



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de presión en una planta de refrigeración.”

### **TESINA DE SEMINARIO**

Previo a la obtención del Título de:

## **INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Presentada por:

Eliana Carolina Ormeño Mejía

Miguel Emilio Vivert Del Pino

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2011

## AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarnos esta oportunidad de concluir con esfuerzo y tenacidad esta etapa de nuestras vidas, al Ing. Cesar Martin por compartir con nosotros sus conocimientos, a nuestros familiares que siempre nos apoyaron para nunca desistir.

A todas nuestras amistades que nos animaron a continuar por este arduo camino, a todos los profesores de la universidad que nos han impartido cátedra en todo este periodo estudiantil, ya que gracias e ellos hemos adquirido los conocimientos necesarios para empezar en el mundo laboral

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, fuente de mi fe, a mi madre Mercedes, mi inspiración y fuente de toda mi fortaleza, a mi hermana Lilibeth, mi fuente de alegría, a mi abuelita Lucia, el recuerdo de la sabiduría, a mis amigos y familiares.

Eliana Ormeño Mejía

Dedico esta tesis a mi padre y a mi madre que nunca dejaron de apoyarme y nunca dejaron de confiar en mí y a mi hermana quien siempre estuvo dándome aliento.

Miguel Vivert Del Pino

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

**MSc. César Martín.**

PROFESOR DEL SEMINARIO

---

**MSc. Carlos Salazar**

PROFESOR DELEGADO

DEL DECANO

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesina nos corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

.....  
Eliana Carolina Ormeño Mejía

.....  
Miguel Emilio Vivert Del Pino.

## RESUMEN

En esta tesina de seminario se hará un estudio detallado de la identificación de sistemas, mediante la identificación del modelo matemático de una planta frigorífica.

El **primer capítulo** narra un análisis del problema que se tiene con lo que se intenta ambientar al lector sobre el funcionamiento del proceso además de otros factores como si existen o no perturbaciones o si las partes están sujetas a desgastes.

El **segundo capítulo** muestra todo lo que conocemos, ecuaciones y marcos teóricos tanto como de la teoría de identificación de sistemas como ecuaciones físicas del sistema que intentamos comprender y modelar que nos servirán de ayuda para la comprensión y diseño de la planta, identificación del sistema y el diseño del control de esta.

El **tercer capítulo** habla sobre cómo se diseño la planta, dimensionamiento de componentes y bajo que parámetros se coloco y dimensiono cada componente así como se da una explicación basadas en pruebas simples del diseño de la señal de entrada, el porqué se escoge dicha señal luego de varios intentos de diseño de la señal.

El **cuarto capítulo** explica de forma detallada como se diseño el modelo matemático de la planta, que técnica se uso así como las razones por la que se escogió esa técnica.

El **quinto capítulo** muestra la comprobación de todo el trabajo mediante validaciones del modelo con datos reales así como también se procede a diseñar el controlador del sistema basado en el modelo previamente hallado y validado.

# ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>III</b>
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN</b> .....	<b>IV</b>
<b>DECLARACIÓN EXPRESA</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>XVIII</b>

## Capítulo 1.

<b>ANÁLISIS DEL PROBLEMA</b> .....	<b>1</b>
1.1 Descripción del ciclo de refrigeración por compresión de vapor. ....	1
1.2 Identificación de Sistemas .....	3
1.3 Objetivos de control del proceso. ....	4
1.4 Factores que intervienen en el proceso. ....	4
1.5 Razones de control de la regulación de presión. ....	5
1.6 Alcance y Restricciones. ....	6
1.7 Limitaciones. ....	6

## Capítulo 2.

<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR</b> .....	<b>7</b>

2.1.1	Principios físicos. ....	7
2.1.1.1	Calor Y Frio.....	7
2.1.1.2	Transmisión de calor.....	7
2.1.1.3	Calor Sensible.....	8
2.1.1.4	Calor Latente. ....	8
2.1.1.5	Entalpia.....	9
2.1.2	Tres Leyes Básicas Para La Refrigeración. ....	9
2.1.3	Diagrama de Presión-Entalpia (Diagrama de Molliere). ....	10
2.1.4	El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor saturado. 11	
2.4.1.1	El Efecto de Refrigeración. ....	13
2.4.1.2	Flujo Másico del Refrigerante. ....	13
2.4.1.3	El Calor de Compresión y el Trabajo de Compresión. ....	13
2.4.1.4	Potencia Teórica Requerida por el Compresor.....	14
2.4.1.5	Desplazamiento teórico requerido por el compresor.....	14
2.4.1.6	El calor de Rechazo.....	15
2.4.1.7	El Coeficiente de Rendimiento (COP).....	15
2.1.5	El ciclo real de refrigeración por compresión de vapor saturado.	15
2.5.1.1	El sobrecalentamiento en la línea de succión.....	16
2.5.1.2	El subenfriamiento en la línea de líquido. ....	16
2.5.1.3	Caídas de presión en las líneas.....	17
<b>2.2</b>	<b>SEÑALES Y SISTEMAS.....</b>	<b>18</b>
2.2.1	Señal escalón unitario.....	18
2.2.2	Señal impulso. ....	18
2.2.3	Transformada de La Place.....	19
2.2.4	Función de Transferencia. ....	20
2.2.4.1	Polos de una función de transferencia. ....	21
2.2.4.2	Ceros de una función de transferencia.....	21
2.2.5	Sistemas de primer orden.....	21



2.2.6	Sistemas de segundo orden. ....	23
2.2.7	Sistemas subamortiguados de segundo orden. ....	25
2.2.8	Diagrama de bode.....	26
<b>2.3</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....</b>	<b>28</b>
2.3.1	Etapas de un proceso de identificación.....	28
2.3.2	Métodos de identificación de sistemas.....	30
2.3.3	Métodos no paramétricos.....	30
2.3.4	Identificación Paramétrica.....	31
2.2.4.1	Estructura Auto-Regresiva Con Entrada Externa (ARX) .....	32
2.2.4.2	Estructura Autorregresiva, Media Móvil Con Entrada Externa (ARMAX). ....	33
2.2.4.3	Respuesta Al Impulso Finito (FIR) .....	33
2.2.4.4	Estructura De Modelo Box-Jenkins (B-J). ....	34
2.2.4.5	Estructura De Modelo Error De Salida (OE). ....	34
2.3.5	Guías de diseño de la señal de entrada: señal multiseno (Schroeder-Phased). ....	35
 <b>Capítulo 3.</b>		
	<b>DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1</b>	<b>DISEÑO DE LA PLANTA DE REFRIGERACIÓN. ....</b>	<b>36</b>
3.1.1.	Partes Principales De La Planta .....	36
3.1.2.	Diagrama del Sistema.....	37
3.1.3.	Bases del diseño de los componentes.....	38
3.1.4.	Dimensionamiento de Cada Componente. ....	40
3.1.4.1	Compresor.....	41
3.1.4.2	Condensador .....	42
3.1.4.3	Evaporador .....	43
3.1.4.4	Tanque De Succión.....	45

3.1.4.5	Tanque Recibidor de Líquido .....	46
3.1.4.6	Diseño de los Tanques.....	46
3.1.4.7	Tubo Capilar.....	47
3.1.4.8	Visor Líquido .....	48
3.1.4.9	Válvula Solenoide.....	48
3.1.5.	Componentes de Medición .....	49
3.1.6.	Diseño De La Parte Electrónica .....	51
3.1.6.1	Objetivos De La Parte Electrónica.....	51
3.1.6.2	Diagrama De Fuerza Del Circuito.....	51
3.1.6.3	Diseño Del Circuito Acondicionador De Señal De Las Temperaturas .....	52
<b>3.2</b>	<b>DISEÑO DE LA SEÑAL DE ENTRADA: SEÑAL MULTISENO (SCHROEDER-PHASED).....</b>	<b>55</b>
3.2.1.	Obtención del $\tau$ dominante de la planta.....	56
3.2.2.	Obtención del tiempo de muestreo máximo.....	58
3.2.3.	Selección del tiempo de muestreo a utilizarse.....	59
3.2.4.	Diseño de la señal de entrada.....	60
<b>Capítulo 4.</b>		
	<b>PROCESO DE IDENTIFICACIÓN .....</b>	<b>65</b>
4.1	Herramientas para el proceso:.....	65
4.2	Adquisición de datos y tratamiento de las señales.....	66
4.3	Selección de los datos para el proceso de identificación: .....	68
4.4	Identificación Paramétrica:.....	70
4.5	Modelo ARX: .....	71
4.6	Modelo ARMAX:.....	74
4.7	Modelo ERROR DE SALIDA:.....	77
4.8	Modelo BOX-JENKIS: .....	80

4.9	Análisis de resultados: .....	83	
4.10	Obtención de la función de transferencia del modelo: .....	83	
4.11	Simulación del modelo. ....	84	
 <b>Capítulo 5.</b>			
<b>DISEÑO DEL CONTROLADOR.....</b>			<b>86</b>
5.1.	Proceso de diseño .....	86	
5.2.	Planta de simulación en lazo cerrado. ....	86	
5.3.	Determinación de las constantes del pid. ....	87	
5.4.	Pruebas con la planta real.....	92	
 <b>CONCLUSIONES .....</b>			<b>94</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>			<b>96</b>
 <b>ANEXOS</b>			
Anexo A (Tabla Para La Selección De Tubos Capilares) .....			96
Anexo B (Adquisición De Datos Con La Usb-6009).....			100
Anexo C (Programación Del Pic16f887) .....			105
Anexo D (Selección De Tanques De Succión).....			114
 <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>			<b>115</b>

# ABREVIATURAS

ARMAX	Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs.
ARX	Auto-Regressive with eXogenous inputs.
BJ	Box Jekins.
OE	Output error.
°C	Grados Centígrados.
FIR	Respuesta finita al impulso.
V	Voltios.
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo.
$T_{\text{muestreo}}$	Tiempo de cambio de la señal Multiseno.
$\tau_{\text{dom}}$	Constante de tiempo dominante de la planta.
$\tau_{\text{dom}}^{\text{H}}$	Estimación alta de la constante de tiempo.
$\tau_{\text{dom}}^{\text{L}}$	Estimación baja de la constante de tiempo.
Seg.	Segundos.
T	Temperatura.

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CICLO DE FRIGORÍFICO POR COMPRESIÓN DE VAPOR. ....	2
FIGURA 2 - DIAGRAMA P-H DE UN REFRIGERANTE. ....	10
FIGURA 3 - CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR EN EL DIAGRAMA P-H. ....	12
FIGURA 4 - CICLO REAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR EN EL DIAGRAMA P-H. ....	17
FIGURA 5 - SEÑAL ESCALÓN. ....	18
FIGURA 6 - CONSTANTES DE UN SISTEMA DE PRIMER ORDEN. ....	23
FIGURA 7 – COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN EN TÉRMINOS DE $\Xi$ . ....	24
FIGURA 8 – SISTEMA SUB-AMORTIGUADO DE SEGUNDO ORDEN ....	25
FIGURA 9 – CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN SUB- AMORTIGUADO. ....	26
FIGURA 10 - DIAGRAMA DE BODE DE MAGNITUD Y FASE. ....	27
FIGURA 11 – DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL PARA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS. ....	28
FIGURA 12 – ETAPAS DE UN PROCESO DE IDENTIFICACIÓN [4]. ....	28
FIGURA 13 - DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS MODELOS BASADOS EN EL ERROR DE PREDICCIÓN ....	32
FIGURA 14 – DIAGRAMA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN. ....	37
FIGURA 15 – DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES EN EL SISTEMA REAL. ....	37
FIGURA 16 – CÁMARA FRIGORÍFICA. ....	38
FIGURA 17 – CARGA TÉRMICA REPRESENTADA POR UNA RESISTENCIA ELÉCTRICA	39
FIGURA 18 – COMPRESOR ....	41
FIGURA 19 – CONDENSADOR FORZADO ....	42
FIGURA 20 – EVAPORADOR ....	44
FIGURA 21 – ACUMULADOR DE SUCCIÓN ....	45

FIGURA 22 – RECIBIDOR DE LÍQUIDO .....	46
FIGURA 23 – CAPILAR.....	47
FIGURA 24 – VISOR LIQUIDO.....	48
FIGURA 25 – VÁLVULA SOLENOIDE .....	48
FIGURA 26 – COMPONENTES DE MEDICIÓN. ....	49
FIGURA 27 – DIAGRAMA DE FUERZA. ....	51
FIGURA 28 – ACONDICIONADORES DE SEÑAL DE TEMPERATURA. ....	52
FIGURA 29 – ACONDICIONADORES DE SEÑAL DE TEMPERATURA EN LA PLANTA REAL. ....	53
FIGURA 30 – CIRCUITO DE FUERZA DE LA PLANTA REAL. ....	53
FIGURA 31 – PLANTA PILOTO.....	54
FIGURA 32 – INTERFAZ GRAFICA USADA PARA EL DISEÑO DE LAS SEÑALES. ....	55
FIGURA 33 – OBTENCIÓN DEL TAO. ....	57
FIGURA 34 – SEÑAL MULTISENO SELECCIONADA. ....	63
FIGURA 35 – CARACTERÍSTICA DE LA SEÑAL DE ENTRADA. ....	64
FIGURA 36 –INTERFAZ DE LA HERRAMIENTA SYSTEM IDENTIFICATION.....	65
FIGURA 37 – ADQUISICIÓN DE DATOS.....	66
FIGURA 38 – RESPUESTA DE LA PLANTA. ....	67
FIGURA 39 – RESPUESTA DE LA PLANTA FILTRADA .....	67
FIGURA 40 – SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA. ....	68
FIGURA 41 – SELECCIÓN DE RANGO DE LA MUESTRA.....	69
FIGURA 42 – DATOS SELECCIONADO PARA EL PROCESO DE IDENTIFICACIÓN.....	69
FIGURA 43 – LINEAR PARAMETRIC MODELS - ARX .....	71
FIGURA 44 – SIMULACIÓN DEL MODELO CON LOS DATOS DE VALIDACIÓN. ....	72
FIGURA 45 – ANÁLISIS RESIDUAL ARX1023.....	72
FIGURA 46 – RESPUESTA AL STEP DEL MODELO ARX1023 VS CRA .....	73
FIGURA 47 – RESPUESTA DE FRECUENCIA DEL MODELO ARX1023 VS SPA.....	73
FIGURA 48 – LINEAR PARAMETRIC MODELS - ARMAX.....	74
FIGURA 49 – SIMULACIÓN DEL MODELO CON LOS DATOS DE VALIDACIÓN. ....	75
FIGURA 50 – ANÁLISIS RESIDUAL AMX7652. ....	75

FIGURA 51 – RESPUESTA AL STEP DEL MODELO AMX7652 VS CRA.....	76
FIGURA 52 – RESPUESTA DE FRECUENCIA DEL MODELO AMX7652 VS SPA.....	76
FIGURA 53 – LINEAR PARAMETRIC MODELS - OE.....	77
FIGURA 54 – SIMULACIÓN DEL MODELO CON LOS DATOS DE VALIDACIÓN. ....	78
FIGURA 55 – ANÁLISIS RESIDUAL OE432. ....	78
FIGURA 56 – RESPUESTA AL STEP DEL MODELO OE432 VS CRA.....	79
FIGURA 57 – RESPUESTA DE FRECUENCIA DEL MODELO OE432 VS SPA.....	79
FIGURA 58 – LINEAR PARAMETRIC MODELS – B-J .....	80
FIGURA 59 – SIMULACIÓN DEL MODELO CON LOS DATOS DE VALIDACIÓN. ....	81
FIGURA 60 – ANÁLISIS RESIDUAL BJ42323. ....	81
FIGURA 61 – RESPUESTA AL STEP DEL MODELO BJ42323VS CRA .....	82
FIGURA 62 – RESPUESTA DE FRECUENCIA DEL MODELO BJ42323VS SPA .....	82
FIGURA 63 – COMPENSACIÓN DEL MODELO. ....	84
FIGURA 64 – SIMULACIÓN EN LAZO ABIERTO DE LA PLANTA. ....	85
FIGURA 65 – RESULTADO DE LA SIMULACIÓN. ....	85
FIGURA 66 – ESQUEMA EN LAZO CERRADO DE LA PLANTA DE SIMULACIÓN. ....	87
FIGURA 67 – SISOTOOL DE MATLAB.....	88
FIGURA 68 – ESQUEMA EN LAZO CERRADO.....	88
FIGURA 69 – ARQUITECTURA DE CONTROL DE LA SISOTOOL A UTILIZARSE. ....	89
FIGURA 70 – AUTOMATED TUNING. ....	89
FIGURA 71 – RESPUESTA AL ESCALÓN UNITARIO DEL SISTEMA CON UN CONTROLADO PID. ....	90
FIGURA 72 – OPTIMIZACIÓN DEL COMPENSADOR.....	90
FIGURA 73 – RESPUESTA AL ESCALÓN UNITARIO DEL SISTEMA CON EL CONTROLADO PID SELECCIONADO.....	91
FIGURA 74 – SIMULACIÓN DEL MODELO EN LAZO CERRADO CON CONTROLADOR ...	92
FIGURA 75 – PRUEBA EN LAZO CERRADO DE LA PLANTA REAL CON EL CONTROLADOR PID .....	92
FIGURA 76 – RESPUESTA DE PLANTA REAL EN LAZO CON EL CONTROLADOR PID ...	93
FIGURA 77 – ENTORNO CON SIMULINK DE USB-6009 .....	100

FIGURA 78 – CONFIGURACIÓN DE LAS ENTRADAS ANALÓGICAS USB-6009 .....	102
FIGURA 79 – CONFIGURACIÓN DE LAS SALIDAS ANALÓGICAS USB-6009 .....	102
FIGURA 80 – ENTORNO DE TRABAJO CON SIMULINK .....	103
FIGURA 81 –PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN .....	103
FIGURA 82 –REAL TIME TOOLBOX. ....	104
FIGURA 83 –SELECCIÓN DE TANQUES DE SUCCIÓN. ....	114



# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 - PROCESOS TERMODINÁMICOS EN CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN. ....	12
TABLA 2 - PRINCIPALES TRANSFORMADAS DE LAPLACE.....	19
TABLA 3 - TEOREMAS DE TRANSFORMADA DE LAPLACE .....	20
TABLA 4 –PRUEBAS A VARIAS ENTRADAS ESCALÓN.....	58
TABLA 5 –VALORES DE $T_{muestreo}$ PARA $\alpha=2$ .....	59
TABLA 6 – VARIAS SEÑALES MULTISENO .....	60
TABLA 7 – SEÑAL MULTISENO SELECCIONADA .....	63
TABLA 8 – VARIABLES EN LA IDENT .....	70
TABLA 9 – MODELOS OBTENIDAS CON LA ESTRUCTURA ARX.....	71
TABLA 10 – MODELO ARX SELECCIONADO.....	72
TABLA 11 – MODELOS OBTENIDAS CON LA ESTRUCTURA ARMAX .....	74
TABLA 12 – MODELO ARMAX SELECCIONADO .....	75
TABLA 13 – MODELOS OBTENIDAS CON LA ESTRUCTURA OE.....	77
TABLA 14 – MODELO OE SELECCIONADO.....	78
TABLA 15 – MODELOS OBTENIDAS CON LA ESTRUCTURA B-J.....	80
TABLA 16 – MODELO B-J SELECCIONADO.....	81
TABLA 17 – MODELOS SELECCIONADOS A PARTIR DE LA IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA. ....	83
TABLA 18 – TABLA PARA LA SECCIÓN DE TUBOS CAPILARES. ....	99

# INTRODUCCIÓN

En el campo del control de procesos la identificación de sistemas es una herramienta muy poderosa que sirve para modelar matemáticamente un proceso sin necesidad de definir ecuaciones físicas previamente, lamentablemente esta herramienta es poco usada en la práctica debido al poco conocimiento que se le tiene, en el presente documento se busca fomentar el estudio y el entendimiento de la identificación de sistemas.

