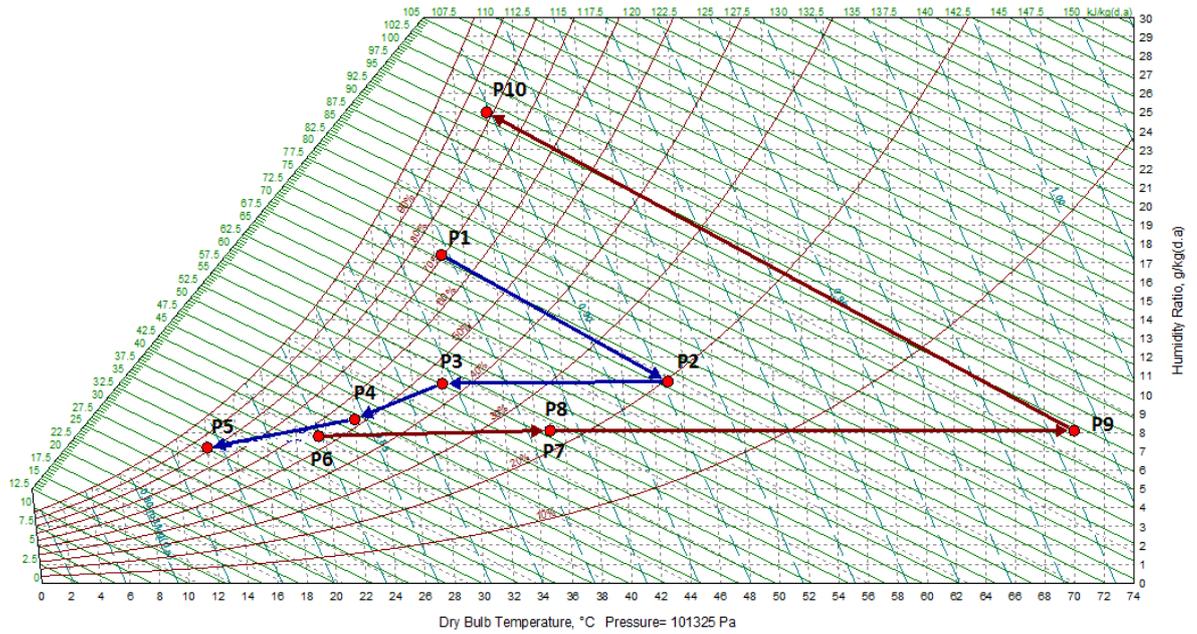
Aplicando el software Psychrometric chart + Duct Calculator, se puede observar el comportamiento de los dos sistemas, el sistema de enfriamiento híbrido controlado de forma manual, Figura 4.10 y el sistema de enfriamiento híbrido aplicando un control difuso Figura 4.11:

**Tabla 11-4:** Valores de Temperatura y Humedad / Control Manual

PUNTOS	TEMPERATURA (°T)	HUMEDAD ABSOLUTA (g/kg)	HUMEDAD RELATIVA (%HR)
P1	28.5	17.4	70.616
P2	43	10.7	19.737
P3	28	10.58	44.653
P4	22	8.70	53.642
P5	12	7.19	82.231
P6	19.5	7.80	55.131
P7	35	8.10	23.054
P8	70	8.10	41.59
P9	70	8.10	41.59
P10	32	25.00	81.956

Fuente: (Romero J, 2016, p.17)

En la Figura 4.10, se pueden observar los procesos a los que es sometido el flujo de aire a climatizar y la etapa de regeneración del desecante en la rueda para el siguiente experimento: velocidad de rotación de la rueda desecante igual a 15 rph, Temperatura del aire de regeneración en la rueda desecante igual a 70°C y velocidad de rotación de la rueda entálpica igual a 25 rpm.



**Figura 6-4: Diagrama psicrométrico / Control Manual.**

Fuente: (Romero J, 2016, p.35)

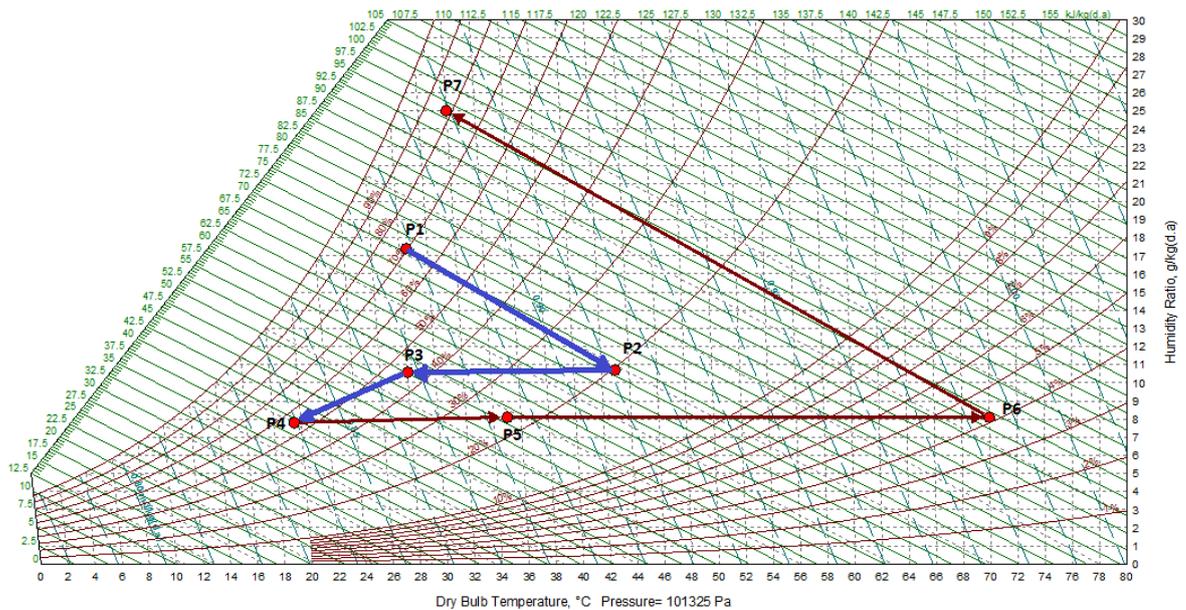
Para el segundo sistema se tiene:

**Tabla 12-4: Valores de Temperatura y Humedad / Control Difuso**

PUNTOS	TEMPERATURA (°T)	HUMEDAD ABSOLUTA (g/kg)	HUMEDAD RELATIVA (%HR)
P1	28.5	17.4	70.616
P2	43	10.7	19.737
P3	28	10.58	44.653
P4	19.5	7.8	55.131
P5	35	8.1	23.054
P6	70	8.1	41.59
P7	32	25	81.956

Elaborador por: ROMERO, Wendy.2017

En la Figura 4.11, se pueden observar los procesos a los que es sometido el flujo de aire a climatizar y la etapa de regeneración del desecante en la rueda para el siguiente experimento: velocidad de rotación de la rueda desecante igual a 15 rph, Temperatura del aire de regeneración en la rueda desecante igual a 80°C y velocidad de rotación de la rueda entálpica igual a 15 rpm.



**Figura 7-4: Diagrama psicrométrico / Control Difuso**

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

#### 4.5. Validación de la Hipótesis

Para la validación de la hipótesis se emplea una tabla de contingencia, esto con el fin de asociar las variables que intervienen en la hipótesis y determinar si las variables son dependientes, en este caso se habla de una hipótesis afirmativa, caso contrario si las variables son independientes la hipótesis será nula (De La Fuente S, 2016 ).

En el presente proyecto se aplica la prueba de Chi cuadrado para evaluar las hipótesis estadísticas:

##### **Independencia de Variables (Hipótesis Nula)**

H0: El modelamiento y simulación de un control difuso para un sistema de enfriamiento híbrido NO permitirá incrementar la eficiencia energética

##### **Variables Relacionadas (Hipótesis Alternativa)**

H1: El modelamiento y simulación de un control difuso para un sistema de enfriamiento híbrido permite incrementar la eficiencia energética

En la Tabla 4.14, muestra la base de datos obtenidos por medio del control difuso comparado con los datos experimentales del Sistema de enfriamiento híbrido - control manual, sabiendo que los valores de temperatura van de (21-22) °C.

**Tabla 13-4:** Comparación de Control difuso / manual

VARIACIÓN #	TEMPERATURA (°C)	
	<i>Control Difuso</i>	<i>Control Manual</i>
1	21,2	21,4
2	22	21,9
3	21,2	21,9
4	21,9	21,2
5	21,2	21,9
6	21,5	21,6
7	20,8	21,4
8	21,7	21,4
9	20,7	21,6
10	21,7	21,4
11	20,7	21,1
12	21,3	21,1
13	20,8	21,6
14	20,5	21,4
15	20,7	21,6
16	21	21,1
17	20,6	21,4
18	21,1	22,1

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

Seguido se plantea la tabla de contingencia:

**Tabla 14-4:** Tabla de Contingencia

TEMPERATURA	CONTROL		TOTAL
	<i>difuso</i>	<i>manual</i>	
20,5	1	0	1
20,6	1	0	1
20,7	3	0	3
20,8	2	0	2
21	1	0	1
21,1	1	3	4
21,2	3	1	4
21,3	1	0	1
21,4	0	6	6
21,5	1	0	1
21,6	0	4	4
21,7	2	0	2
21,9	1	3	4
22	1	0	1
22,1	0	1	1
TOTAL	18	18	36

Elaborador por: ROMERO, Wendy. 2017

Luego se debe calcular el chi cuadrado de acuerdo a la fórmula:

$$Xc^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad \text{Ecuación 9-4.}$$

$$e_{i1} = \frac{18-1}{36} = 0,5$$

$$e_{i9} = \frac{18-6}{36} = 3$$

$$e_{i2} = \frac{18-1}{36} = 0,5$$

$$e_{i10} = \frac{18-1}{36} = 0,5$$

$$e_{i3} = \frac{18-3}{36} = 1,5$$

$$e_{i11} = \frac{18-4}{36} = 2$$

$$e_{i4} = \frac{18-2}{36} = 1$$

$$e_{i12} = \frac{18-2}{36} = 1$$

$$e_{i5} = \frac{18-1}{36} = 0,5$$

$$e_{i13} = \frac{18-4}{36} = 2$$

$$e_{i6} = \frac{18-4}{36} = 2$$

$$e_{i14} = \frac{18-1}{36} = 0,5$$

$$e_{i7} = \frac{18-4}{36} = 2$$

$$e_{i15} = \frac{18-1}{36} = 0,5$$

$$e_{i8} = \frac{18-1}{36} = 0,5$$

$$\begin{aligned} Xc^2 = & \frac{(1-0,5)^2}{0,5} + \frac{(1-0,5)^2}{0,5} + \frac{(3-1,5)^2}{1,5} + \frac{(2-1)^2}{1} + \frac{(1-0,5)^2}{0,5} + \frac{(1-2)^2}{2} + \frac{(3-2)^2}{2} + \frac{(1-0,5)^2}{0,5} + \\ & \frac{(0-3)^2}{3} + \frac{(1-0,5)^2}{0,5} + \frac{(0-2)^2}{2} + \frac{(2-1)^2}{1} + \frac{(1-2)^2}{2} + \frac{(1-0,5)^2}{0,5} + \frac{(0-0,5)^2}{0,5} + \frac{(0-0,5)^2}{0,5} + \frac{(0-0,5)^2}{0,5} + \\ & \frac{(0-1,5)^2}{1,5} + \frac{(0-1)^2}{1} + \frac{(0-0,5)^2}{0,5} + \frac{(3-2)^2}{2} + \frac{(1-2)^2}{2} + \frac{(0-0,5)^2}{0,5} + \frac{(6-3)^2}{3} + \frac{(0-0,5)^2}{0,5} + \frac{(4-2)^2}{2} + \\ & \frac{(0-1)^2}{1} + \frac{(3-2)^2}{2} + \frac{(0-0,5)^2}{0,5} + \frac{(1-0,5)^2}{0,5} \end{aligned}$$

$$Xc^2 = 27,00$$

A continuación se obtiene los grados de libertad:

$$g = (f-1)(c-1) = (2-1)(15-1) = 14$$

Valores con los cuales se consulta en la tabla del Chi cuadrado (Figura 4.11) y se determina su valor.

g	p										
	0.001	0.025	0.05	0.1	0.25	0.5	0.75	0.9	0.95	0.975	0.999
1	10.827	5.024	3.841	2.706	1.323	0.455	0.102	0.016	0.004	0.001	0
2	13.815	7.378	5.991	4.605	2.773	1.386	0.575	0.211	0.103	0.051	0.002
3	16.266	9.348	7.815	6.251	4.108	2.366	1.213	0.584	0.352	0.216	0.024
4	18.466	11.143	9.488	7.779	5.385	3.357	1.923	1.064	0.711	0.484	0.091
5	20.515	12.832	11.07	9.236	6.626	4.351	2.675	1.61	1.145	0.831	0.21
6	22.457	14.449	12.592	10.645	7.841	5.348	3.455	2.204	1.635	1.237	0.381
7	24.321	16.013	14.067	12.017	9.037	6.346	4.255	2.833	2.167	1.69	0.599
8	26.124	17.535	15.507	13.362	10.219	7.344	5.071	3.49	2.733	2.18	0.857
9	27.877	19.023	16.919	14.684	11.389	8.343	5.899	4.168	3.325	2.7	1.152
10	29.588	20.483	18.307	15.987	12.549	9.342	6.737	4.865	3.94	3.247	1.479
11	31.264	21.92	19.675	17.275	13.701	10.341	7.584	5.578	4.575	3.816	1.834
12	32.909	23.337	21.026	18.549	14.845	11.34	8.438	6.304	5.226	4.404	2.214
13	34.527	24.736	22.362	19.812	15.984	12.34	9.299	7.041	5.892	5.009	2.617
14	36.124	26.119	23.685	21.064	17.117	13.339	10.165	7.79	6.571	5.629	3.041
15	37.698	27.488	24.996	22.307	18.245	14.339	11.037	8.547	7.261	6.262	3.483

**Figura 8-4: Distribución Chi Cuadrado**

Fuente: (Martínez F, 2015, p.1)

Se extrae: El valor de Chi cuadrado con una confianza de 95%

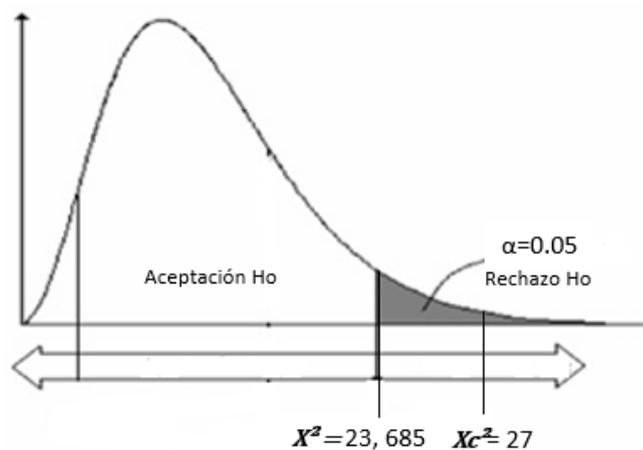
$$X^2 = 23,685$$

Para su análisis se toma en cuenta las siguientes observaciones:

$X^2 > Xc^2$  Se acepta la Hipótesis Nula

$X^2 \leq Xc^2$  Se rechaza Hipótesis Nula

Por último se compara el cálculo del Chi cuadrado con el valor de la Figura 4.11:



**Figura 9-4: Ubicación valores Chi Cuadrado**

Elaborador por ROMERO, Wendy. 2017

Obteniendo:

$$23,685 \leq 27$$

$$X^2 \leq Xc^2$$

Se rechaza Hipótesis Nula

De acuerdo al valor obtenido se RECHAZA la hipótesis nula.

Con un nivel de confianza de 95% se puede afirmar que el modelamiento y simulación de un control difuso para un sistema de enfriamiento híbrido permite incrementar la eficiencia energética

## CONCLUSIONES

El estudio y comprensión de los subsistemas que forman parte del sistema de enfriamiento híbrido permite comprender la dinámica del mismo permitiendo concluir que se trata de un sistema MIMO es decir múltiples entradas y múltiples salidas.

Al trabajar con un sistema MIMO, el reconocimiento de un modelo matemático se complica, el análisis de cada regla que rige un sistema de refrigeración de aire cuando existen más de dos variables de entrada y salida se vuelve un problema al querer plantear un control, por lo que el aplicar el Método de Regresión Múltiple se convierte en la mejor solución para el sistema, permitiendo analizar un sistema MIMO de manera más abierta, es decir sin muchas restricciones de conocimiento de reglas físico-térmicas, logrando buenos resultados en el control de las variables de interés.

Cuando existen sistemas con alta complejidad para encontrar su estabilidad de manera matemática, la mejor opción es partir de datos experimental de sistemas equivalentes al que se desee estudiar, lo que permite contar con bases para su comparación y validación.