Para ello se analiza uno de los procesos más complejos de modelar con ecuaciones físicas como es el caso de un sistema de refrigeración por compresión mecánica de vapor. Al ser un sistema frigorífico se sabe que es un proceso térmico que presenta varias no linealidades, además de que la termodinámica se basa en un proceso estocástico de moléculas.

Se tiene como objetivo lograr un modelo matemático de una planta frigorífica, sin la aplicación de ecuaciones extraídas de la física del sistema sino puramente de pruebas experimentales, una vez obtenido el modelo matemático de la planta se buscará diseñar un controlador que cumpla con las especificaciones del modelo matemático intentando no llevar la planta a zona de saturación. Adicionalmente, se busca optimizar procesos térmicos ya que estos procesos hemos observado que son los más complejos de entender.

# CAPITULO 1

## ANÁLISIS DEL PROBLEMA

El presente trabajo está orientado a determinar el modelo matemático de un sistema dinámico real a través de técnicas experimentales de identificación, que se darán a conocer posteriormente, y de esta manera diseñar un adecuado controlador que permita la correcta y eficiente manipulación de nuestra variable de interés.

Para desarrollar este proceso se ha diseñado un prototipo de un sistema de refrigeración por compresión mecánica de vapor, el propósito es mantener la temperatura estable dentro de una cámara frigorífica.

Para poder alcanzar nuestro objetivo es conveniente conocer cómo funciona y los elementos que componen el proceso. A continuación se presenta una breve descripción del mismo.

### **1.1 Descripción del ciclo de refrigeración por compresión de vapor.**

El método más utilizado para producir refrigeración se conoce como refrigeración por compresión mecánica de vapor y está basado en el ciclo invertido de Carnot.

La descripción del ciclo haciendo referencia a la Figura1 es el siguiente: En el punto 1 un líquido adecuado, llamado refrigerante, se encuentra a alta presión y temperatura, dicho líquido es sometido a una brusca disminución de presión a través del dispositivo de expansión.

Debido a las propiedades del refrigerante la temperatura guarda relación con la presión, por tanto, en el punto 2 se tiene líquido a baja presión y temperatura. De esta manera entra al evaporador, donde absorbe calor hacia el sistema a medida que atraviesa la superficie del mismo, logrando enfriar el ambiente que lo rodea. Al absorber calor el refrigerante se volatiliza y es enviado hacia el compresor a través de la línea de succión en el punto 3. En el compresor el refrigerante, en estado gaseoso es comprimido mecánicamente, aumentando su presión y temperatura en el punto 4. El condensador recibe el gas caliente que sale del compresor a través del corto tubo denominado línea de gas caliente, el cual es empujado a alta velocidad y temperatura. A medida que el refrigerante atraviesa el condensador va cediendo calor hacia el exterior, esto provoca que se condense y llegue en estado líquido en el punto 1, reanudando así, el ciclo de refrigeración.

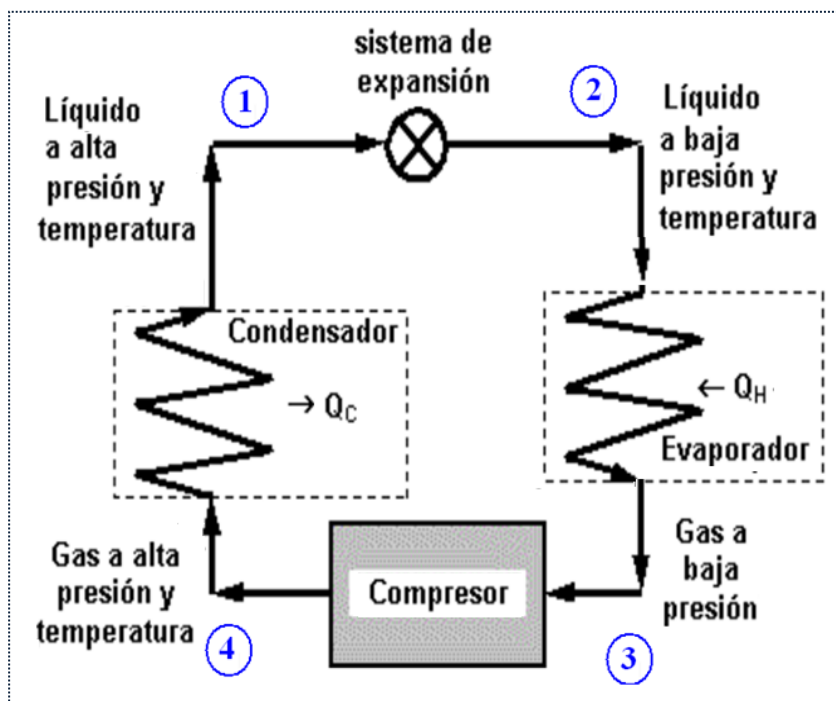


Figura 1 - Ciclo de Frigorífico por compresión de vapor.

## 1.2 Identificación de Sistemas.

La Identificación de Sistemas es una técnica desarrollada para obtener modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales, cuyo comportamiento es difícil de modelar o se posee escaso conocimiento sobre la estructura del mismo.

El término Identificación de sistemas fue utilizado por Lofti Zadeh en 1962, como:

*Identificación es la determinación, en base a la entrada y la salida, de un sistema, dentro de una clase de sistemas especificada, al cual el sistema probado es equivalente [5].*

Puede decirse que la identificación de sistemas quedó establecida como un campo de investigación reconocido dentro del área de control automático a mediados de los sesenta: en el tercer congreso de la IFAC en Londres, 1966 en el que fue presentado un artículo de visión general sobre identificación de sistemas (Eykhoff et al. 1966). Un año después fue organizado el primer Symposium IFAC sobre identificación de sistemas en Praga. En la actualidad es el Symposium con una serie más larga de la IFAC. [7]

La teoría sobre este tema está reunida en libros de personaje como Ljung [4] y Söderstrom & Stoica [6], donde también se pueden encontrar otras referencias.

### **1.3 Objetivos de control del proceso.**

El enfoque principal para el desarrollo de este proyecto es poder controlar, como en todo sistema de refrigeración, la temperatura en una cámara frigorífica, la cual está formada por los serpentines del evaporador. El nivel de temperatura dentro de dicha cámara está relacionado con la temperatura de saturación del refrigerante luego de atravesar el dispositivo de expansión. Como se explicó en la sección anterior, la temperatura del refrigerante tiene una estrecha correspondencia con la presión; si podemos controlar la presión a la cual se expanda el refrigerante a la entrada del evaporador se podrá manipular directamente la temperatura del mismo, por tanto la de todo el sistema.

Para esto se ha diseñado una planta piloto, que permitirá realizar un análisis del ciclo de refrigeración, en la cual se controlará la presión en el evaporador manipulando el caudal de refrigerante que se envíe a través del dispositivo de expansión.

Adicionalmente, se busca realizar un estudio de los diversos algoritmos de control para este sistema, por lo que es preciso obtener un modelo matemático que lo represente. Para ello, se utilizarán técnicas de identificación de sistemas que permitan obtener esta información a partir del tratamiento de datos experimentales.

### **1.4 Factores que intervienen en el proceso.**

Uno de los factores determinantes que interviene en nuestro proceso es la capacidad del sistema para remover calor del medio que se desea enfriar de acuerdo a la carga térmica a la que esté sometido, esto

depende estrictamente de la cantidad de refrigerante que circule por el evaporador. En la mayoría de los casos, en un sistema de refrigeración industrial, la demanda puede ser considerada como constante puesto que está en continua realimentación del producto que se desea conservar.

Para simular este comportamiento en nuestra planta piloto se ha implementado un sistema que represente una carga térmica. Este sistema está básicamente compuesto por una resistencia eléctrica de poca potencia.

Otros factores como las condiciones ambientales, eficiencia de los componentes del equipo de refrigeración, precisión de los dispositivos de adquisición de datos, deben ser considerados en el desarrollo del proceso, y de esta manera poder obtener resultados consistentes.

### **1.5 Razones de control de la regulación de presión.**

Para que un sistema sea eficiente debe tener la capacidad de adaptarse con facilidad y fiabilidad a las condiciones que se le establezcan y permitir así obtener buenos resultados a partir de su correcto funcionamiento.

Las razones por las que se busca controlar la temperatura controlando la presión de saturación del refrigerante, es porque se actuará directamente sobre la fuente, podemos llamarlo así, de producción de frío: el refrigerante, y de esta manera diseñar un control riguroso para mantener un nivel de temperatura deseado.

El control de enfriamiento, a nivel industrial, es muy importante, puesto que de él depende la conservación. El diseño de un adecuado controlador ayuda a crear mejor calidad, permite detectar fallas en el proceso para ser corregidas y así eliminar errores que podrían terminar en pérdidas

### **1.6 Alcance y Restricciones.**

Este proyecto se ha diseñado de tal manera que se pueda tener control sobre un rango de temperatura desde -6 a -12 grados centígrados. El diseño del dispositivo de control para el actuador, en el sistema de expansión, está implementado en tecnología a nivel de microcontroladores; la regulación del caudal de refrigerante hacia el evaporador será con una válvula tipo solenoide (on-off) por medio de modulación de ancho de pulso (PWM), con tiempo de duración del ciclo 10 seg. Para el diseño del controlador se ha elaborado una consola en MATLAB, que permita una interacción ente el usuario, nuestra planta piloto y el respectivo algoritmo de control.

### **1.7 Limitaciones.**

Se encuentran otras funcionalidades en los sistemas de refrigeración modernos a nivel industrial, tales como control de presión a través de la variación de velocidad del compresor o a través de dispositivos de expansión de tipo modulante, que permite un rango más amplio de temperatura y capacidad de refrigeración. De igual manera algoritmos de control más complejos basados en lógica difusa. El actual proyecto no se enfocará en las características citadas.



# CAPITULO 2

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

### 2.1 TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

#### 2.1.1 Principios físicos.

##### 2.1.1.1 Calor Y Frio.

El calor es una forma de energía que se transfiere de un cuerpo a otro debido a una diferencia de temperatura.

El frio no existe teóricamente, sino que representa ausencia de calor.

*Por tanto la refrigeración se considera como un proceso de extracción de calor [1].*

##### 2.1.1.2 Transmisión de calor.

El calor se transmite desde el cuerpo cuya temperatura es más alta hacia el cuerpo con temperatura más baja, sin existir materia que se interponga completamente a esta transferencia. Existen tres métodos de transmisión de calor, que son:

**Radiación:** Es la transmisión de calor por medio de ondas electromagnéticas, sin que exista transporte de materia, ni un medio material para que se produzca.

**Convección:** Es el calor que se transmite debido al movimiento de una masa de un agente líquido o vapor, de una región del espacio a otra. El enfriamiento de una sustancia en el interior de una cámara frigorífica se realiza mediante corrientes de convección desde la superficie más fría del evaporador.

**Conducción:** Es la transferencia de calor entre cuerpos a diferentes temperaturas por medio de un contacto directo de sus partículas.

### 2.1.1.3 Calor Sensible.

Es la cantidad de calor absorbido o liberado por una sustancia al producirse un cambio de temperatura, sin que se produzca un cambio de estado. Se puede calcular como:

$$Q_s = \Delta H = mC(T_2 - T_1)$$

En donde H es la entalpía del sistema, m es la masa del cuerpo, C es el calor específico: a presión constante ( $C_p$ ) o a volumen constante ( $C_v$ );  $t_2$  y  $t_1$  son las temperaturas final e inicial del cuerpo respectivamente.

### 2.1.1.4 Calor Latente.

Es la cantidad de calor absorbida o liberada por una sustancia al cambiar de fase, sin que existan cambios de temperatura.

$$Q_s = mL$$

Donde L es el calor de fusión o de evaporación y m es la masa que cambia de estado.

### 2.1.1.5 Entalpia.

Es una magnitud termodinámica, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.

$$H = U + pV$$

### 2.1.2 Tres Leyes Básicas Para La Refrigeración.

La obtención de refrigeración se basa en las tres leyes siguientes:

1.- *Todos los líquidos al evaporarse absorben calor de cuanto les rodea [1].*

Si se consigue evaporar un determinado líquido en un equipo apropiado, se puede suministrar el calor latente necesario para la evaporización, absorbiendo el calor sensible del espacio que se desea refrigerar.

2.- *La temperatura a la que hierve o se evapora un líquido depende de la presión que se ejerce sobre dicho líquido [1].*

Si se puede disponer de una presión distinta sobre el líquido que se está evaporando, se altera la temperatura a la que se volatiliza, por consiguiente podrá variarse el nivel de frío producido.

3.- *Todo vapor puede volver a condensarse, convirtiéndose en líquido, si se comprime y enfría debidamente [1].*

Esta ley indica que si se dispone de un sistema cerrado, la sustancia utilizada para la producción de frío puede ser comprimida y enfriada de tal manera que pueda ser utilizada nuevamente en el ciclo de refrigeración.

### 2.1.3 Diagrama de Presión-Entalpía (Diagrama de Molliere).

Nos permite representar con facilidad y gran fiabilidad el ciclo de refrigeración, por consecuencia nos sirve para calcular las potencias o capacidades de los elementos del sistema. Cada refrigerante posee su propio diagrama de Molliere.

La figura siguiente nos ayuda a interpretar los valores que contiene y también su manejo.

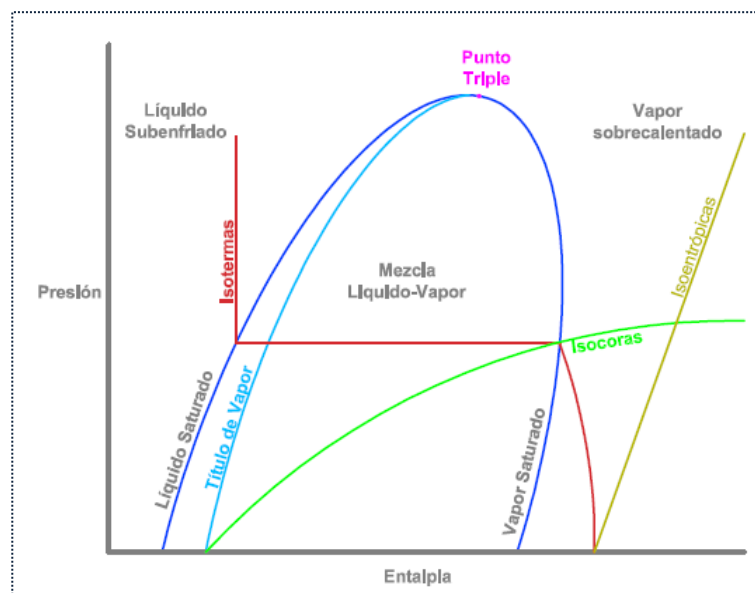


Figura 2 - Diagrama p-h de un refrigerante.

Básicamente el diagrama está compuesto por dos ejes principales y tres zonas delimitadas por una curva de saturación.

- ✓ En el eje de las ordenadas se indica el valor de Presión.
- ✓ En el eje de las abscisas se registra el valor de entalpía por unidad de masa en [KJ/Kg] ó [Kcal/kg].
- ✓ Una curva de saturación con forma de “U” invertida la cual determina si el compuesto se encuentra en estado de: líquido sub-enfriado,

líquido saturado, mezcla líquido-vapor, vapor saturado o vapor sobrecalentado.

A su vez se definen seis tipos de trazas a través de las cuales se describen los ciclos de refrigeración y los estados de agregación de la materia.

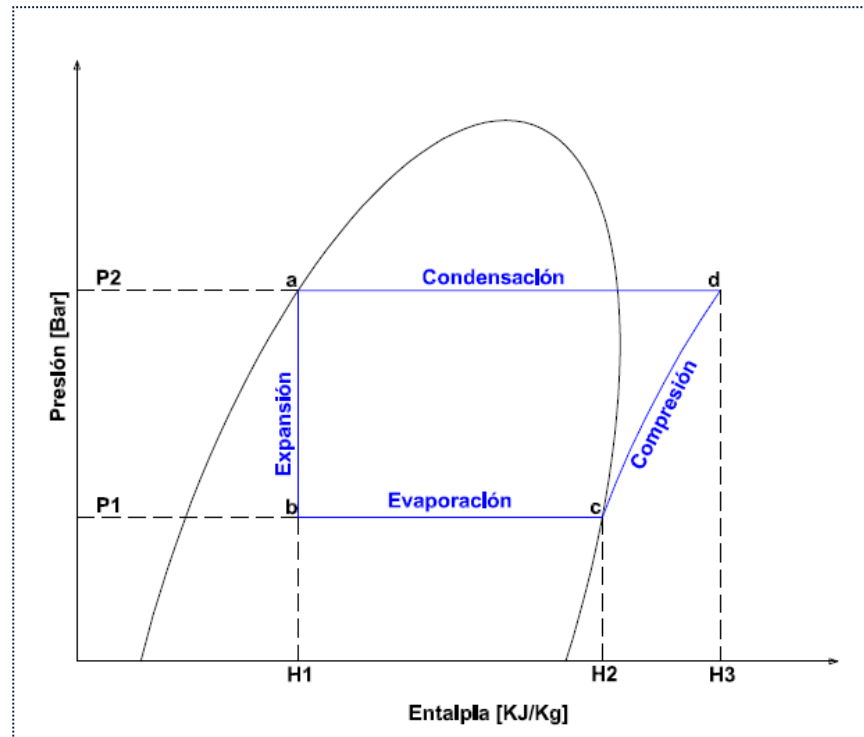
- ✓ Rectas isobaras perpendiculares al eje de las ordenadas.
- ✓ Rectas isoentálpicas perpendiculares al eje de las abscisas.
- ✓ Líneas Isotermas que en el SI está expresado en [°C].
- ✓ Curvas Isocoras, en la que coinciden los puntos con igual volumen específico. En el SI está expresado en [m<sup>3</sup>/kg].
- ✓ Curvas Isoentrópicas, en las que coinciden los valores de igual entropía en el sistema. En el SI se miden en [KJ/kg K] ó [KJ/kg°C].
- ✓ Nueve curvas de "título de vapor" o "calidad de vapor" que indican el porcentaje en masa de vapor contenido en la mezcla líquido-vapor.

En la parte superior de la curva de saturación se define el llamado punto crítico o triple, el cual es el límite a partir del que, por mucho que se aumente la presión, no es posible condensar el gas.

#### **2.1.4 El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor saturado.**

En el capítulo 1 se describió brevemente cómo funciona el sistema de refrigeración por compresión de vapor. En esta sección se detallan los cambios termodinámicos que experimenta el refrigerante en cada parte del equipo. El ciclo que se describe a continuación es idealmente teórico y no tiene lugar. Sin embargo servirá de base para el estudio del ciclo real de refrigeración.

En el diagrama p-h de la figura 3, se muestra un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, el cual indica la ubicación de cada proceso. Estos procesos son como siguen:



**Figura 3 - Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor en el diagrama p-h.**

Línea.	Proceso Termodinámico	Equipo en donde ocurre
<b>a-b</b>	Entalpía constante	Dispositivo de expansión
<b>b-c</b>	Presión constante	Evaporador
<b>c-d</b>	Entropía constante	Compresor
<b>d-a</b>	Presión contante	Condensador

**Tabla 1 - Procesos termodinámicos en ciclo ideal de refrigeración.**

#### 2.4.1.1 El Efecto de Refrigeración.

Es la variación de la entalpia del refrigerante durante el *proceso de evaporación* y representa la cantidad de calor removido del medio que se desea refrigerar por cada unidad de masa de refrigerante que fluye por el evaporador:

$$E. R. = h_c - h_b$$

En donde,

$E. R.$  = Efecto de refrigeración en KJ/Kg.

$h_c$  = Entalpia del refrigerante a la salida del Evaporador KJ/Kg.

$h_b$  = Entalpia del refrigerante a la entrada del Evaporador KJ/Kg

#### 2.4.1.2 Flujo Másico del Refrigerante.

Es la cantidad de refrigerante que debe circular a través del sistema con el propósito de suministrar una capacidad dada de refrigeración:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{E. R.}$$

En donde,

$\dot{m}$  = Flujo másico en Kg/Seg

$\dot{Q}_e$  = Entalpia del refrigerante a la salida del Evaporador en Kw

$E. R.$  = Efecto de refrigeración KJ/Kg.

#### 2.4.1.3 El Calor de Compresión y el Trabajo de Compresión.

Se definen como la variación de la entalpia del refrigerante, como resultado del *proceso de compresión*.

$$W = C. C. = h_d - h_c$$

En donde,

$W$  = Trabajo de Compresión en KJ/Kg

$C.C.$  = Calor de Compresión en KJ/Kg.

$h_d$  = Entalpia del refrigerante a la salida del Compresor KJ/Kg.

$h_c$  = Entalpia del refrigerante a la entrada del Compresor KJ/Kg.

#### 2.4.1.4 Potencia Teórica Requerida por el Compresor.

Es la cantidad de potencia necesaria para accionar el compresor:

$$P = W \times m$$

En donde,

$P$  = Potencia teórica requerida por el compresor en Kw

$W$  = Trabajo de Compresión en KJ/Kg

$m$  = Flujo másico en Kg/Seg

#### 2.4.1.5 Desplazamiento teórico requerido por el compresor.

Es el volumen de gas que el compresor debe ser capaz de manejar en el ciclo ideal.

$$V_t = v \times m$$

En donde,

$V_t$  = Desplazamiento teórico del compresor en m<sup>3</sup>/Seg

$v$  = Volumen específico del refrigerante en la solución del compresor en m<sup>3</sup>/Kg.

$m$  = flujo másico en Kg/Seg.



#### 2.4.1.6 El calor de Rechazo.

Se define como la cantidad de calor removido por unidad de masa de refrigerante durante el *proceso de condensación*.

$$C. R. = h_d - h_a$$

En donde,

*C. R.* = Calor de Rechazo en KJ/Kg.

$h_d$  = Entalpia del refrigerante a la entrada del Condensador KJ/Kg.

$h_a$  = Entalpia del refrigerante a la salida del Condensador KJ/Kg

La cantidad total de calor de rechazo ( $Q_c$ ) en Kw se obtiene mediante la ecuación:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_d - h_a)$$

#### 2.4.1.7 El Coeficiente de Rendimiento (COP)

Proporciona una medición de la utilización eficiente de la energía del sistema. Se define:

$$COP = \frac{\text{Capacidad de refrigeración } Q_e}{\text{Suministro neto de potencia } P}$$

En las mismas unidades.

#### 2.1.5 El ciclo real de refrigeración por compresión de vapor saturado.

El ciclo real de refrigeración difiere del teórico debido a que se producen irreversibilidades en los dispositivos que forman el sistema. Esto se origina por caídas de presión en el refrigerante debido a la

fricción en las cañerías y por el intercambio de calor con los alrededores.

#### **2.5.1.1 El sobrecalentamiento en la línea de succión.**

La línea de succión es la que une la salida del evaporador con la succión del compresor. Cuando el refrigerante sale del evaporador se encuentra a baja temperatura, menor que la del medio ambiente, produciéndose un intercambio de calor con los alrededores. El sobrecalentamiento puede traer un comportamiento indeseado en el sistema como:

- Aumenta en calor de compresión.
- Aumenta el calor de rechazo.
- Aumenta la potencia requerida por el compresor.
- Disminuye el COP.

Una de las ventajas que brinda el sobrecalentamiento, es evitar que llegue líquido refrigerante al compresor.

#### **2.5.1.2 El subenfriamiento en la línea de líquido.**

La línea de líquido es la que une la salida del condensador con el dispositivo de expansión. El sub-enfriamiento constituye una ventaja adicional al comportamiento del sistema, ya que:

- Aumenta el Efecto de Refrigeración.
- Potencia por unidad de capacidad más baja.
- Se produce menos gas de vaporización súbita en el dispositivo de expansión.
- Mayor COP.

### 2.5.1.3 Caídas de presión en las líneas.

El efecto de fricción sobre el flujo de caudal de cualquier fluido en una tubería, resulta en una caída de presión en la dirección del flujo. Las caídas de presión es equivalente a una caída de la temperatura de saturación.

En la figura siguiente se muestra el ciclo real de compresión de vapor.

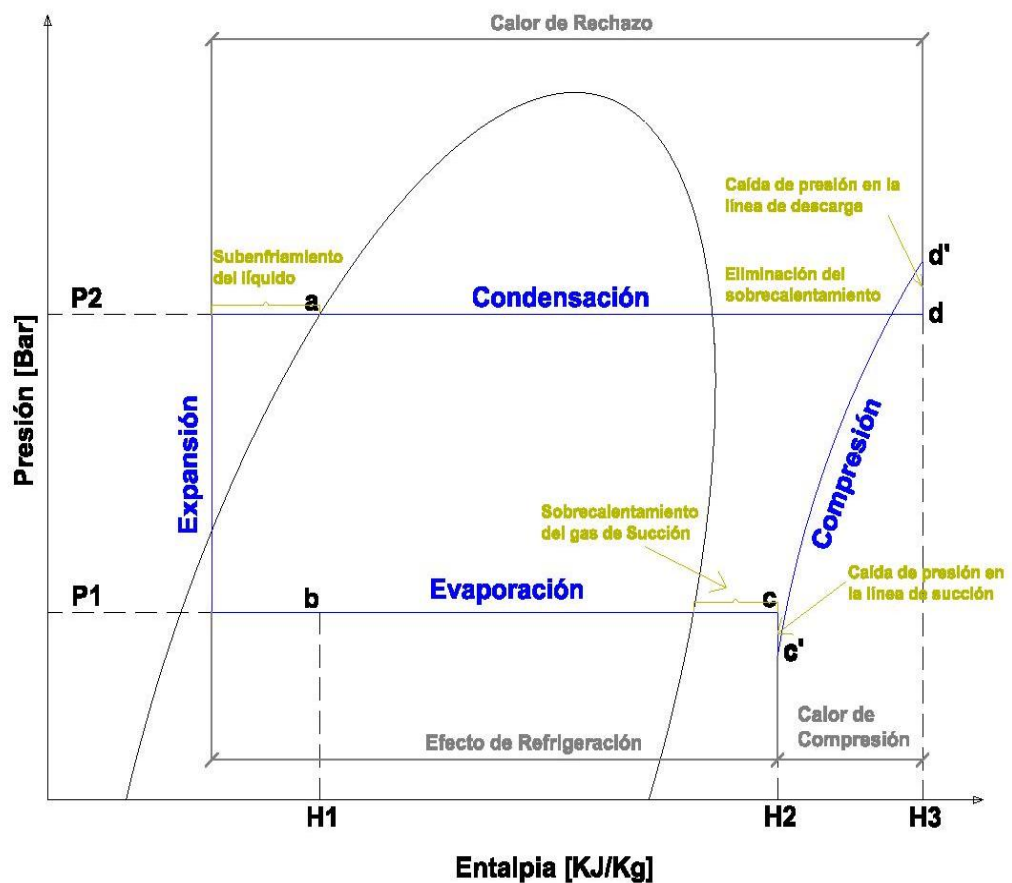


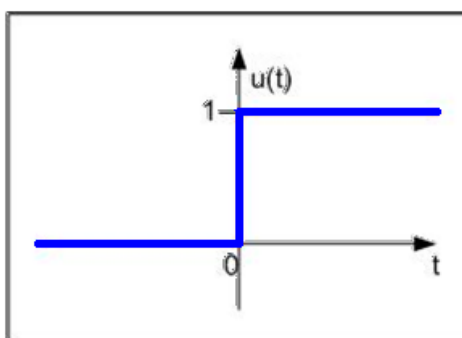
Figura 4 - Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor en el diagrama p-h.

## 2.2 SEÑALES Y SISTEMAS.

### 2.2.1 Señal escalón unitario.

Una señal de tipo escalón se define como:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t < 0 \\ 1, & \text{si } t \geq 0 \end{cases}$$



**Figura 5 - Señal Escalón.**

Esta señal aplicada a un sistema permite conocer la respuesta del mismo frente a cambios abruptos, ayuda a determinar el tiempo de establecimiento de la señal, la constante de tiempo y el retardo de la repuesta del sistema. Además, debido a que posee un amplio espectro (producto de la discontinuidad del salto) es equivalente a aplicar al sistema una gran cantidad de señales sinusoidales.

### 2.2.2 Señal impulso.

La respuesta del sistema a una entrada del tipo impulso unitario permite tener una idea sobre el comportamiento intrínseco del mismo. La representación matemática de la función impulso unitario:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t < 0 \\ \infty, & \text{si } t = 0 \\ 0, & \text{si } t > 0 \end{cases}$$

### 2.2.3 Transformada de La Place.

La transformada de Laplace se define como:

$$F(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t)e^{-st} dt = L[f(t)]$$

En donde,

$f(t)$  = una función del tiempo  $t$  tal que  $f(t) = 0$  para  $t < 0$ .

$s$  = una variable compleja.

$L$  = un símbolo operativo que indica que la cantidad a la que antecede se va a transformar mediante la integral de Laplace

$$\int_0^{\infty} e^{-st} dt]$$

$F(s)$  = transformada de Laplace de  $f(t)$ .

A continuación se presentan tablas de las principales transformadas y teoremas de Laplace:

Item no.	$f(t)$	$F(s)$
1.	$\delta(t)$	1
2.	$u(t)$	$\frac{1}{s}$
3.	$tu(t)$	$\frac{1}{s^2}$
4.	$t^n u(t)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
5.	$e^{-at}u(t)$	$\frac{1}{s+a}$
6.	$\sin \omega t u(t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
7.	$\cos \omega t u(t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$

**Tabla 2 - Principales transformadas de Laplace**

Item no.	Teorema	Nombre
1.	$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t)e^{-st} dt$	Definición
2.	$\mathcal{L}[kf(t)] = kF(s)$	Linealidad
3.	$\mathcal{L}[f_1(t) + f_2(t)] = F_1(s) + F_2(s)$	Linealidad
4.	$\mathcal{L}[e^{-at}f(t)] = F(s + a)$	Desplazamiento en la frecuencia
5.	$\mathcal{L}[f(t - T)] = e^{-sT}F(s)$	Desplazamiento en el tiempo
6.	$\mathcal{L}[f(at)] = \frac{1}{a}F\left(\frac{s}{a}\right)$	Escalamiento
7.	$\mathcal{L}\left[\frac{df}{dt}\right] = sF(s) - f(0^-)$	Diferenciación
8.	$\mathcal{L}\left[\frac{d^2f}{dt^2}\right] = s^2F(s) - sf(0^-) - \dot{f}(0^-)$	Diferenciación
9.	$\mathcal{L}\left[\frac{d^n f}{dt^n}\right] = s^n F(s) - \sum_{k=1}^n s^{n-k} f^{(k-1)}(0^-)$	Diferenciación
10.	$\mathcal{L}\left[\int_{0^-}^t f(\tau) d\tau\right] = \frac{F(s)}{s}$	Integración
11.	$f(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$	Teorema del Valor Final
12.	$f(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$	Teorema del Valor Inicial

**Tabla 3 - Teoremas de Transformada de Laplace**

#### 2.2.4 Función de Transferencia.

Una función de transferencia es un modelo matemático que relaciona la respuesta de un sistema, a una señal de entrada o excitación. Describe un sistema mediante el cociente de ecuaciones diferenciales y se puede representar a través de la transformada de Laplace como:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Donde, Y(s) es la Transformada de Laplace de la respuesta del sistema y U(s) es la Transformada de Laplace de la señal de entrada.

#### 2.2.4.1 Polos de una función de transferencia.

Los Polos de una función de transferencia son los valores de “s” que hacen que la función de transferencia se vuelva infinita. De forma general en una función de transferencia factorizada, son los factores del denominador.

#### 2.2.4.2 Ceros de una función de transferencia.

Los Ceros de una función de transferencia son los valores de “s” que hacen que la función de transferencia sea igual a cero. De forma general en una función de transferencia factorizada, son los factores del numerador.

#### 2.2.5 Sistemas de primer orden.

Se denomina sistema lineal diferencial de primer orden de entrada  $u(t)$  y salida  $y(t)$  al sistema regido por una ecuación diferencial de la forma:

$$\frac{dy}{dt} + ay = Ku$$

Entonces, un sistema de primer orden sin ceros y aplicando la transformada de Laplace esta descrito por la forma:

$$\frac{Y_s}{U_s} = \frac{K}{s + a}$$

Si la entrada  $U_s$  es un escalón la salida  $Y_s$  viene dada:

$$Y_s = \frac{K}{s(s + a)}$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace obtenemos:

$$y(t) = y_f(t) + y_n(t) = 1 - e^{-at}$$

Evaluando la ecuación en el tiempo:

$$e^{-at} \Big|_{t=\frac{1}{a}} = 0.37$$

$$y(t) = 1 - e^{-at} \Big|_{t=\frac{1}{a}} = 0.63$$

A partir de esto tenemos:

➤ **Constante de tiempo: = 1/a**

Se puede definir como el tiempo para que el valor de  $e^{-at}$  decaiga al 37% de su valor inicial, o el tiempo que toma la respuesta de escalón para alcanzar el 63% de su valor final.

➤ **Tiempo de levantamiento, Tr:**

Es el tiempo necesario para que la forma de onda pase de 0.1 a 0.9 de su valor final:

$$T_r = \frac{2.31}{a} - \frac{0.11}{a} = \frac{2.2}{a}$$

➤ **Tiempo de estabilización Ts:**

Es el tiempo necesario para que la respuesta alcance el 2% alrededor de su valor final:

$$T_s = \frac{4}{a}$$



En la siguiente figura podemos observar la respuesta de un sistema de primer orden a una respuesta escalón.

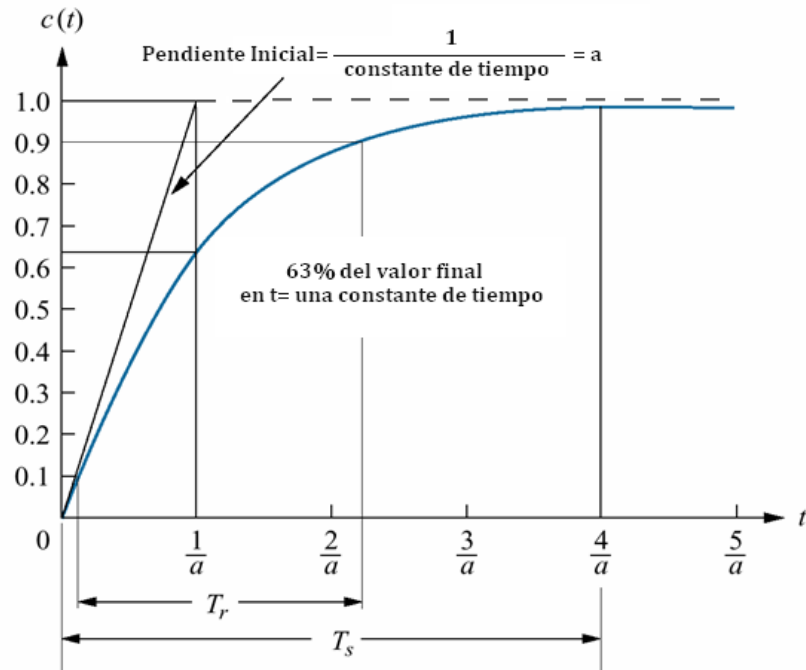


Figura 6 - Constantes de un sistema de primer orden.

### 2.2.6 Sistemas de segundo orden.

Los sistemas de segundo orden poseen una gran variedad de respuesta, que dependen del factor de amortiguamiento  $\xi$  y la frecuencia natural no amortiguada  $\omega_n$ . De manera general un sistema de segundo orden se expresa, en el dominio de la Laplace, como sigue:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

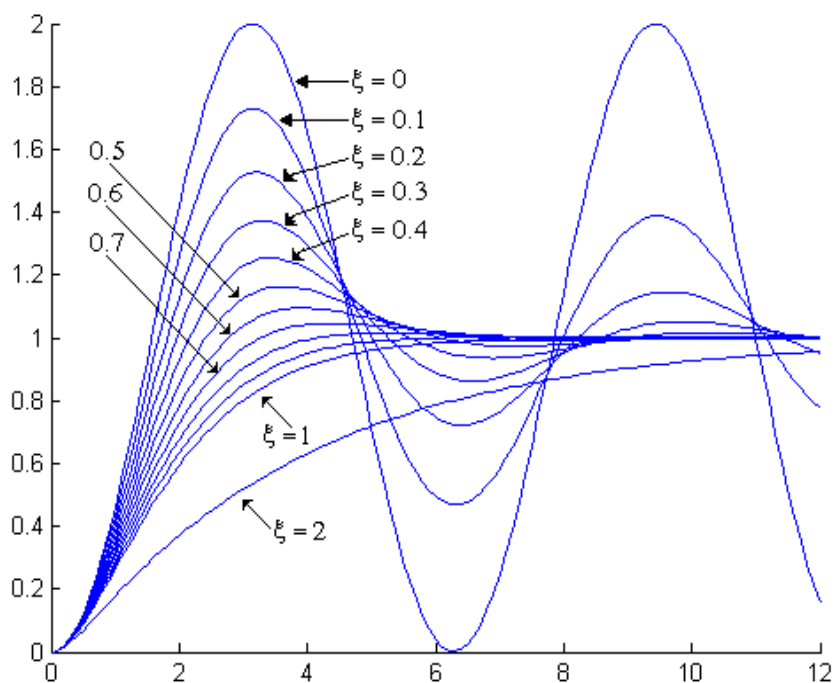
El producto  $\xi\omega_n$  se conoce como atenuación del sistema ( $\sigma$ ).