Un control difuso para un sistema de enfriamiento híbrido, permite hacer un análisis del comportamiento de cada subsistema e ir modificando valores de ingreso para observar su comportamiento en las variables deseadas, reduciendo así la etapa de compresión de vapor que hasta ahora se tomaba en cuenta para un sistema de enfriamiento híbrido controlado de manera manual, lo cual se refleja en la reducción de 20,27 % de consumo energético, control que se implementó en el software SCILAB 5.5.2, con el uso del Fuzzy Logic Toolbox 0.4.7.

Al rendimiento ser inversamente proporcional a la energía consumida, aplicando el control difuso se logra reducir el consumo de energía, provocando de esta manera el aumento del rendimiento del sistema, por lo que el sistema de enfriamiento híbrido - control manual, posee un COP = 3,25, mientras que en el sistema con control difuso estudiado genera un COP = 4,7 obteniendo un notorio crecimiento en la eficiencia del sistema.

Sobre la ganancia que ya genera el ocupar un sistema de enfriamiento híbrido existe mejora adicional a su aplicación cuando se incluye energía solar en el subsistema de deshumidificación, esto quiere decir que en el proceso de desorción se puede eliminar el consumo de resistencias eléctricas para el secado de la sílica gel, ahorrando 1.68 KW, solo en la etapa de regeneración.

Al agrupar sistemas de deshumidificación, enfriamiento y sistema de compresión a vapor se logra obtener un sistema de mayor rendimiento que la aplicación individual de cualquier de estos, pero una vez aplicado un control difuso al mismo sistema es posible obtener valores óptimos de las variables de temperatura y humedad a más de una eficiencia energética, lo cual demuestra que la simulación de un buen control permite mejorar el comportamiento de un sistema por complejo que parezca, logrando obtener un ahorro total de 43%.

## RECOMENDACIONES

Para empezar con el análisis de un sistema dinámico lo más importante es tener claro las variables de entrada, salida y conjuntos de pertenencia para cada caso, lo cual ayuda a estar seguros de la eficiencia que presentará una vez implementado el sistema.

Sabiendo que el control difuso se genera a base de conocimiento y experiencias, pese a esto en algunos trabajos se dificulta el análisis del proceso por lo que se recomienda el planteamiento de ecuaciones de Regresión Múltiple, para poder tener claro el comportamiento de las diferentes variables de interés.

Al ser los sistemas de acondicionamiento de aire uno de los que mayor consumo energético produce en la actualidad, se recomienda estudiar cada equipo que se incluye en el sistema para saber si su aporte es significativo para cumplir los objetivos deseados, caso contrario se puede suprimir por medio de la implementación de un control bien planteado.

Una de las mejores opciones para reducir el consumo energético en un sistema de enfriamiento híbrido es incluir energía solar en la sección de regeneración de sílica gel, ya que es posible cubrir por medio de captación solar un gran porcentaje del consumo eléctrico que se requiere en esta sección del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

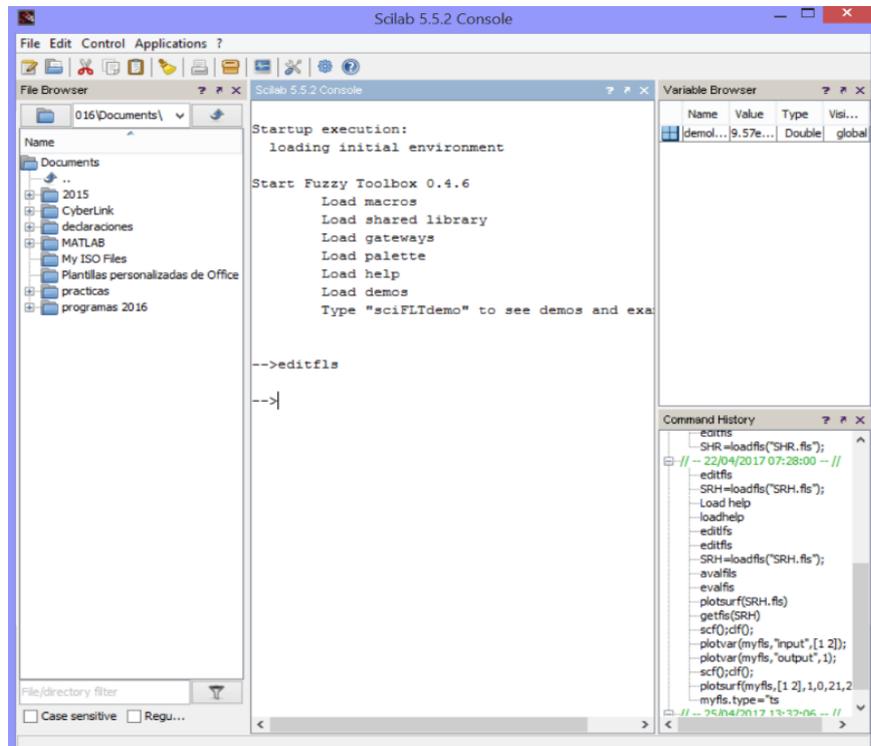
- COPELAND, C, (2007). Ciclo de Refrigeración, *Buenas prácticas en sistemas de refrigeración y aire acondicionado*, pp. 15-25, La Habana, Cuba: ISEMARNAT.
- WHITMAN, & JHONSON. (2000), Artículo: Refrigeración, *Tecnologías de la refrigeración y aire acondicionado*, *ELSERVIER*. Vol. III, pp. 10-45.
- YORK. (Marzo 2012), Artículo: Aires acondicionados, *Revista York*. Vol., 1, pp. 1-10.
- CENGEL, Y & BOLES, M. (2002), Leyes de la Termodinámica, *Termodinámica*, Segunda Edición, pp.177-300, USA: Mc Graw Hill.
- SUBRAMANYAM, N. (2004), *Application of desiccant wheel to control humidity in Air Conditioning Systems* (Tesis), Indian Institute of Technology Madras, Refrigeration and Air conditioning Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Chennai, India.
- SHAIER, L, & WOREK, W. (2004), *Analysis of heat and mass transfer in porous sorbents used rotary regenerators* (Tesis), University of Illinois at Chicago, Department of Mechanical and Industrial Engineering, USA.
- FATEMEH, E, & HASSAN M. (2006), *Modeling and simulation of desiccant Wheel for air conditioning* (Tesis), Delft University of Technology, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Mechanical Maritime and Materials Engineering, The Netherlands.
- SINGHALA, P, & SHAN, N. (January 2014), Temperature Controller by Using Fuzzy Logic, Sarvajanic College of Engineering and Technology Surat, *International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS)*, Vol.4, No.1, pp. 1-10.
- MIRELES, J, y DAMIÁN, U. (Diciembre 2010), Simulación y Comparación Energética de un Sistema de Enfriamiento por Ciclo de Absorción, *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*. Vol. 8 No. 1, pp. 1-8.
- VALYCONTROL. (Junio 2011), Manual técnico VALYCONTROL. Revista Valycontrol, Vol. VI, pp. 1-15.