La solución de la función de transferencia viene dada:

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

El comportamiento dinámico del sistema de segundo orden puede ser explicado en términos del factor de amortiguamiento  $\xi$  [3]:

- ✓ Si  $\xi = 0$ , los polos son imaginarios conjugados, el sistema es llamado críticamente estable y la respuesta son oscilaciones sostenidas.
- ✓ Si  $0 < \xi < 1$ , los polos son complejos y conjugados; se dice que el sistema es sub-amortiguado.
- ✓ Si  $\xi = 1$ , los polos son reales y repetidos y el sistema se denomina críticamente amortiguado.
- ✓ Si  $\xi > 1$ , los polos son reales y distintos y el sistema se denomina sobre-amortiguado.



**Figura 7 – Comportamiento de un sistema de segundo orden en términos de  $\xi$ .**

### 2.2.7 Sistemas subamortiguados de segundo orden.

A continuación se explicaran algunas de las características que describen a un sistema de segundo orden sub-amortiguado.

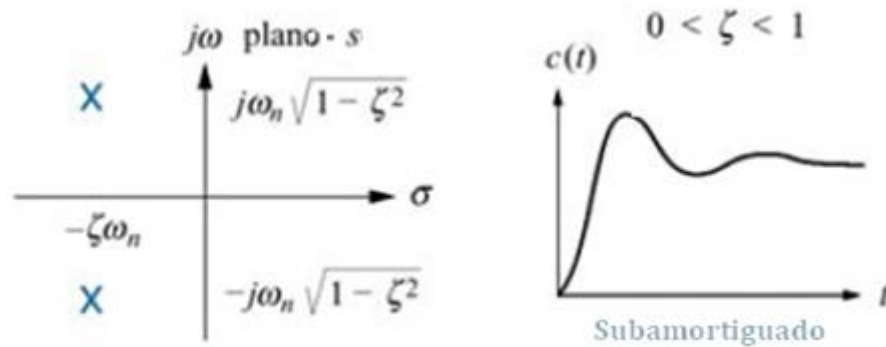


Figura 8 – Sistema sub-amortiguado de segundo orden

➤ **Tiempo pico  $T_p$ .**

Es el tiempo necesario para que alcance el primer pico o máximo.

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}$$

➤ **Tiempo de levantamiento  $T_r$ .**

Tiempo necesario para que la onda pase de 0.1 a 0.9 del valor final.

➤ **Tiempo de estabilización  $T_s$ .**

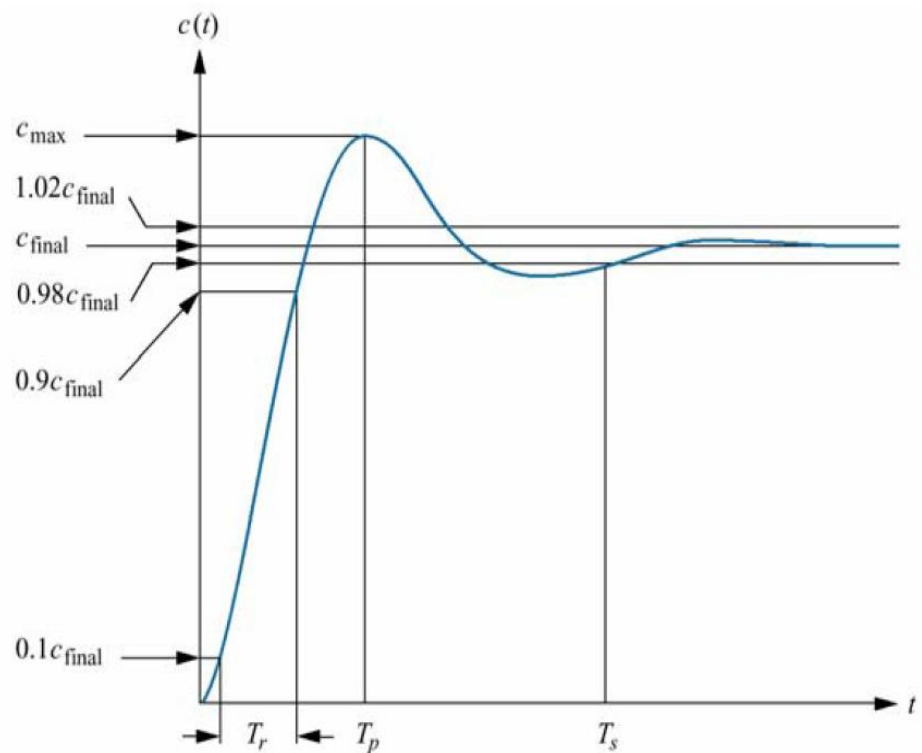
Tiempo necesario para que las oscilaciones amortiguadas de la respuesta transitoria alcancen y permanezcan a no más de  $\pm 2\%$  del valor en estado estable.

$$T_s = \frac{4}{\omega_n\zeta}$$

➤ **Sobre nivel Porcentual %OS.**

Cantidad que la forma de onda sobrepasa el valor en estado estable o final, en el tiempo pico, expresada como porcentaje del valor en estado estable.

$$\%OS = e^{-(\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2})} \times 100$$



**Figura 9 – Características de un sistema de segundo orden subamortiguado.**

### 2.2.8 Diagrama de bode.

Un Diagrama de Bode es una representación gráfica que sirve para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema. Normalmente consta de dos gráficas separadas, una que corresponde con la magnitud de dicha función y otra que corresponde con la fase.

Para el gráfico de amplitud:

$$\begin{aligned} G(j\omega)|_{\text{db}} &= 20\text{Log}_{10}|G(j\omega)| \\ &= 20\text{Log}_{10}\sqrt{\text{Re}^2G(j\omega) + \text{Im}^2G(j\omega)} \end{aligned}$$

Para el gráfico de fase:

$$\angle G(j\omega) = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{\text{Im}[G(j\omega)]}{\text{Re}[G(j\omega)]}\right)$$

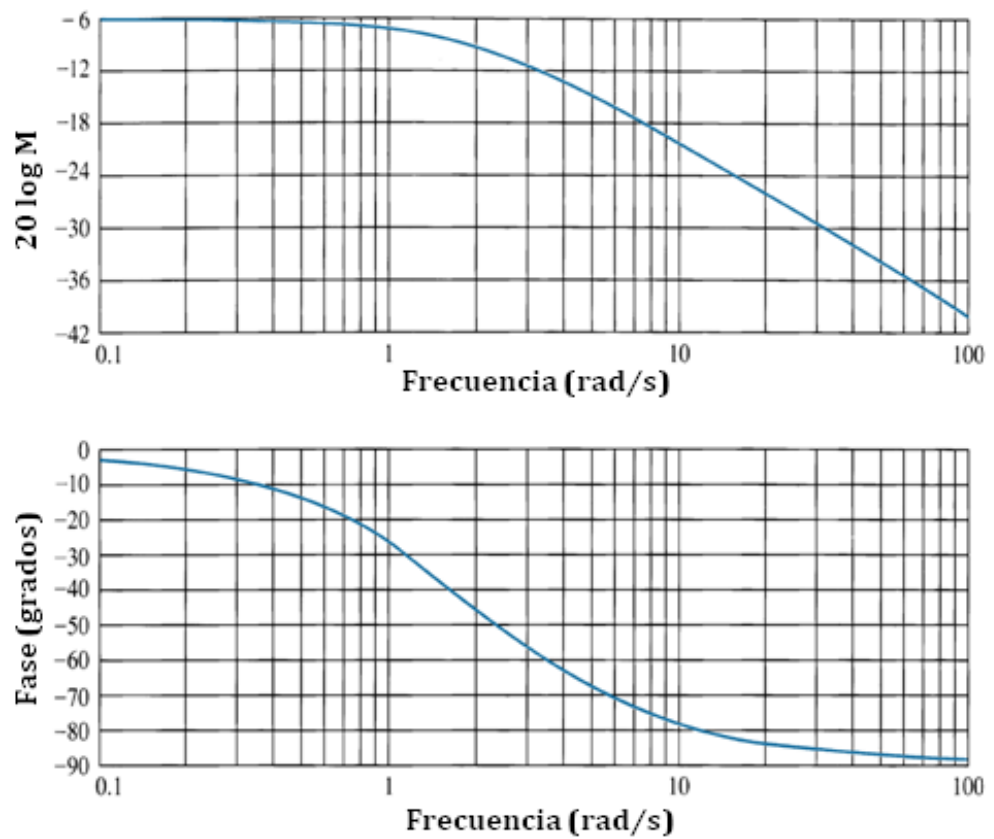


Figura 10 - Diagrama de Bode de Magnitud y fase

## 2.3 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.

La identificación de sistemas es una técnica que permite obtener el modelo matemático de un sistema dinámico a partir de datos experimentales.

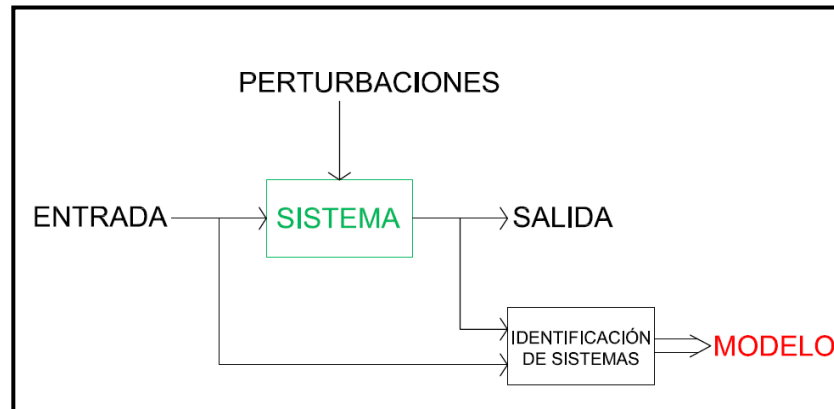


Figura 11 – Diagrama de bloques general para Identificación de Sistemas.

### 2.3.1 Etapas de un proceso de identificación.

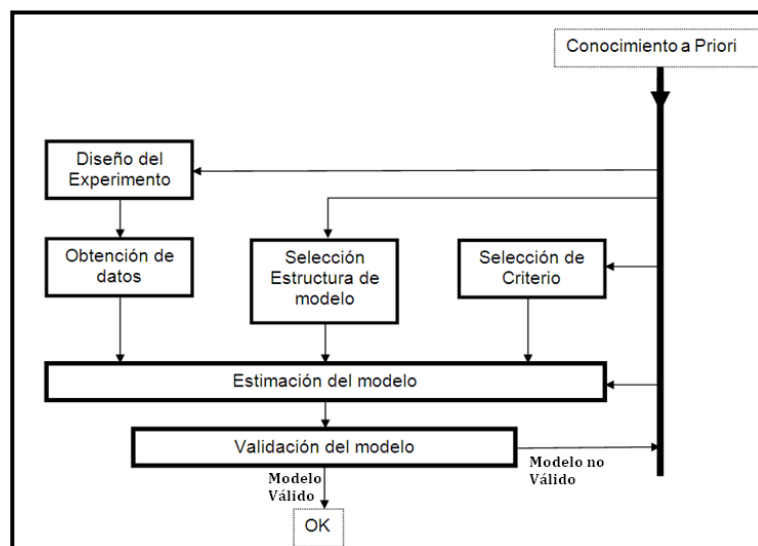


Figura 12 – Etapas de un proceso de identificación [4].

➤ **Diseño del experimento y recolección de los datos.**

En esta etapa se elige cuales son las señales a medir y el momento en que debe hacerse dicha medición. Se selecciona el tipo de entrada con la cual se excitará el sistema (Random Binary, PRBS, Multiseno, Escalones/Pulsos múltiples, etc.), y como la información será almacenada para su posterior tratamiento. El objetivo del diseño del experimento es seleccionar y tratar los datos (pre-filtrado, eliminar tendencias, selección de la frecuencia de muestreo) de tal manera que proporcionen la mayor información sobre el comportamiento del sistema.

➤ **Selección de la estructura del modelo.**

Elegir un conjunto de estructuras de modelos candidatos, dentro del cual se escogerá un modelo apropiado, que mejor se ajuste a los datos disponibles de entrada-salida. La selección de la estructura del modelo debe basarse en el correcto entendimiento del proceso de identificación y el conocimiento sobre el sistema a ser identificado (conocimiento a priori).

➤ **Selección Del Modelo Óptimo**

Determinación de un modelo particular perteneciente a la estructura de modelos, que es el que mejor se ajusta a la información obtenida.

➤ **Validación.**

En esta etapa se decide si el modelo obtenido es lo suficientemente bueno de tal manera que describe realmente el sistema. La validación requiere normalmente la realización de nuevos experimentos.

### 2.3.2 Métodos de identificación de sistemas.

Dependiendo del tipo de modelo obtenido puede clasificarse en:

- ✓ **Métodos no Paramétricos:** Muchos sistemas pueden ser perfectamente representados mediante un gráfico o una tabla de datos, que describan sus características dinámicas mediante un número no finito de parámetros. Los métodos no paramétricos permiten obtener este tipo de modelos.
  
- ✓ **Métodos Paramétricos:** Existen modelos que deben describir las relaciones entre las variables del sistema mediante expresiones matemáticas como pueden ser ecuaciones diferenciales (sistemas continuos) o en diferencias (sistemas discretos), para poder determinar este tipo de modelos se usan métodos paramétricos. Estos métodos requieren la elección de una posible estructura del modelo, de un criterio de ajuste de parámetros, y por último de la estimación de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales.

### 2.3.3 Métodos no paramétricos.

- ✓ **Análisis de la Respuesta Transitoria:** que se basa en la obtención de la respuesta del sistema a un impulso o a un escalón. Es un excelente método para obtener un rápido enfoque de la relación causa y efecto, retardos, constantes de tiempos y ganancias estáticas del sistema.
  
- ✓ **Análisis de Correlación:** Permite estimar la respuesta al impulso de un sistema sin aplicar dicha entrada, sino a partir de un conjunto de datos muestreados, al utilizar una señal de excitación. Como el



análisis de correlación da un rápido enfoque de constantes de tiempo y retardos.

- ✓ **Técnica Frecuenciales:** que son utilizadas para estimar la respuesta de frecuencia del sistema. Dentro de las técnicas frecuenciales podemos diferenciar entre el análisis de Fourier y el Análisis Espectral.

#### 2.3.4 Identificación Paramétrica

Los modelos paramétricos, quedan descritos mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema: entradas, salida y perturbaciones.

En esta sección se examinará los modelos comúnmente utilizadas en el proceso de identificación paramétrica, basadas en el Error de Predicción.

De manera general tenemos que:

$$A(z)y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - n_k) + \frac{C(z)}{D(z)}e(t)$$

Donde A, B, C, D y F son polinomios en Z

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$$

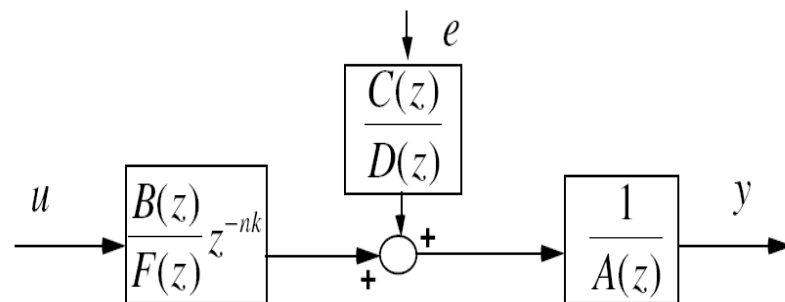
$$B(z) = b_1 + b_2z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b+1}$$

$$C(z) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}$$

$$D(z) = 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_{n_d}z^{-n_d}$$

$$F(z) = 1 + f_1z^{-1} + \dots + a_{n_f}z^{-n_f}$$

El polinomio A es término AutoRegresivo (AR), B corresponde a la entrada eXternal(X)  $u$ , C es una Media Móvil, D es un término autoregresivo aplicado exclusivamente al modelo de la perturbación y  $n_k$  es el tiempo muerto del sistema. El diagrama de bloques general de los modelos basados en el error de predicción se muestra en la figura siguiente:



**Figura 13 - Diagrama de bloques de los modelos basados en el Error de Predicción**

#### 2.2.4.1 Estructura Auto-Regresiva Con Entrada Externa (ARX)

El modelo de identificación ARX usa la estructura:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - n_k) + e(t)$$

- ✓ El problema de estimación se convierte en un problema de regresión lineal.
- ✓ Las estimaciones ARX de alto orden ( $n_a$  y  $n_b$  grandes) arrojan resultados consistentes pero pueden tener problemas de varianza en presencia de ruido significativo.
- ✓ Estimaciones ARX de bajo orden son problemáticas en la presencia de ruido significativo y cuando se selecciona una estructura de modelo incorrecta.

#### 2.2.4.2 Estructura Autorregresiva, Media Móvil Con Entrada Externa (ARMAX).

El modelo de identificación ARMAX usa la estructura:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - n_k) + C(z)e(t)$$

- ✓ El problema de estimación es un problema de regresión no lineal.
- ✓ Usualmente el orden del modelo ( $n_a$ ,  $n_b$ ,  $n_c$ ) se escoge bajo.
- ✓ La presencia del polinomio autorregresivo puede traer problemas de desvíos en la presencia de ruido significativo y/o errores en la estructura del modelo; sin embargo el polinomio de media móvil contrarrestará algunas veces los efectos negativos.

#### 2.2.4.3 Respuesta Al Impulso Finito (FIR)

El modelo de identificación FIR usa la estructura:

$$y(t) = B(z)u(t - n_k) + e(t)$$

- ✓ Representación de modelo “libre de estructura”, equivalente a lo encontrado en análisis de correlación. Traduce directo la respuesta al escalón
- ✓ La estimación es una regresión lineal.
- ✓ El orden apropiado del modelo ( $n_b$ ) depende del tiempo de muestreo seleccionado y el tiempo de estabilización del proceso, el resultado es usualmente alto (20 coeficientes o más).
- ✓ No se estima un modelo para el ruido auto correlacionado.

#### 2.2.4.4 Estructura De Modelo Box-Jenkins (B-J).

El modelo de identificación Box-Jenkins (B-J) usa la estructura:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - n_k) + \frac{C(z)}{D(z)} e(t)$$

- ✓ Es un problema de regresión no lineal
- ✓ Usualmente los órdenes del modelo ( $n_b$ ,  $n_c$ ,  $n_d$  y  $n_f$ ) se escogen bajos.
- ✓ Parametriza independientemente los modelos de la función de transferencia y el ruido; el problema radica en la cantidad de decisiones e iteraciones que tendrá que hacer el usuario

#### 2.2.4.5 Estructura De Modelo Error De Salida (OE).

El modelo de identificación OE usa la estructura:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - n_k) + e(t)$$

- ✓ Es un problema de regresión no lineal.
- ✓ Usualmente los órdenes del modelo ( $n_b$  y  $n_f$ ) se escogen bajos.
- ✓ Parametriza independientemente la entrada y el ruido, sin embargo no se obtiene un modelo de ruido auto correlacionado.
- ✓ Trabaja muy bien en conjunto con un pre filtrado relevante al control.

### 2.3.5 Guías de diseño de la señal de entrada: señal multisenso (Schroeder-Phased).

Las señales multisenso son determinísticas y periódicas, representadas en modo simple por la ecuación:

$$u_s(k) = \lambda \sum_{i=1}^{n_s} \sqrt{2\alpha_i} \cos(\omega_i kT + \phi_i)$$

$T$  : Tiempo de muestreo.

$N_s$  : Longitud de la Secuencia.

$n_s$  : Numero de Sinusoides,  $n_s = N_s/2$

$\alpha_i$  : Coeficientes de fourier normalizados  $\sum_{i=1}^{n_s} \alpha_i = 1$

$\omega_i$  :  $2\pi i/N_s T$ :

$\phi_i$  :  $2\pi \sum_{j=1}^i j\alpha_j$ .

$\lambda$  : Factor de escalamiento.

Para determinar los rangos de frecuencias de la multisenso podemos estimar un valor alto y valor bajo de la constante de tiempo dominante de la planta ( $\tau_{dom}^H, \tau_{dom}^L$ ):

$$\omega_* = \frac{1}{\beta_s \tau_{dom}^H} \leq \omega \leq \frac{\alpha_s}{\tau_{dom}^L} = \omega^*$$

$\alpha_s$  y  $\beta_s$  son seleccionados para asegurar un alto y bajo contenido de frecuencias son posibles en la señal de entrada correspondiente a la velocidad deseada en lazo cerrado y el tiempo de establecimiento de lazo abierto. Esto requiere que las siguientes relaciones se satisfagan:

$$\omega_* \geq \frac{2\pi}{N_s T} \quad \text{y} \quad \omega^* \leq \frac{2\pi n_s}{N_s T} \leq \frac{\pi}{T}$$

# CAPITULO 3

## DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

### 3.1 DISEÑO DE LA PLANTA DE REFRIGERACIÓN.

#### 3.1.1. Partes Principales De La Planta

El sistema frigorífico que se diseño se lo intento realizar de la forma más didáctica posible con el objetivo de que se pueda apreciar bien cada elemento de la planta además de que se pueda observar su función.

El sistema frigorífico que se diseño consta de las siguientes partes principales para su funcionamiento óptimo:

- ✓ Compresor
- ✓ Tanque recibidor de liquido
- ✓ Condensador
- ✓ Filtro
- ✓ Válvula solenoide
- ✓ Tubo capilar
- ✓ Evaporador
- ✓ Tanque de succión

### 3.1.2. Diagrama del Sistema

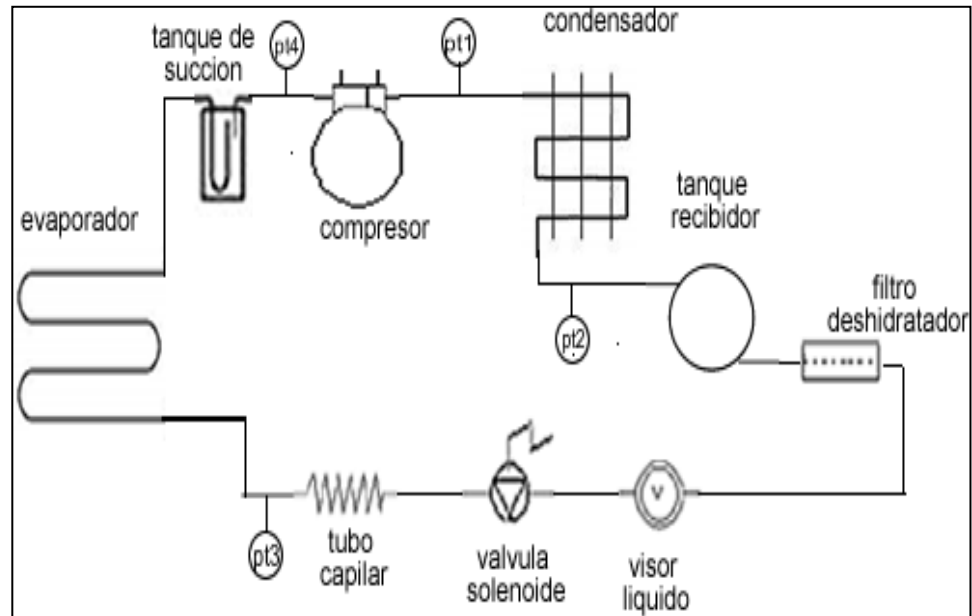


Figura 14 – Diagrama del sistema de Refrigeración.



Figura 15 – Distribución de los componentes en el sistema real.

### 3.1.3. Bases del diseño de los componentes

Para empezar el diseño de la planta se tiene que fijar el volumen de la cámara frigorífica y la temperatura mínima de trabajo.

Se escogió adaptar un tanque de presión de calentador de agua de 55 litros, colocarlo como camisa exterior de la cámara, con un diámetro de 55cm y una altura de 60 cm. La camisa interna de la cámara se la fijara mediante la ecuación de transferencia de calor intentando que la cámara admita la menor cantidad de calor del exterior, sabiendo que se rellenara de poliuretano expansible con una constante de conducción igual a  $0.032 \text{kcal}/(\text{m h } ^\circ\text{C})$ , con temperatura inicial la temperatura ambiente, es decir  $28^\circ\text{C}$  y temperatura final la mínima que la cámara puede llegar a tener, ósea  $-12^\circ\text{C}$ .

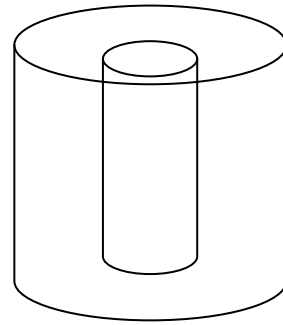


Figura 16 – Cámara Frigorífica.



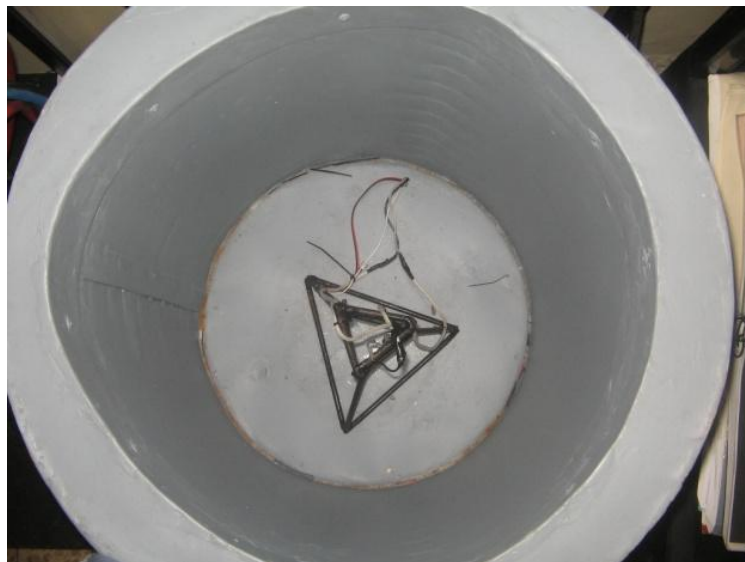
$$dQ = UA \frac{dT}{dr}$$

$$dQ = 2\pi rhU \frac{dT}{dr}$$



Resolviendo la ecuación diferencial queda:

$$Q = (T_f - T_i) \frac{2\pi hU}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$$



**Figura 17 – Carga térmica representada por una resistencia eléctrica**

Un valor muy pequeño de potencia de transferencia de calor sería algo menor a 30 Watt, así que despejando el radio interno, nos queda  $R_i = 22.5 \text{ cm}$

Teniendo los valores de la altura del tanque y los radios de las camisas internas y externas estamos listos para decir la potencia frigorífica que deseamos.

Para calcular la potencia frigorífica se suman todas las pérdidas del sistema más la capacidad de enfriamiento.

En las pérdidas tenemos los 30W de transferencia de calor en las paredes más 10 W en tapa de la base de la cámara, más 80 W de una resistencia de cautín que simulara la carga en el modelo matemático más la capacidad frigorífica que será calculada a continuación:

$$\text{Pot} = Q/t$$

$$Q = mc (T_o - T_i)$$

La masa en este caso el volumen de la cámara ocupado de aire. Siendo  $m = 1.2 \times 0.22^2 \times 0.6 \times \pi$  quedando  $m = 0.11 \text{ kg}$

Y la diferencia de temperatura  $T_o - T_i = 45^\circ\text{C}$

Poniendo que se que se quiere una rapidez de enfriar esto en 20 minutos entonces tenemos que:

$$\text{Pot} = 0.11 \times 1.012 \times 45 / 600 = 8 \text{ Watts, por ajuste se dice } 5 \text{ Watts}$$

Quedando como carga frigorífica =

$$Q_{\text{load}} = 80 + 30 + 10 + 5 = 135 \text{ Watts}$$

Entonces decimos que la carga frigorífica es **135 Watts**.

#### **3.1.4. Dimensionamiento de Cada Componente.**

Basados en esta carga frigorífica se procederá a tomar a dimensionar cada uno de los componentes.

### 3.1.4.1 Compresor



Figura 18 – Compresor

#### ✓ **Función del Compresor**

El compresor tiene la función de bombear y succionar el líquido refrigerante; con el compresor se tiene que tener varios cuidados como impedir que le entre o salga el fluido en forma de líquido ya al entrar líquido al compresor corre el riesgo de dañarse.

En lo que es la descarga de líquido es casi improbable que suceda, pero en la succión si es posible que entre líquido si existe sub-enfriamiento, ya que si no hay nada que enfriar el fluido puede llegar con baja temperatura al retorno.

Para evitar estos inconvenientes se puede colocar una tanque de succión que su labor es coger el fluido en forma

#### ✓ **Dimensionamiento del Compresor**

Para el dimensionamiento del compresor se escogió un compresor hermético de movimiento alternativo usado en las

refrigeradoras domesticas, para determinar el caballaje del compresor, se tiene que determinar el COP que se necesita.

$$\text{COP} = 1 / (T_a / T_b - 1)$$

Diciendo que  $T_a$  es temperatura ambiente de  $30^\circ\text{C}$  y  $T_b$  es temperatura minima posible, ósea  $-15^\circ\text{C}$

$$\text{Quedando } \text{COP} = 0.4$$

$$\text{Como } \text{COP} = Q_f / W_e$$

Donde  $W_e$  es potencia eléctrica

$$\text{Nos queda que } W_e = Q_f / \text{COP}$$

$$W_e = 135 / 0.4$$

$$W_e = 337\text{W}$$

Dado que la eficiencia en el motor eléctrico es de 80% entonces tendremos una potencia mecánica del compresor  $P_m = 337 \times 0.8 = 270\text{W}$  que equivaldría a un compresor de 1/3 HP

### 3.1.4.2 Condensador

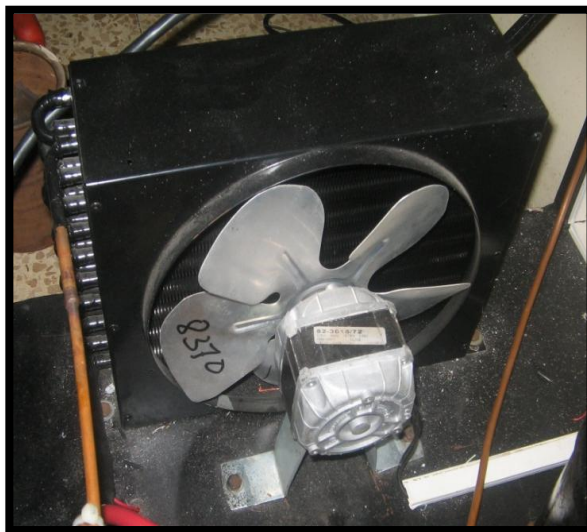


Figura 19 – Condensador Forzado

### ✓ **Funcionamiento Del Condensador**

El condensador tiene como objetivo principal coger el fluido que es expulsado del compresor a alta temperatura y a alta presión y bajarle la temperatura mas no la presión, esto es imposible no bajar la presión en su totalidad, pero la temperatura si se la logra bajar notablemente mediante un intercambio de calor con el ambiente y en el caso de los condensadores forzados el ventilador ayuda a que el refrigerante se enfríe aun mas.

### ✓ **Diseño del Condensador**

Basados en el compresor de 1/3 HP las fabricas de ventas de equipos frigoríficos diseñan condensadores según la potencia del compresor.

Por este caso se pidió un condensador forzado para compresor de 1/3 HP.

Se solicito condensador forzado ya que este presenta un ventilador que ayuda a la condensación del fluido a lo que sale del compresor bajando el sobrecalentamiento

### **3.1.4.3 Evaporador**

#### ✓ **Funcionamiento Del Evaporador**

El evaporador tiene como funcionamiento “enfriar”, esto lo hace cuando el refrigerante sale del proceso de expansión y recorre el evaporador que no es más que una cañería de cobre que rodea la cámara frigorífica, el refrigerante recorre el evaporador absorbiendo calor latente de la cámara.



**Figura 20 – Evaporador**

✓ **Diseño del Evaporador**

Para el diseño del evaporador se vuelve a tomar en cuenta la carga frigorífica y se dice que el líquido refrigerante debe absorber por transferencia de calor dicha potencia.

$$Q=U Ak (T_f-T_i)/D$$

Se compro tuberías de cobre de 8mm de diámetro , se dirá cuantos metros de tubería se necesitaran

$$A=8\pi x l=25.13l$$

U=coeficiente de conductividad del cobre= 370W/m °C

D=grosor de la tubería de cobre=2mm

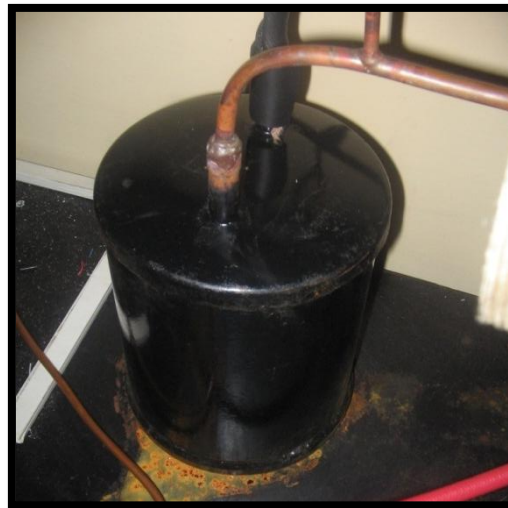
K= porcentaje de la tubería q produce la transferencia de calor hacia el interior de la cámara, esta constante es bastante

pequeña ya que solo un muy pequeño pedazo de la tubería está en contacto con el interior de la camisa, podemos decir que un 2% es un valor acertado

Despejando llegamos a  $q \approx 15\text{m}$

Esto implica que nosotros necesitaremos 15 m de tubería de cobre de 5/16 “

#### 3.1.4.4 Tanque De Succión



**Figura 21 – Acumulador de Succión**

El objetivo del tanque de tanque de succión es actuar como trampa en la succión, ya que si se produce sub-enfriamiento se corre el riesgo que él entre refrigerante en forma de líquido al compresor lo que podría averiarlo; para evitar eso se coloca el tanque de succión lo que produce que el refrigerante caiga al tanque de la succión y desde arriba del tanque se precede a succionar el compresor, succionando gas mas no líquido.

### 3.1.4.5 Tanque Recibidor de Líquido



**Figura 22 – Recibidor de Líquido**

El tanque recibidor de líquido tiene como objetivo almacenar el refrigerante cuando no se necesite tanto en el evaporador. El refrigerante abandona el condensador y se almacena en el tanque recibidor esperando a que sea solicitado.

### 3.1.4.6 Diseño de los Tanques

Nuestra planta es una planta didáctica, por ende la potencia frigorífica es bastante pequeña, tan pequeña que en la tabla de acumuladores de succión no aparece, por ende se procedió a coger el acumulador de succión y el recibidor más pequeño, esto no implica que nuestra planta no necesitaba ambos equipos, debido a que el compresor estará prendido por tiempo indefinido si en algún caso llega a producirse sub-enfriamiento el tanque de succión recibirá el líquido sub-enfriado y expulsará gas al compresor liberando de peligro a este



### 3.1.4.7 Tubo Capilar

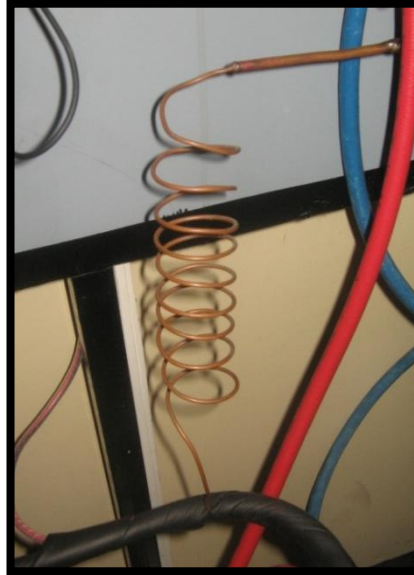


Figura 23 – Capilar

#### ✓ **Funcionamiento Del Tubo Capilar**

El funcionamiento del tubo capilar es producir la expansión a la entrada del evaporador lo que produce que el refrigerante baje la presión y la temperatura abruptamente, haciendo que el líquido entre a muy baja temperatura al evaporador listo para absorber calor latente de la cámara.

#### ✓ **Diseño Del Tubo Capilar**

Para la selección del tubo capilar se acudirá a una tabla encontrada en el Anexo A [4].

Sabemos que nuestra capacidad es de 135W, llevado a Kcal/h nos da 116 Kcal/h y acudiendo a la tabla tenemos que nuestro tubo capilar tendrá 1m de largo aproximadamente y será 0.6 mm de diámetro

#### 3.1.4.8 Visor Líquido



Figura 24 – Visor Líquido

El visor sirve para saber el estado del refrigerante antes de la expansión, este debería de ser completamente líquido antes de entrar. Se lo coloca previo al tubo capilar

#### 3.1.4.9 Válvula Solenoide



Figura 25 – Válvula solenoide

### ✓ **Funcionamiento De Válvula Solenoide**

La válvula solenoide cierra o abre camino al paso de refrigerante.

En nuestra planta lo que se busca es provocar un paso controlado de refrigerante a la expansión, de esta manera al tener menos refrigerante provocara mayor caída de presión, esto se logra abriendo la válvula un periodo de tiempo y cerrándolo otro periodo, de esta manera se puede controlar el flujo de refrigerante a la entrada de la expansión. Este control se lo realiza mediante un circuito electrónico.

### ✓ **Diseño De La Válvula**

La válvula solenoide consta de 2 partes principales, la bobina que es la parte eléctrica, en la que se escogió una bobina de 120V y el cuerpo de la válvula, donde el dimensionamiento de esta son las entradas y salidas que son simplemente las mismas que la cañería de cobre de toda la planta, ósea  $\frac{1}{4}$ .

### **3.1.5. Componentes de Medición**



**Figura 26 – Componentes de medición.**

Se procedió a colocar ciertos visualizadores de temperatura y presión con el fin de tener una idea de cómo está actuando el sistema en ciertos puntos claves.