- ORMEÑO, E., VIVERT, M., MARTIN, C. (2012), *Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de presión en una planta de refrigeración* (Tesis de Ingeniería en Electricidad), Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Guayaquil, Ecuador.
- ARZOLA, J. (2012), *Metodos Iterativos de la Programación No Lineal*, *Sistemas de Ingeniería*, pp. 175-195. La Habana: Félix Valera.
- Wen Yu liu. (2005), *Sistemas Difusos Jerárquicos para Modelado y Control*, (Tesis de Maestro en Ciencias), Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Molina, A, y Del Brio, B. (2002), *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. Zaragoza, España: Ra-Ma, 2da Edición.
- HUALPA, J, y HUBY, S. (2016). *Diseño, simulación e Implementación de un Prototipo de Medición de Niveles de Líquidos Mediante Técnicas de Control Difuso Utilizando Sensores Ultrasónicos*, (Tesis de Ingeniero Electrónico), Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería de Arquitectura, Lima, Perú.
- ALONSO, J. (2014). *Modelado y Control Multivariable de un Sistema de Refrigeración por Compresión de Vapor*. (Tesis de Máster). Universidad de Sevilla, Departamento de Sistemas y Automática, Sevilla, España.
- ASHRAE, A.A.S. (2016). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, in American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. *Third Public Review Draft*. Vol.1, pp. 25-30.
- CARBONELL, T. (2008). *Modelación de la operación de ruedas desecantes razón 3:1 con silica gel en climas tropicales*. (Tesis para Doctor en Ciencias Técnicas). ISPJAE, Facultad de Mecánica Centro de Tecnologías Energéticas Renovables, La Habana, Cuba.
- LA, D., DAI, J., Li, Y., & WANG, R. (2010). *Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning*. *Renewable and Sustainable Energy. ELSERVIER Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 1, pp. 1-18.

- ROMERO, J. (2013). *Tecnologías de fuentes renovables de energía para emplear en sistemas de refrigeración por sorción en la provincia de Pastaza, Ecuador*. (Tesis de Master). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica, La Habana, Cuba.
- STOECKER, W., & JONES, J. (1987), *Air-Conditioning Systems, Refrigeration and air conditioning*, pp. 88-102. Toronto: McGraw. Inc.
- CARRIER. (2012), *Hourly Analysis Program HVAC System Design Software*, in Carrier. *Carrier Corporation*. Novena Edición, pp. 38-100.
- LÓPEZ, J. (2011). *Integración de Sistemas de Refrigeración Solar en Redes de Distrito de Frío y de Calor*, (Tesis Doctoral). Universitat Rovira I, Virgili, España.
- KIM, D., & INFANTE, C. (2008). Solar refrigeration options-a state of the art review. *International Journal of refrigeration. ELSEVIER International Journal of Refrigeration*. Vol. 1, pp. 1-15.
- ROMERO, J., y Carbonell, T. (Agosto 2014). Sistema de refrigeración solar por absorción para la comunidad de Kumay en Ecuador. *Ingeniería Energética. Revista de Ingeniería Energética*, Vol. XXXVIII, pp. 1-10.
- ROMERO, J. (2016), *Estudio experimental de un sistema de enfriamiento con rueda desecante en la Amazonía Ecuatoriana*. (Tesis Doctoral), Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría Cujae, La Habana, Cuba.
- ORTEGA, G. (2007), "FISLAB: the fuzzy inference tool-box for Scilab", *Anale Seria Informatică*, Vol. V, Fas. 1, pp. 1-11.
- MAGNANI, A., & BOYD, S. (2009), *Convex piecewise linear fitting*, (Tesis Doctoral), Stanford University, Stanford, USA.
- NOCEDAL, J., & WRIGHT, S. (1999), *Linear Programming: The Simplex Method*, Editor, Thomas, V., *Numerical Optimization*, pp. 356-390, Madison, USA: Springer.
- DE LA FUENTE, S. (2016), Aplicaciones de Chi cuadrado: Tablas de contingencia, homogeneidad, dependencia e independencia. *Revista de la Universidad Autónoma de Madrid*. Vol. III, pp. 20-40.