Se tomo 4 puntos claves para le medición de temperatura y presión los cuales son:

- ✓ Descarga
- ✓ Succión
- ✓ Salida de la expansión
- ✓ salida del condensador

El objetivo de la medición en la descarga es determinar que tan caliente y la presión de la descarga, ya que si el compresor descarga a temperatura muy caliente el compresor corre peligro por sobrecalentamiento y si la presión de descarga es muy baja indica que el compresor tiene las válvulas averiadas ya que no es capaz de expulsar a presiones idóneas.

El objetivo de la medición de la succión es determinar la presión de succión ya que si es muy baja, forjamos al compresor a succionar, al haber menos presión este tiene la obligación de elevar mas la presión lo que hace que el compresor se caliente y la corriente se eleve, para evitar este bajo de presión se coloco un presostato de emergencia que apaga el sistema si la presión baja los -20cmHg

El objetivo de la medición en la expansión es tener conocimiento de la temperatura de salida de la expansión con la que se procederá a absorber calor latente de la cámara, si esta no es muy fría no enfriara lo suficiente.

El objetivo de la medición en la salida de la condensación es observar la cantidad de temperatura que se pierde en el condensador si la temperatura es muy alta podemos decir que la condensación tiene problemas, o si la presión cae demasiado también habría problemas en la condensación.

### 3.1.6. Diseño De La Parte Electrónica

#### 3.1.6.1 Objetivos De La Parte Electrónica

Para el control de la válvula solenoide se diseño un circuito electrónico modulador de ancho de pulso basado en un TRIAC con un periodo de funcionamiento de 10 segundos y un tiempo de abierto mínimo de 2 segundos ya que no se puede pedir que la válvula este cerrada por mucho tiempo ya que generaría vacío en la succión

#### 3.1.6.2 Diagrama De Fuerza Del Circuito

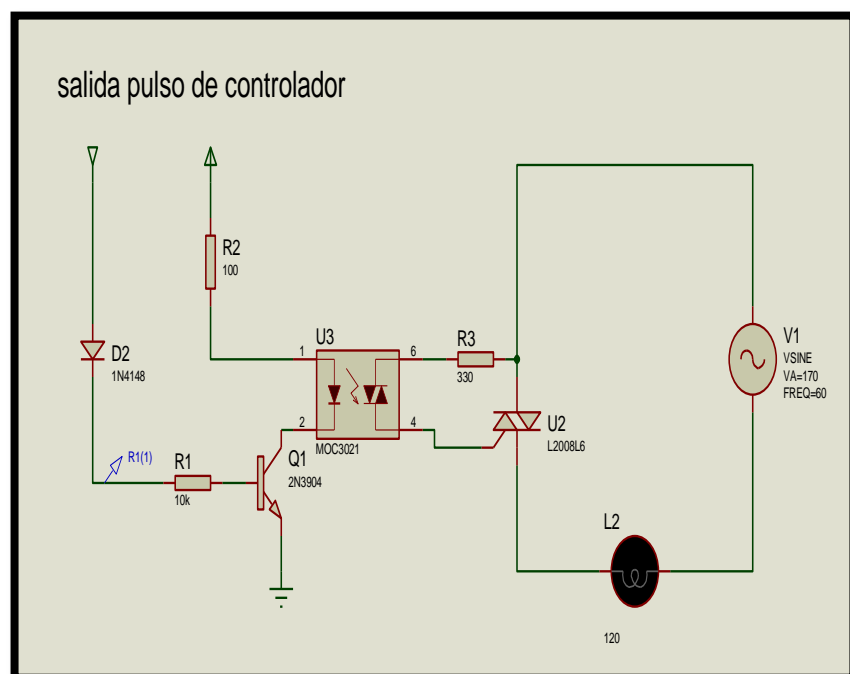


Figura 27 – Diagrama de Fuerza.

La modulación de ancho de pulso se hace por medio de programación de PIC con el pic 16F887, la programación a más de la modulación también hace la visualización de las temperaturas.

### 3.1.6.3 Diseño Del Circuito Acondicionador De Señal De Las Temperaturas

En este circuito se busca que el rango de las temperaturas posibles de marcar sean convertidas a voltajes entre 0 V a 5 V, se partió como temperatura más alta 60 °C como peor de los casos, y como temperatura más baja se puso - 40 °C ya que en la expansión la temperatura podría alcanzar esos niveles.

Para esto se hizo un arreglo de sumadores y seguidores de señal que nos dieron este resultado, el mismo circuito se generalizo a todos los sensores.

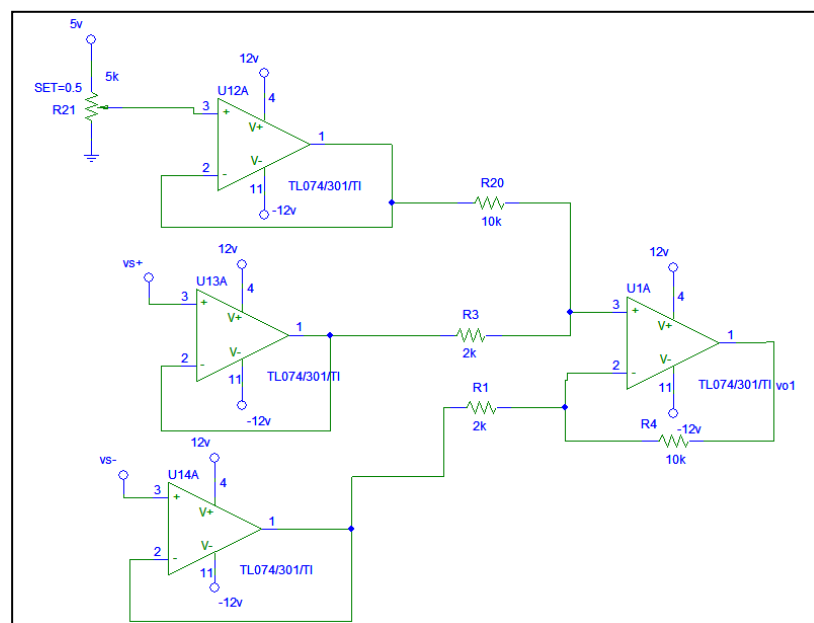
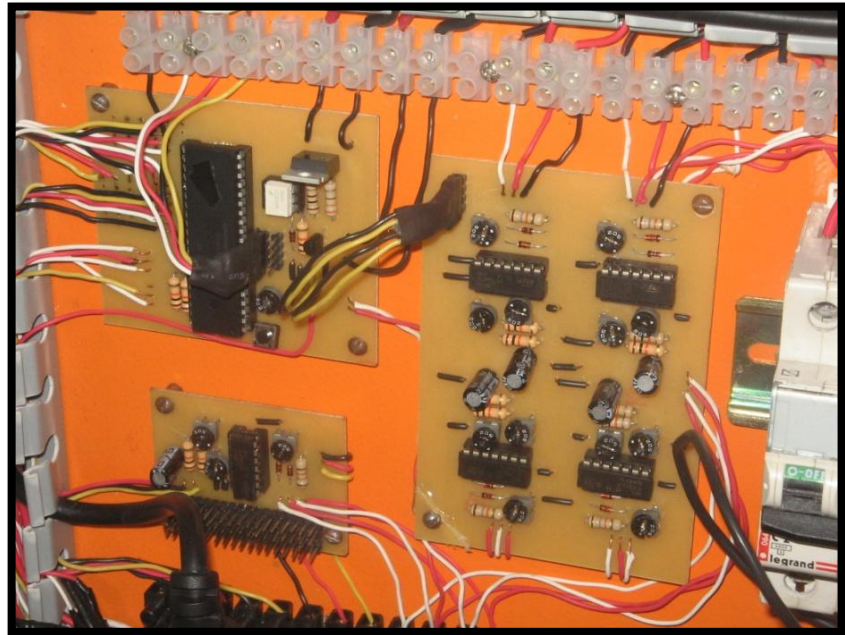
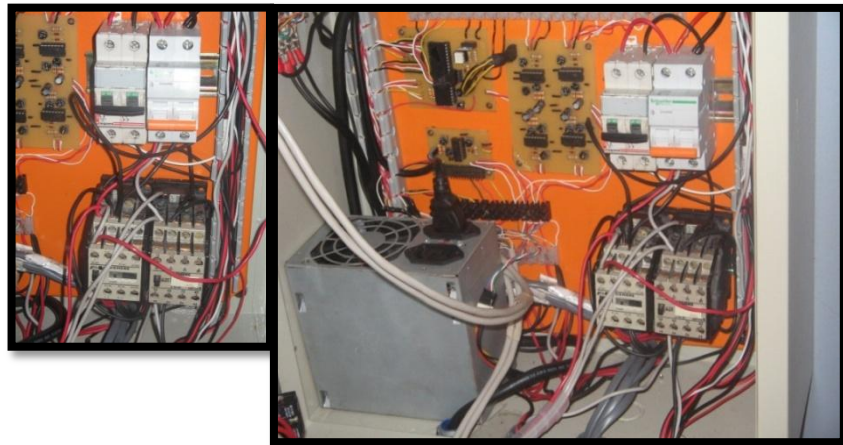


Figura 28 – Acondicionadores de señal de temperatura.



**Figura 29 – Acondicionadores de señal de temperatura en la planta real.**

Además de los circuitos electrónicos se hizo el circuito eléctrico de mando, de encendido y apagado.



**Figura 30 – Circuito de fuerza de la planta real.**



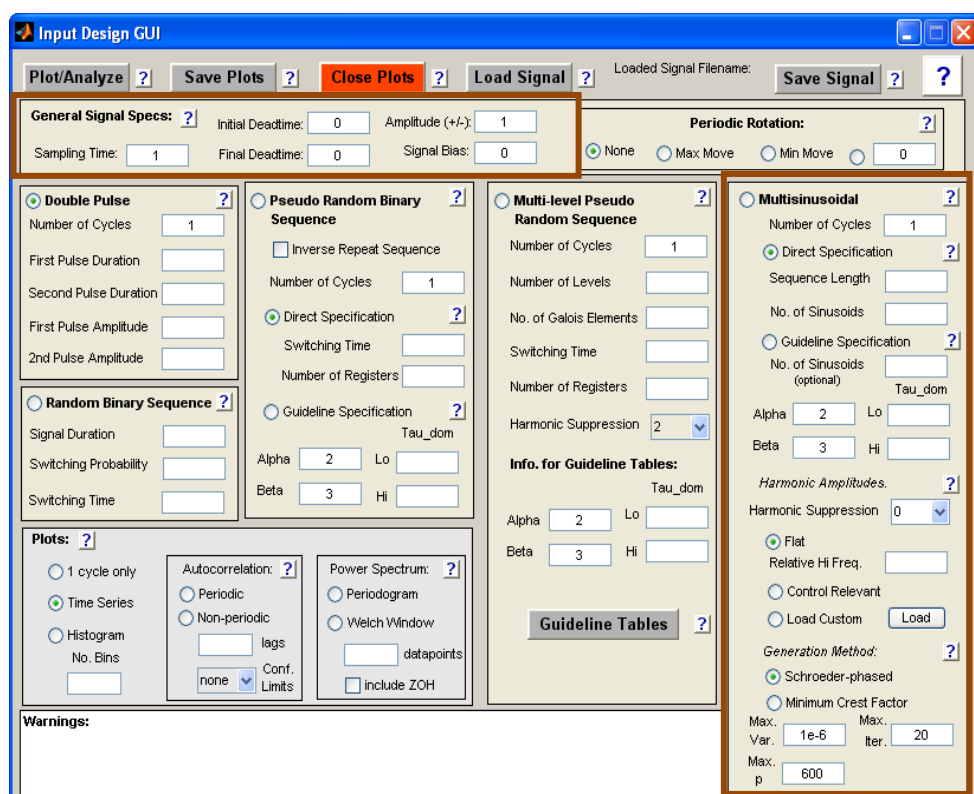
**Figura 31 – Planta piloto.**



### 3.2 Diseño de la señal de entrada: señal multisenso (Schroeder-Phased).

Debido a la dinámica de nuestra planta, se escogió como señal de entrada, una multisenso. Dicha señal será obtenida mediante una aplicación desarrollada en MATLAB, llamada Input Design Gui, programa realizado por Daniel E. Rivera y Martin W. Braun.

A continuación se muestra la ventana principal de dicha aplicación:



**Figura 32 – Interfaz Grafica usada para el diseño de las señales.**

La Input Design Gui facilita el cómputo de la señal de entrada de acuerdo a ciertos parámetros específicos, los cuales dependen únicamente del comportamiento de la planta y las variables de interés. A continuación se explica cuales son y cómo determinar cada uno de estos parámetros, para el correcto diseño de la señal de entrada.

Aspectos generales:

- ✓ *Sampling Time (Tiempo de muestreo)*, para la multiseno representa el tiempo de cambio de la señal.
- ✓ *Amplitude (Amplitud de la señal)*,
- ✓ *Signal Bias*, es desplazamiento de la señal con respecto al eje horizontal.

Aspectos de la multiseno:

- ✓ *Number of cycles (Número de ciclos)*, especifica con cuantos periodos se diseña la multiseno.
- ✓ *Sequence length  $N_s$  (Longitud de la Señal)*,
- ✓ *N° of sinusoids ( $n_s$ )*, El numero de armónicos de la señal, por definición  $n_s = N_s/2$ .
- ✓ *Alpha,  $\alpha_s$*
- ✓ *Beta,  $\beta_s$*
- ✓ *Tao Dom Lo, Hi*, Estimación baja y alta para el Tao de la planta

### 3.2.1. Obtención del tao dominante de la planta.

Para obtener el Tao dominante de la planta se utiliza la respuesta a una entrada escalón. Esto es, estimar el tiempo en que la respuesta llega al 63% del valor final o estacionario.

La señal escalón para determinar el Tao fue de 1V, que representa un porcentaje de apertura de la válvula de 20%.

Temperatura inicial= 29.13 °C

Temperatura final= -12.2 °C

Valor del paso = 41.33 °C

63%\*Valor de paso = 26.04 °C

$T(t) = 3.10$  °C

$t = 2100$  seg. =35min.

$\tau = 2100$  seg.

$\theta = 400$  seg

$$\tau_{dom} = \tau - \frac{\theta}{2} = 2100 - \frac{400}{2}$$

$$\tau_{dom} = 1900 \text{ seg} = 31.667 \text{ min}$$

Donde  $\theta$  representa el tiempo muerto.

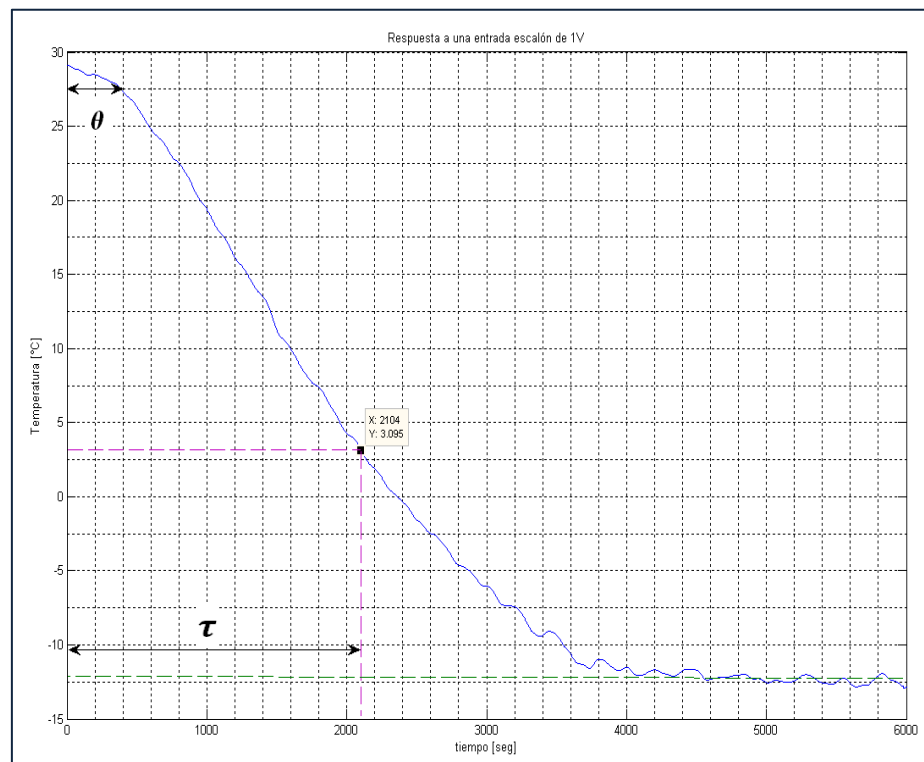


Figura 33 – Obtención del Tao.

De igual forma se realizaron pruebas a distintas entradas escalón. En la tabla siguiente se detalla los resultados obtenidos:

Escalón [V]	%apertura válvula	$\tau$ [Seg]	$\theta$ [Seg]	$\tau_{dom}$ [Seg]	$T_{final}$ [°C]
1	20%	2100	400	1900	-12.2
0.5	40%	1600	240	1500	-10
0.33	60%	1400	120	1340	-7
0.2	100%	1100	90	1055	-5.2

**Tabla 4 –Pruebas a varias entradas escalón.**

La variación del  $\tau$  se debe a la no linealidad de nuestro sistema. Por tanto, en el momento del diseño de la señal de entrada se debe considerar estas características.

### 3.2.2. Obtención del tiempo de muestreo máximo.

Según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear.

En radianes/ seg la frecuencia de Nyquist es:

$$\omega_n = \frac{\pi}{T}$$

El ancho de banda del sistema se determina del gráfico de Bode y se relaciona con  $\tau_{dom}$

$$\omega_B = \frac{1}{\tau_{dom}}$$

Un criterio que se puede utilizar es que:

$$\omega_n > \alpha * \omega_B$$

Donde  $\alpha$  es un entero múltiplo del ancho de banda, que nos lleva:

$$T_{muestreo} \leq \frac{\pi}{\alpha} \tau_{dom}$$

Donde:

$\alpha$  = Coeficiente = 1, 2, 3, 4, etc.

$\alpha$	$\tau_{dom}$	$\pi$	$T_{muestreo}$
2	1900	3,14159	2985
2	1500	3,14159	2356
2	1340	3,14159	2105
2	1055	3,14159	1657

**Tabla 5 –Valores de  $T_{muestreo}$  para  $\alpha=2$**

### 3.2.3. Selección del tiempo de muestreo a utilizarse.

En la sección anterior se determinó diferentes valores de tiempo de muestreo máximo, dependiendo de los valores de  $\alpha$  y  $\tau_{dom}$  asignados. Para la selección de un periodo de muestreo adecuado debe tenerse las siguientes consideraciones:

- ✓ La señal de entrada a utilizarse es una multiseno, por tanto el tiempo de muestreo que se considere indicara el tiempo de cambio de la señal. Dado que la dinámica de nuestra planta es lenta, el valor de  $T_{muestreo}$  debe ser lo suficientemente generosa para poder evaluar la respuesta.

- ✓ Como  $\alpha$  mide cuanto más rápida es la respuesta en lazo cerrado en comparación con la de lazo abierto. Asumiremos que la respuesta de la planta en lazo cerrado es dos veces más rápida que en lazo abierto por esa razón tenemos que  $\alpha = 2$ .
- ✓ El tiempo de muestreo de la señal multiseno, no representa necesariamente, el tiempo de muestreo en la adquisición de datos al realizar las pruebas.