## ANEXOS

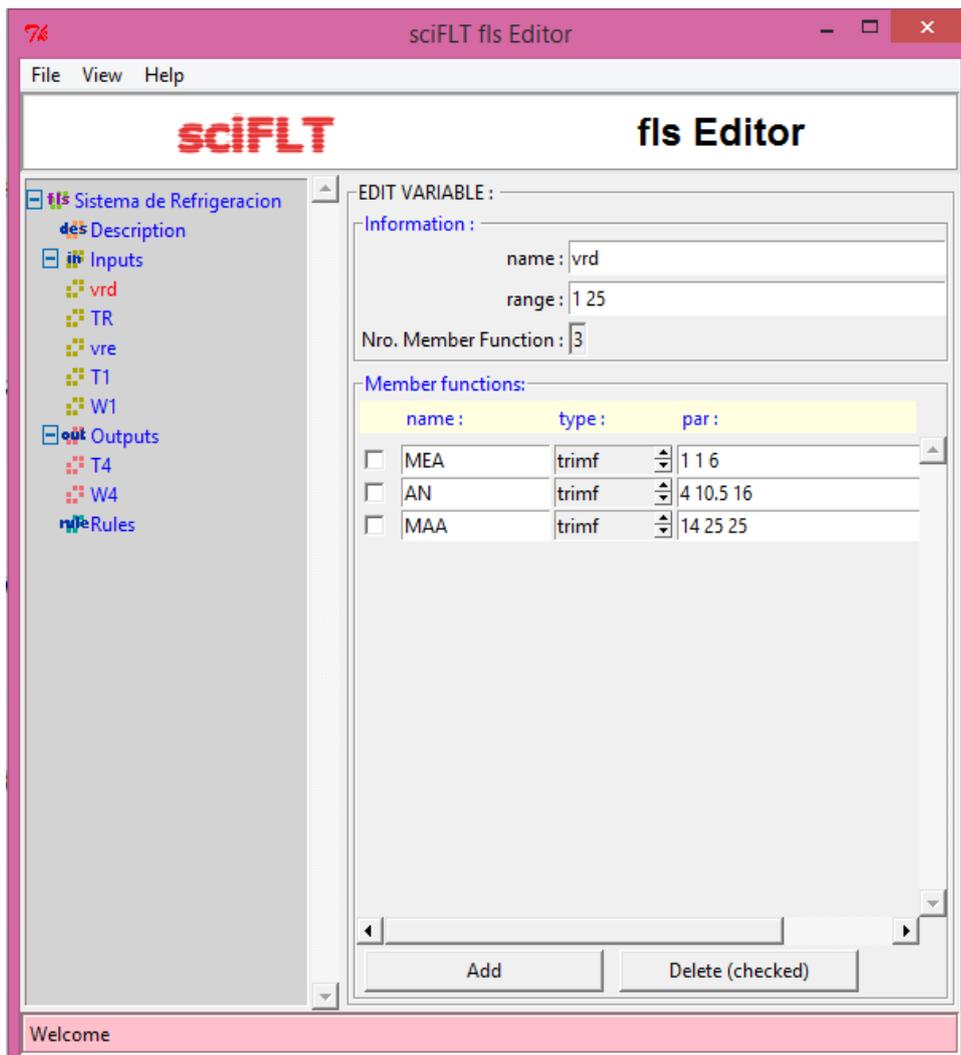
### ANEXO A.- Función de Lógica Difusa en SCILAB



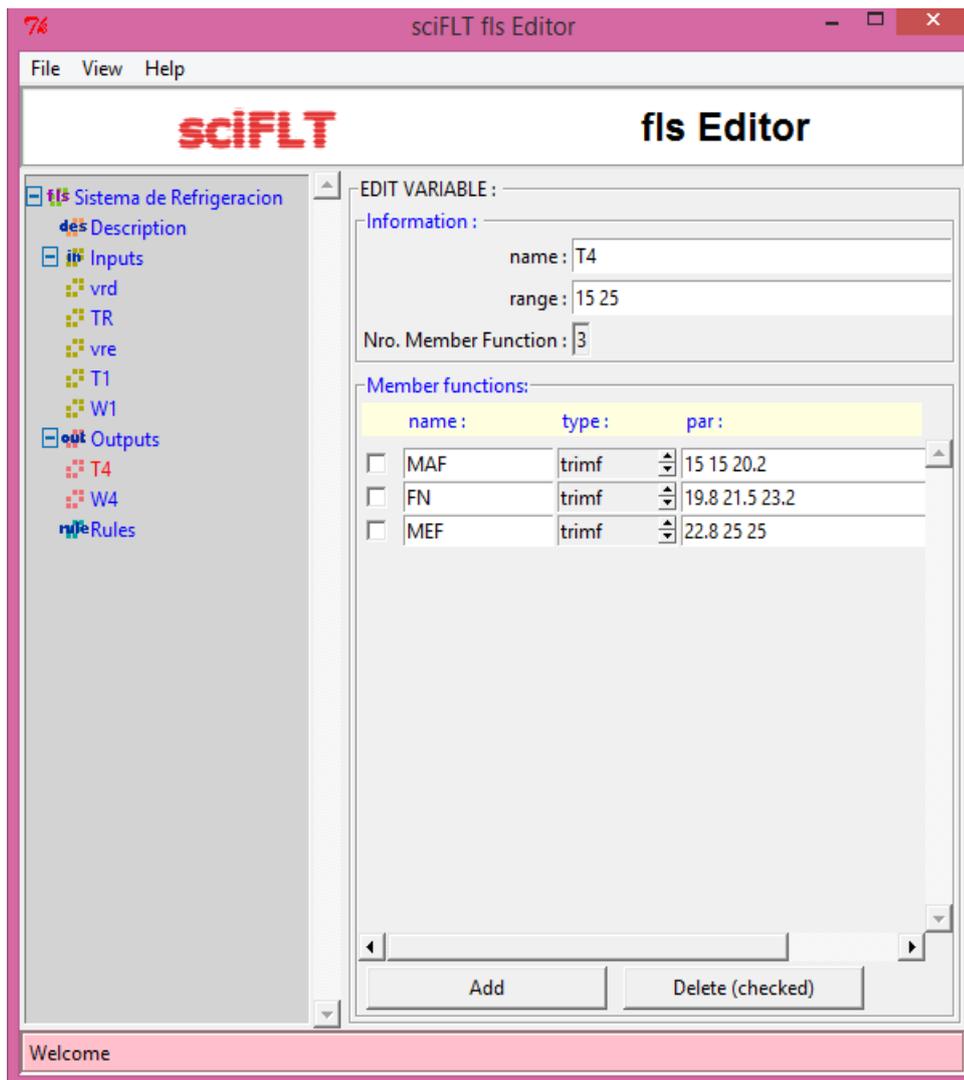
## ANEXO B.- Descripción del Control Difuso



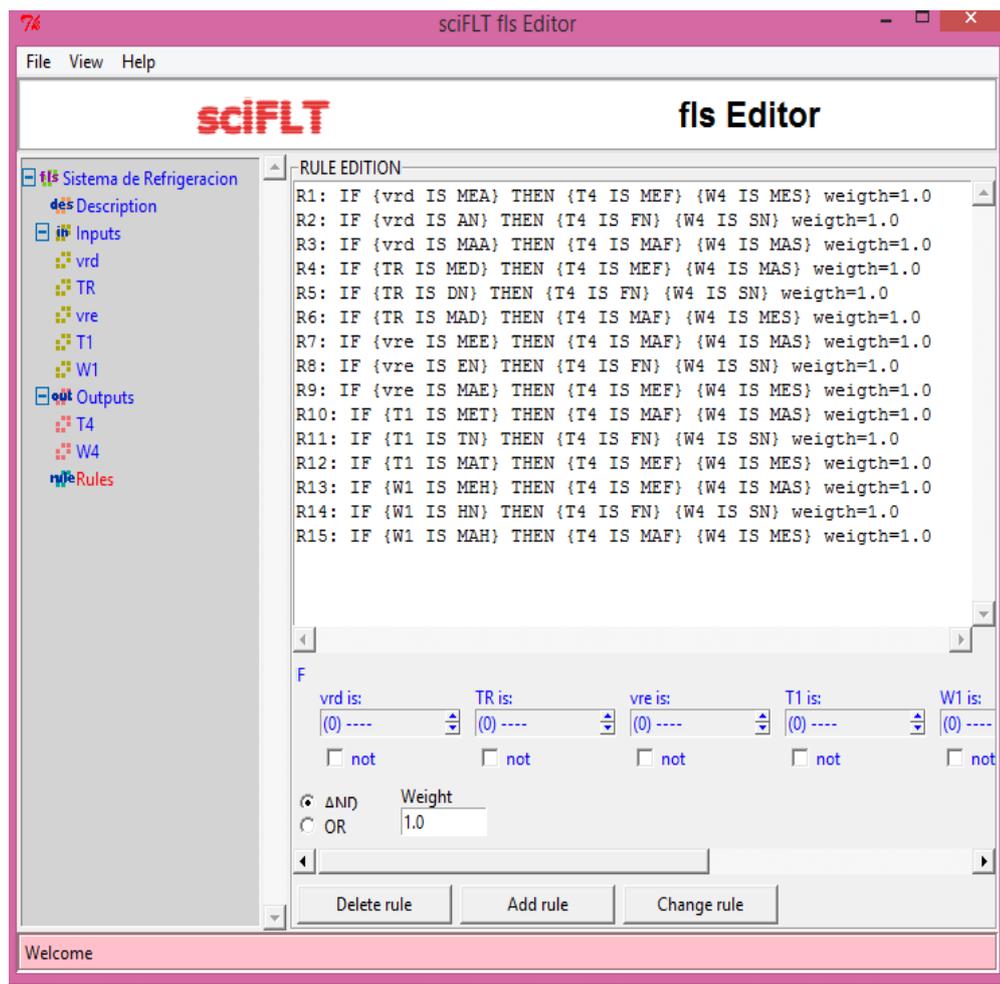
## ANEXO C.- Ingreso de Variables de Entrada



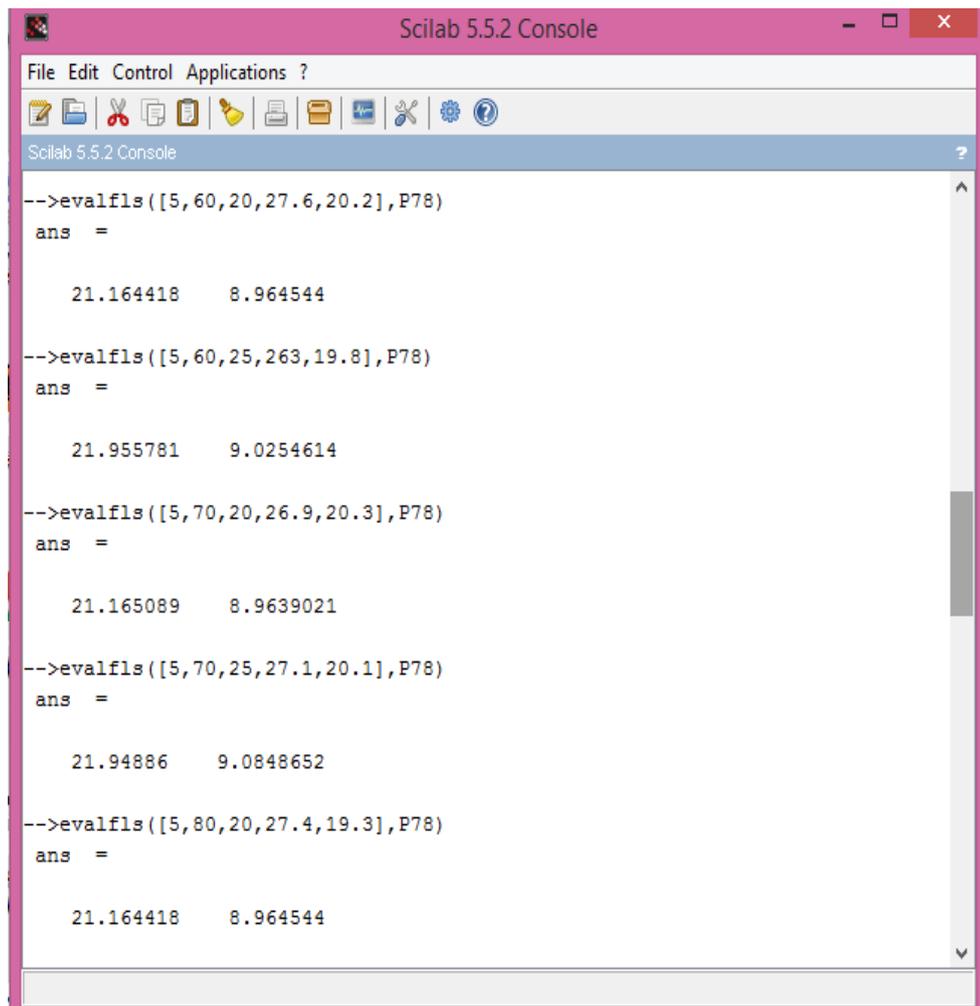
## ANEXO D.- Ingreso de Variables de Salida