### 3.2.4. Diseño de la señal de entrada.

A continuación se muestra una tabla que indica las características de varias señales multiseno, que han sido consideradas en el proceso de diseño de la señal de entrada.

Prueba	$\tau_{dom}^L$ [seg]	$\tau_{dom}^H$ [seg]	$T_{muestreo}^{max}$ $\left(\frac{\pi}{\alpha} \tau_{dom}^L\right)$	Tiempo de cambio [seg]	# de ciclos	# de sinusoi des	Duración de la prueba [seg]
1	950	2000	1492	600	2	25	76800
2	950	2400	1492	1200	1	10	45600
3	1500	2400	2352	1200	1	10	45600
4	1500	2400	2352	1800	1	10	46800
5	2000	2300	3142	2700	1	6	48600

**Tabla 6 – Varias señales Multiseno**

De manera general se mantuvo las siguientes características para las 5 pruebas realizada:

Amplitud de la señal = 0.4

Bias = 0.6

$$\alpha_s = 2$$

$$\beta_s = 3$$

A partir de esta información se tiene lo siguiente:

- ✓ Prueba 1: Los valores de  $\tau_{dom}^H$  y  $\tau_{dom}^L$  fueron seleccionados alrededor de las constantes de tiempo especificadas en la Tabla 4. El tiempo de cambio de la señal se tomó en base al periodo de trabajo de la válvula solenoide. El tiempo de muestreo del dispositivo de adquisición de datos se fijó en 20 seg. Resultado: La respuesta al paso obtenida desde esta prueba es completamente diferente a las obtenidas desde la planta. Existe mucha varianza en los valores adquiridos debido a un bajo periodo de muestreo.
- ✓ Prueba 2 y 3: Los valores de  $\tau_{dom}^H$  y  $\tau_{dom}^L$  fueron incrementados respectivamente. El tiempo de cambio de la señal se modificó en base a la dinámica de la planta. El tiempo de muestreo del dispositivo de adquisición de datos se fijó en 40 seg. Resultados: El valor de estado estable está fuera de rango de temperatura de la planta. Está por debajo del límite inferior de temperatura. Al incrementar el tiempo de muestreo la varianza de los datos disminuyó considerablemente.
- ✓ Prueba 4: Se incrementó el valor de  $\tau_{dom}^L$  para poder aumentar el tiempo de cambio de la señal, aproximándolo a  $\tau_{dom}$  a 20% de apertura de la válvula (máxima

constante de tiempo). El tiempo de muestreo del dispositivo de adquisición de datos se fijo en 40 seg. Resultado: Buena aproximación a la respuesta al escalón obtenida desde la planta. Existe un poco de varianza en los datos.

- ✓ Prueba 5: Se ajustó los valores de  $\tau_{dom}^H$ ,  $\tau_{dom}^L$  y tiempo de cambio, aproximándolo a  $\tau$  a 20% de apertura de la válvula (máxima constante de tiempo). El tiempo de muestreo del dispositivo de adquisición de datos se fijo en 40 seg. Resultado: Muy buena aproximación a la respuesta al escalón obtenida desde la planta.

Para conseguir la respuesta al escalón de los datos de cada una de las pruebas, se ejecuta el siguiente comando en MATLAB:

```
>> step(prueba#)
```

El siguiente paso es realizar el análisis de correlación para determinar la respuesta impulso y obtener información sobre la covarianza y la correlación; se ejecuta el comando en MATLAB:

```
>> cra(prueba#,10,20,2)
```

A partir de esto se tiene que:

- ✓ Para todas las pruebas la covarianza de la entrada pre-blanqueada contiene un solo pico en el lag cero, lo que confirma que es una forma de ruido blanco.
- ✓ No existe correlación entre la entrada y la salida.

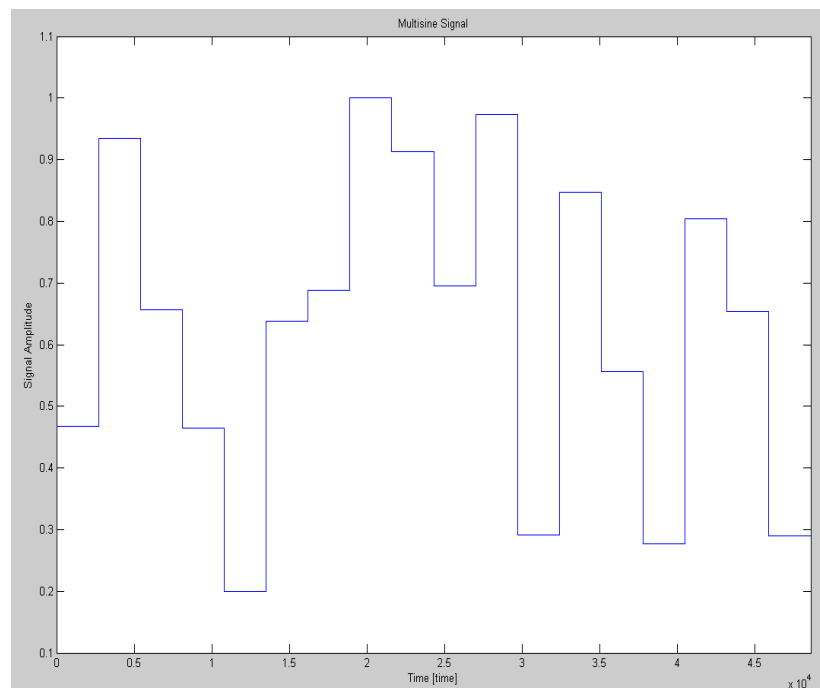


Basado en el análisis anterior la prueba seleccionada para el proceso de identificación fue la número cinco:

Prueba	$\tau_{dom}^L$ [seg]	$\tau_{dom}^H$ [seg]	$T_{muestreo}^{max}$	Tiempo de cambio [seg]	# de ciclos	# de sinusoides	Duración de la prueba [seg]
5	2000	2300	3142	2700	1	6	48600

**Tabla 7 – Señal Multiseno Seleccionada**

**Serie de Tiempo:**



**Figura 34 – Señal Multiseno seleccionada.**

### Característica de la señal Multiseno:

<b>Multisine Design &amp; Analysis Table</b>	
<b>General Signal Specs</b>	
Sampling Time	2700.000000
Initial Deadtime	0.000000
Final Deadtime	0.000000
Signal Amplitude	0.400000
Signal Bias	0.600000
<b>Guideline Information</b>	
Hi Freq. Decision Alpha	2.000000
Lo Freq. Decision Beta	3.000000
Lo Estimate of Dominant Time Constant	2000.000000
Hi Estimate of Dominant Time Constant	2300.000000
User limit on number of sinusoids	7.000000
Maximum Allowable Sampling Time	3141.592654
Low Frequency Design Limit [rad/time]	0.000145
High Frequency Design Limit [rad/time]	0.001000
Limit on the number of sinusoids	9.000000
Limit on sequence length	18.000000
<b>Signal Design</b>	
Sampling Time	2700.000000
Number of Cycles	1.000000
Number of Sinusoids	9.000000
Sequence Length	18.000000

**Figura 35 – Característica de la señal de entrada.**

# CAPITULO 4

## PROCESO DE IDENTIFICACIÓN

### 4.1 Herramientas para el proceso:

La perspectiva de este capítulo es obtener un modelo matemático que represente el sistema real. Para esto se usan las técnicas de identificación estudiadas en el capítulo 2.

La herramienta principal en este proceso es la toolbox System identification (IDENT) de MATLAB, una interfaz desarrollada para construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada-salida.

Se ejecuta el comando en la ventana de Command Window:

```
>> ident
```

Se abrirá el siguiente entorno de trabajo:

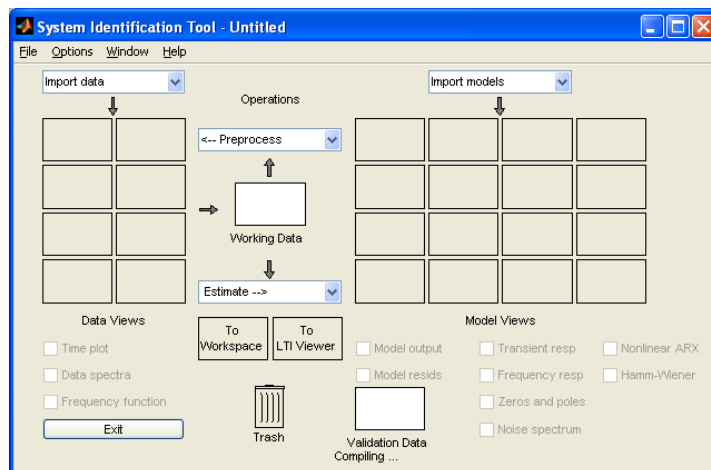


Figura 36 –Interfaz de la herramienta System Identification.

## 4.2 Adquisición de datos y tratamiento de las señales.

Para el proceso de adquisición de datos se ha desarrollado un programa en SIMULINK - MATLAB, el dispositivo de adquisición de datos es la USB-6009 de NI-Instrument, (En el Anexo B se encuentra información sobre el funcionamiento de la USB-6009 con simulink).

A continuación se muestra la ventana de dicho programa:

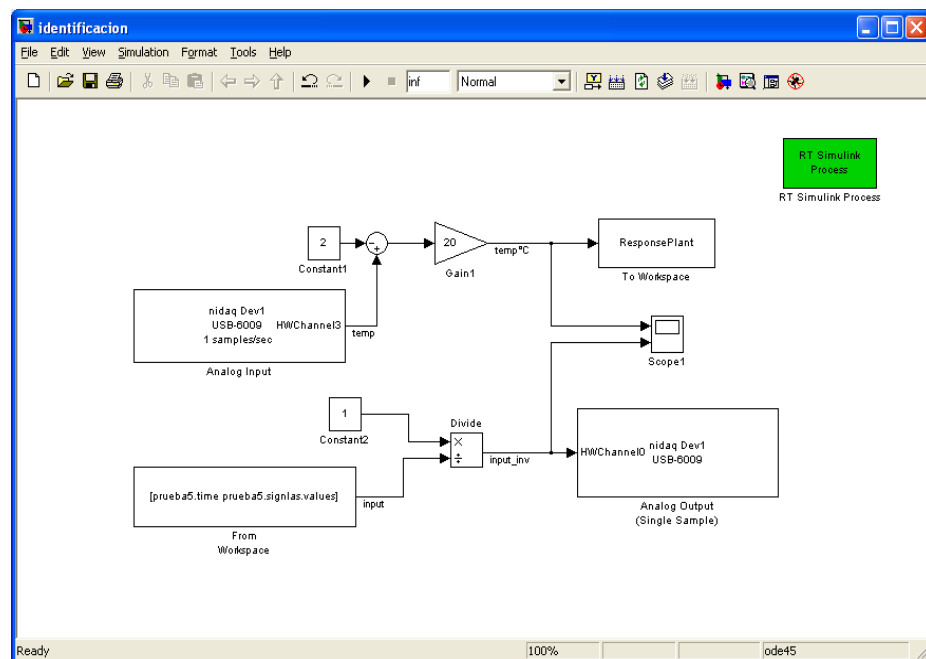


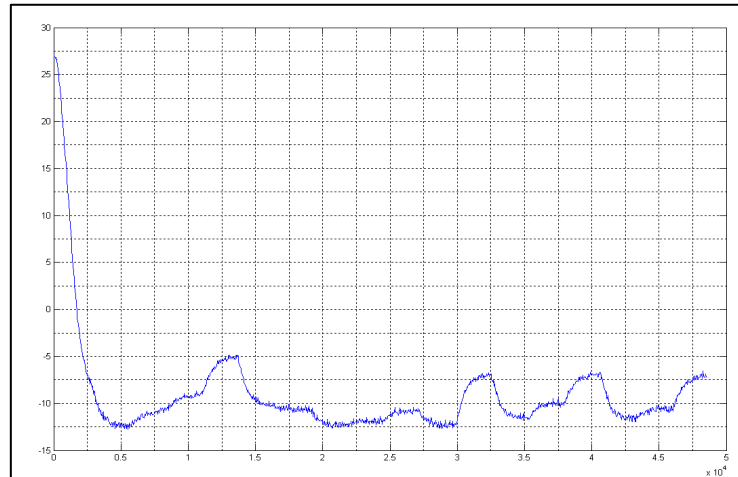
Figura 37 – Adquisición de datos.

La señal adquirida es una señal electrónica de 0 a 5 voltios, que representa el rango de temperatura enviada por el sensor, que va desde -40 hasta 60°C, relacionados por la ecuación:

$$T_{\circ C} = 20T_{0-5} - 40$$

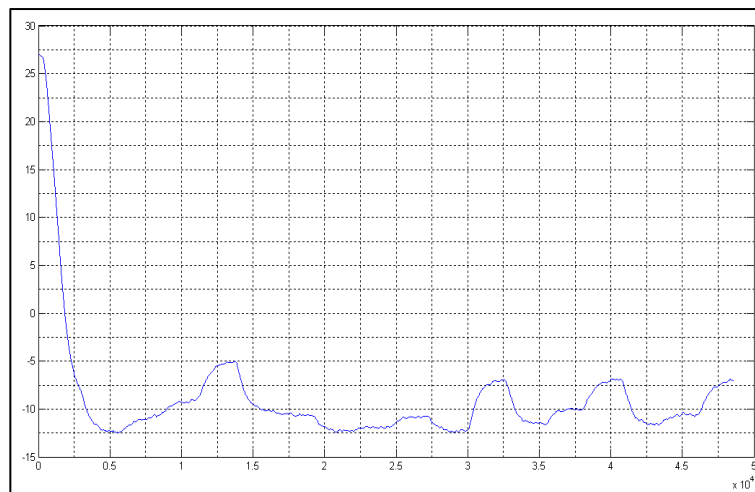
La señal diseñada en el capítulo anterior representa el inverso del porcentaje de apertura de la válvula.

En la figura siguiente se muestra el resultado de la prueba:



**Figura 38 – Respuesta de la planta.**

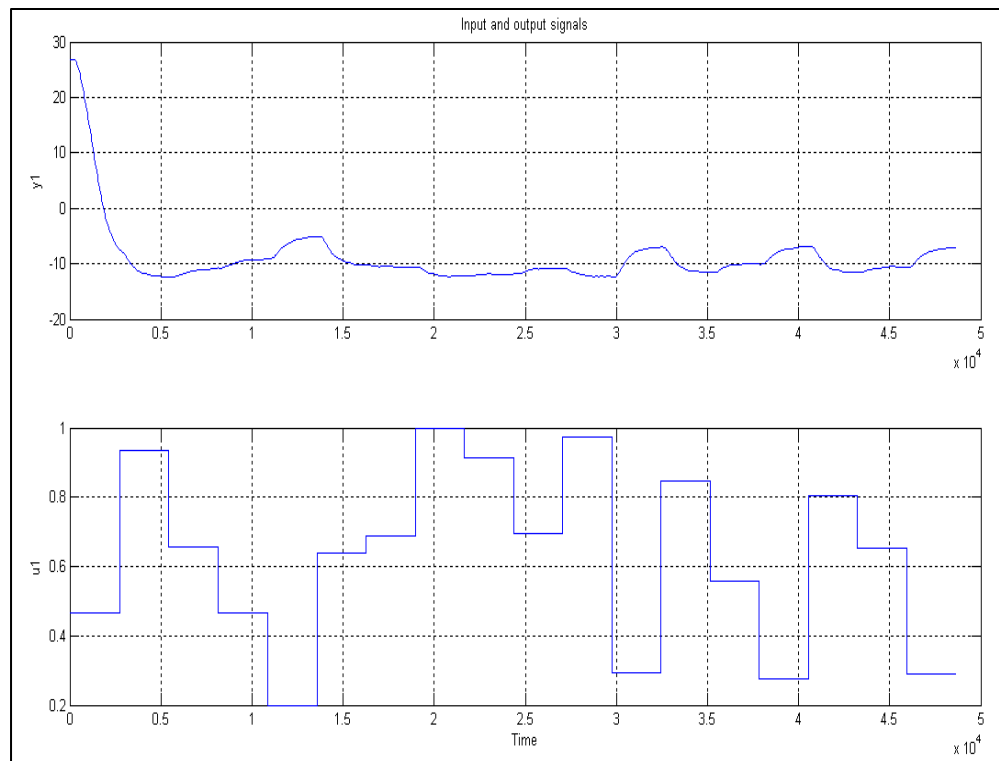
Se puede observar que dicha señal contiene mucha variación debido a la presencia de ruido. No es una señal apta para el proceso de identificación, por esta razón hubo que filtrar esta información. Para ello se utilizó en SIMULINK un Filtro discreto pasa-bajo, con una frecuencia de corte de 0.002 Hz. En la figura se muestra el resultado:



**Figura 39 – Respuesta de la planta filtrada**

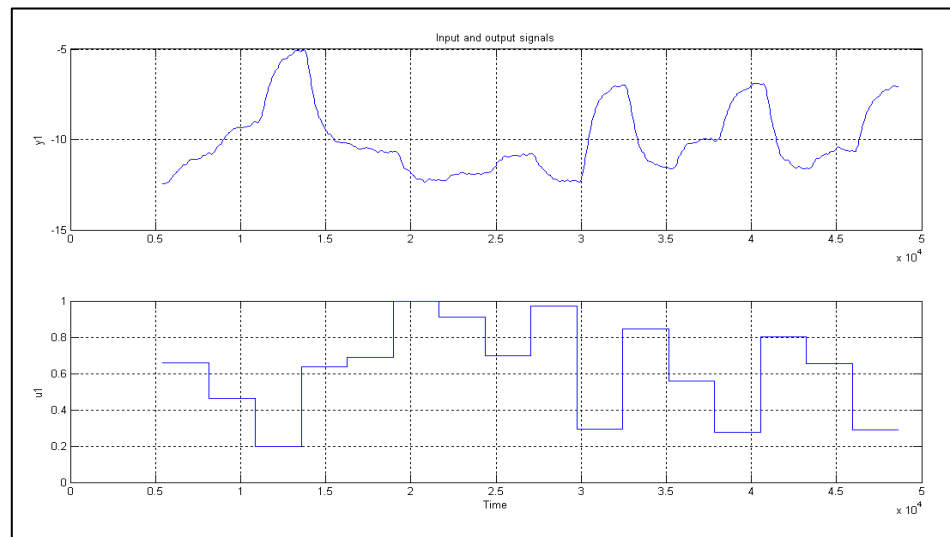
### 4.3 Selección de los datos para el proceso de identificación:

En la figura se ilustra la señal de entrada  $u_1$  y la respuesta de la planta  $y_1$ .