## ANEXO E.- Base de Reglas

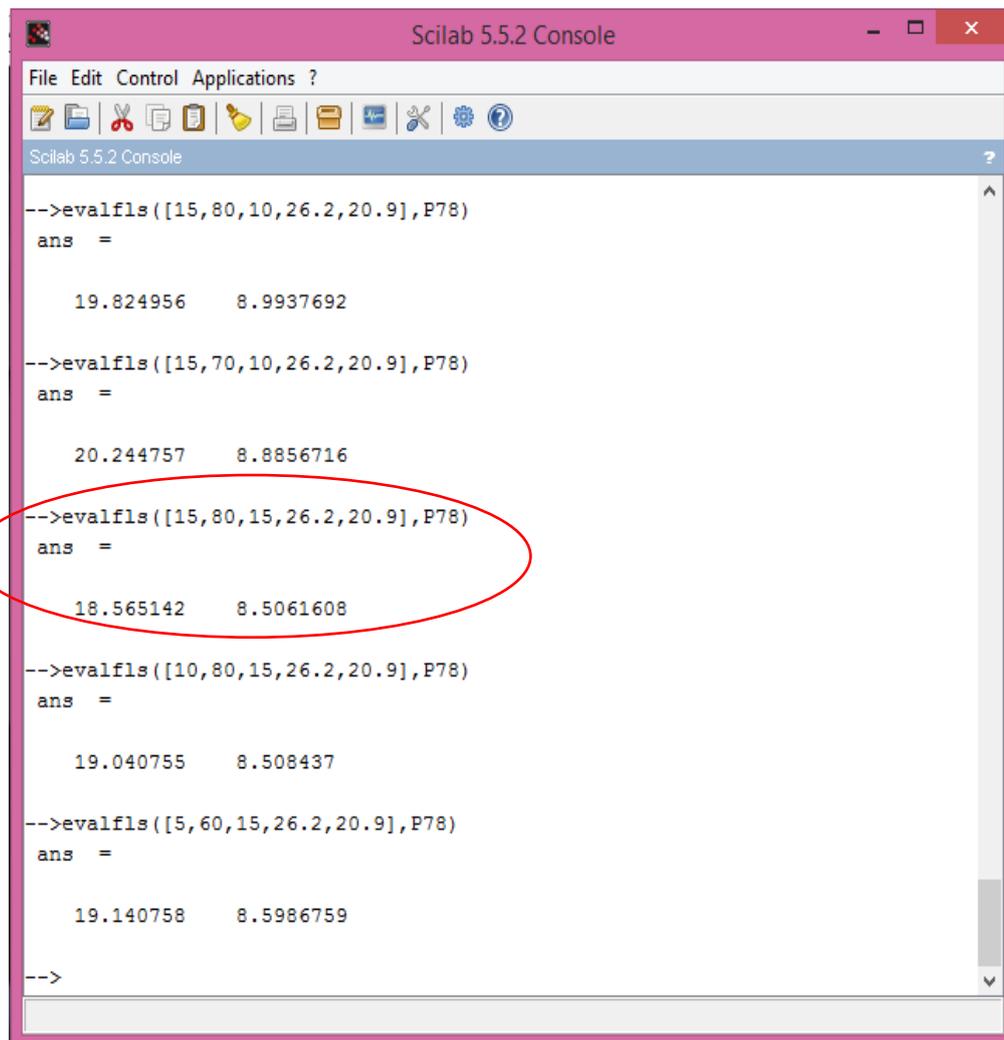


## ANEXO F.- Evaluación del Control Difuso



```
Scilab 5.5.2 Console
-->evalfns ([5,60,20,27.6,20.2],P78)
ans =
    21.164418    8.964544
-->evalfns ([5,60,25,263,19.8],P78)
ans =
    21.955781    9.0254614
-->evalfns ([5,70,20,26.9,20.3],P78)
ans =
    21.165089    8.9639021
-->evalfns ([5,70,25,27.1,20.1],P78)
ans =
    21.94886    9.0848652
-->evalfns ([5,80,20,27.4,19.3],P78)
ans =
    21.164418    8.964544
```

## ANEXO G.- Evaluación en (P4)



```
Scilab 5.5.2 Console
File Edit Control Applications ?
-->evalf1s ([15,80,10,26.2,20.9],P78)
ans =
    19.824956    8.9937692
-->evalf1s ([15,70,10,26.2,20.9],P78)
ans =
    20.244757    8.8856716
-->evalf1s ([15,80,15,26.2,20.9],P78)
ans =
    18.565142    8.5061608
-->evalf1s ([10,80,15,26.2,20.9],P78)
ans =
    19.040755    8.508437
-->evalf1s ([5,60,15,26.2,20.9],P78)
ans =
    19.140758    8.5986759
-->
```