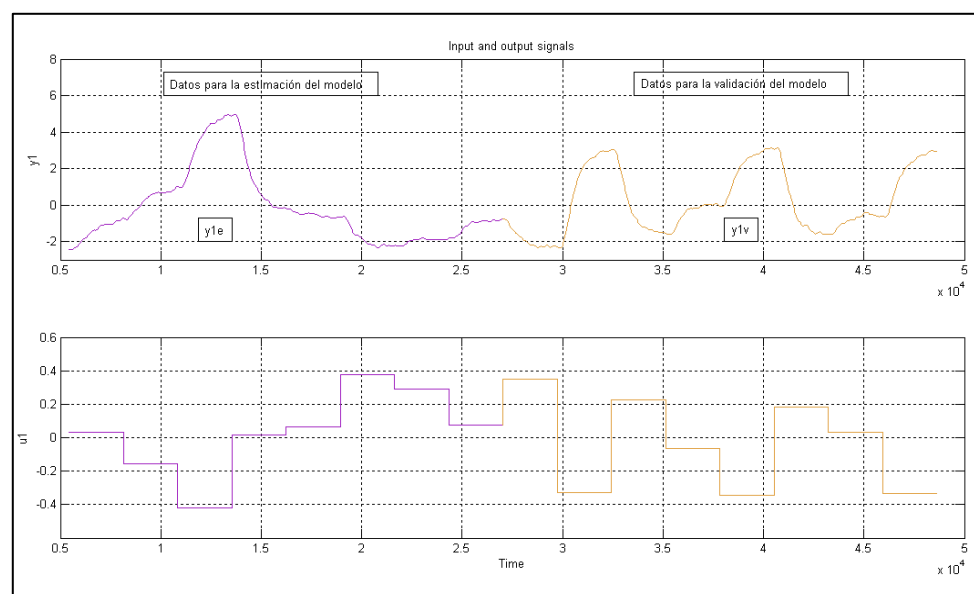
**Figura 40 – Señales de entrada y salida.**

El primer paso es eliminar los datos aberrantes, es decir, descartar aquella información que no es útil para el proceso de identificación. Dentro de este concepto se encuentra el periodo de tiempo que va desde el encendido de planta a temperatura ambiente hasta que la temperatura de la cámara descienda a la máxima de funcionamiento, esto es  $-5.2^{\circ}\text{C}$ . Por tanto se selecciona el rango desde 5440 seg hasta el final de la prueba en 48600 seg.



**Figura 41 – Selección de rango de la muestra.**

El siguiente paso es eliminar medias y seleccionar el rango de la muestra para el proceso de estimación del modelo y para la validación. En la figura se ilustra este proceso: La señal  $y1$  está compuesta por 1080 muestras. Se han escogido 540 datos, para la estimación del modelo ( $y1e$ ) y 540 datos para la validación ( $y1v$ ).



**Figura 42 – Datos seleccionado para el proceso de identificación.**

#### 4.4 Identificación Paramétrica:

El siguiente paso es la identificación como tal, con la ayuda de la IDENT se buscará el modelo que mejor represente a nuestra planta. Recordando del capítulo 2, la ecuación general de los modelos paramétrico es:

$$A(z)y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - n_k) + \frac{C(z)}{D(z)}e(t)$$

Donde A, B, C, D y F son polinomios en Z y  $n_k$  indica el retardo.

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$$

$$B(z) = b_1 + b_2z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b+1}$$

$$C(z) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}$$

$$D(z) = 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_{n_d}z^{-n_d}$$

$$F(z) = 1 + f_1z^{-1} + \dots + a_{n_f}z^{-n_f}$$

La siguiente tabla sintetiza esta información:

<i>Variable</i>	<i>Significado</i>
$n_a$	Número de polos comunes
$n_b$	Número de ceros +1 de la función
$n_c$	Número de ceros de la señal de ruido
$n_d$	Número de polos de la señal de ruido
$n_e$	Número de polos de la función
$n_k$	Retardo

**Tabla 8 – Variables en la IDENT**



#### 4.5 Modelo ARX:

El primer modelo a analizar será el ARX, a continuación se muestra la interfaz de la IDENT y una tabla comparativa de modelos estimado de acuerdo a esta estructura.

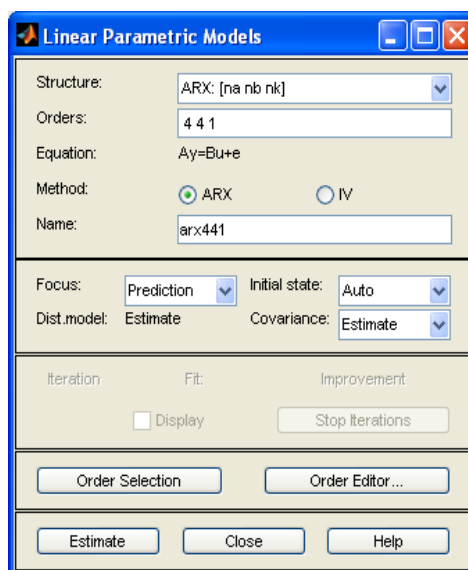


Figura 43 – Linear Parametric Models - ARX

<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>	<i>Características</i>
arx1023	76.11%	Correlación cruzada residual excede intervalos de confianza
arx1022	75.95%	Correlación cruzada residual excede intervalos de confianza
arx822	75.5%	Correlación cruzada y Auto correlación residual excede intervalos de confianza
arx633	75.05%	Correlación cruzada y Auto correlación residual excede intervalos de confianza
arx1043	74.97%	Correlación cruzada residual excede intervalos de confianza

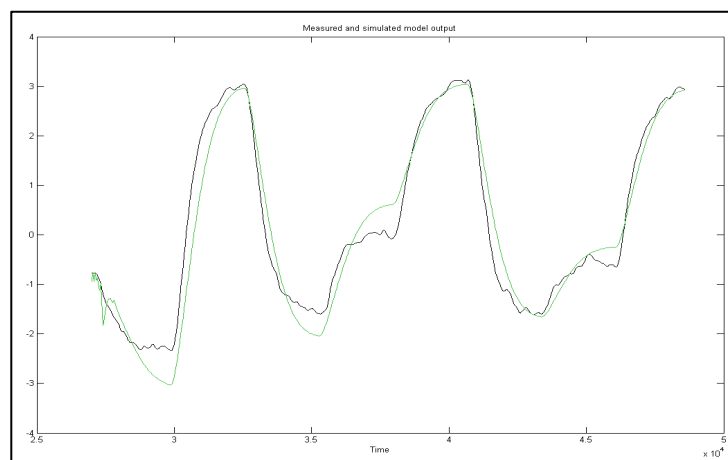
Tabla 9 – Modelos obtenidas con la estructura ARX

Modelo escogido a partir de la identificación.

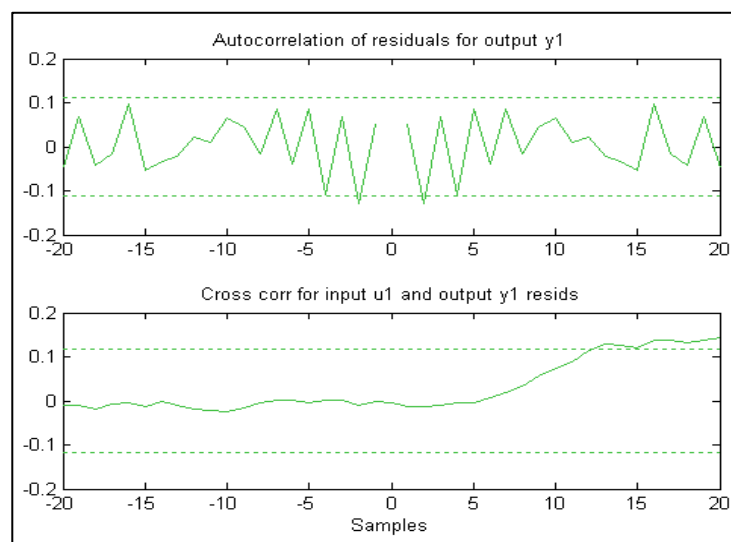
<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>
arx1023	76.11%

**Tabla 10 – Modelo ARX seleccionado**

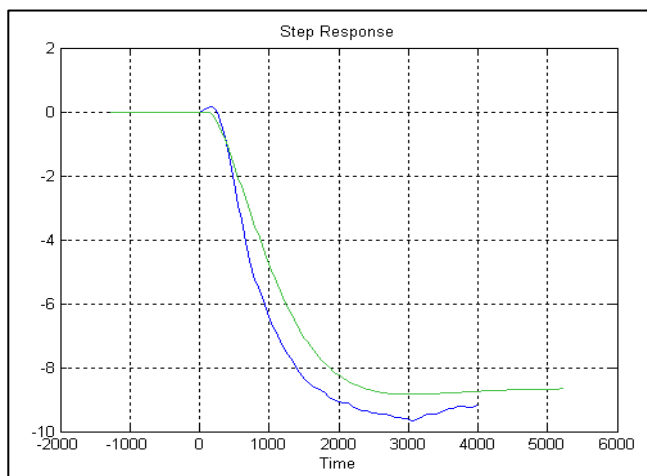
A continuación se muestran las graficas obtenidas por el modelo:



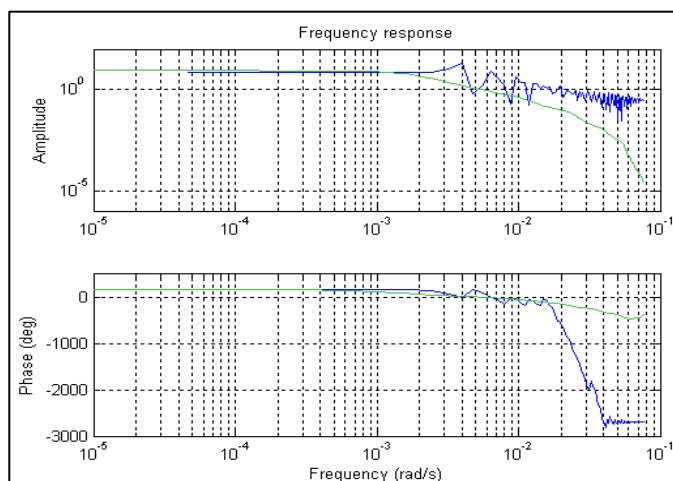
**Figura 44 – Simulación del modelo con los datos de validación.**



**Figura 45 – Análisis Residual ARX1023.**



**Figura 46 – Respuesta al step del Modelo ARX1023 Vs CRA**



**Figura 47 – Respuesta de frecuencia del Modelo ARX1023 Vs SPA**

- ✓ Análisis Residual: No existe auto correlación residual para la salida, los valores están dentro de los márgenes de confianza. Existen correlación entre los residuos de la entrada y la salida
- ✓ Respuesta al step: Es completamente diferente comparada con la obtenida desde el CRA.
- ✓ Respuesta de frecuencia: No es muy buena aproximación de la respuesta de frecuencia comparada con el SPA.

#### 4.6 Modelo ARMAX:

El siguiente modelo a analizar será el ARMAX, a continuación se muestra la interfaz de la IDENT y una tabla comparativa de modelos estimado de acuerdo a esta estructura.

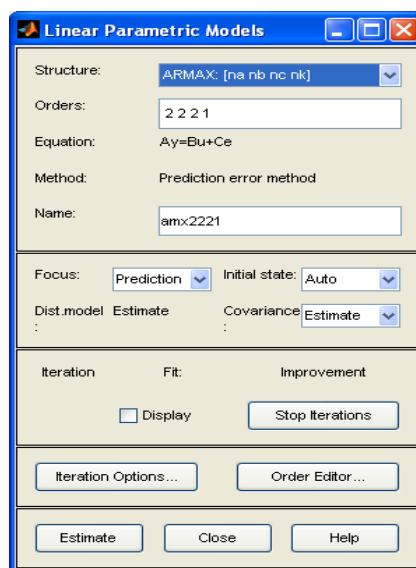


Figura 48 – Linear Parametric Models - ARMAX

<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>	<i>Características</i>
armax4352	84.24%	Auto Correlación residual excede intervalos de confianza
armax4362	83.64%	Auto Correlación residual excede intervalos de confianza.
armax7551	85.65%	Auto Correlación residual excede intervalos de confianza en varios puntos.
armax7652	85.48%	Muy buena aproximación. Residuos dentro de los límites de confianza.
armax7862	83.64%	Auto correlación y Correlación cruzada excede intervalos de confianza

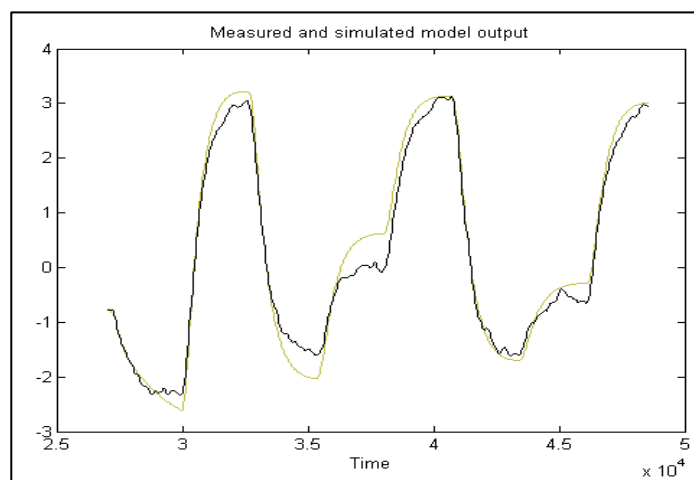
Tabla 11 – Modelos obtenidas con la estructura ARMAX

Modelo escogido a partir de la identificación.

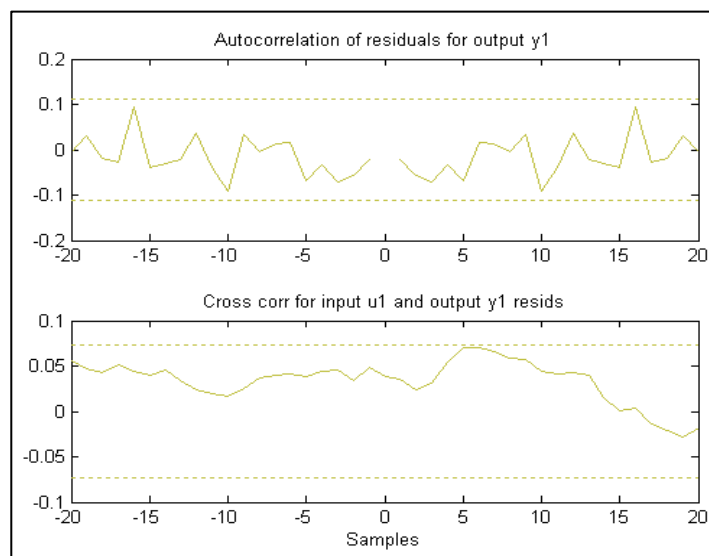
<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>
armax7652	85.48%

**Tabla 12 – Modelo ARMAX seleccionado**

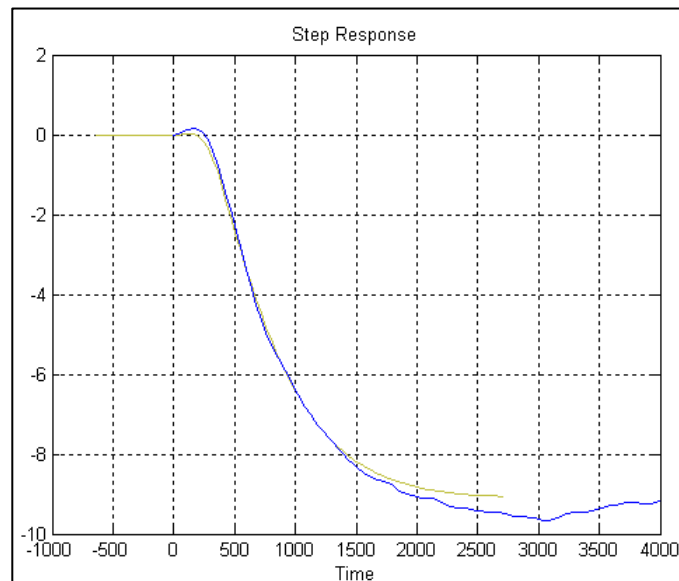
A continuación se muestran las graficas obtenidas por el modelo:



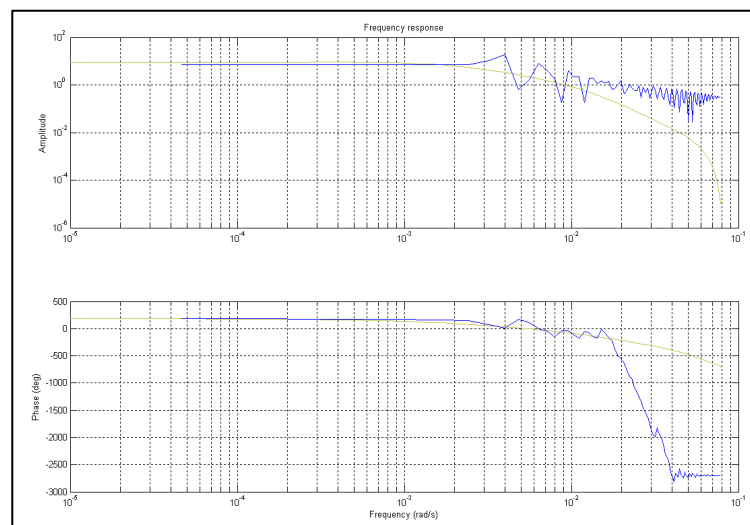
**Figura 49 – Simulación del modelo con los datos de validación.**



**Figura 50 – Análisis Residual AMX7652.**



**Figura 51 – Respuesta al step del Modelo AMX7652 Vs CRA**



**Figura 52 – Respuesta de frecuencia del Modelo AMX7652 Vs SPA**

- ✓ Análisis Residual: Todos los valores están dentro de los márgenes de confianza.
- ✓ Respuesta al step: Tiene una muy buena aproximación comparada con la obtenida desde el CRA.
- ✓ Respuesta de frecuencia: Es buena aproximación de la respuesta de frecuencia comparada con el SPA.

#### 4.7 Modelo ERROR DE SALIDA:

El siguiente modelo a analizar será el OE, a continuación se muestra la interfaz de la IDENT y una tabla comparativa de modelos estimado de acuerdo a esta estructura.

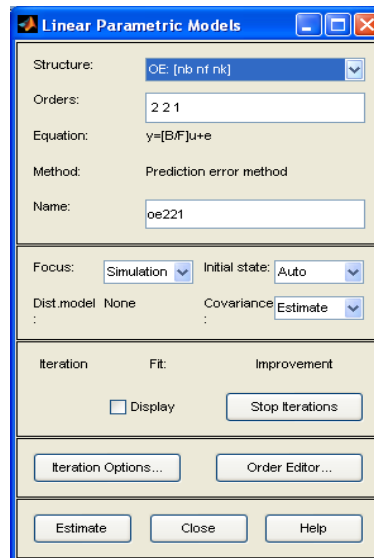


Figura 53 – Linear Parametric Models - OE

<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>	<i>Características</i>
oe222	78.04%	Correlación Cruzada es nula. No posee buena respuesta al step y frecuencial
oe252	78.52%	Correlación Cruzada es nula. No posee buena respuesta al step y frecuencial
oe432	80.81%	Correlación Cruzada es nula. No posee buena respuesta al step.
oe1022	80.80%	Correlación Cruzada residual es nula. No posee buena respuesta al step y frecuencial
oe1522	80.05%	Correlación Cruzada es nula. No posee buena respuesta al step y frecuencial

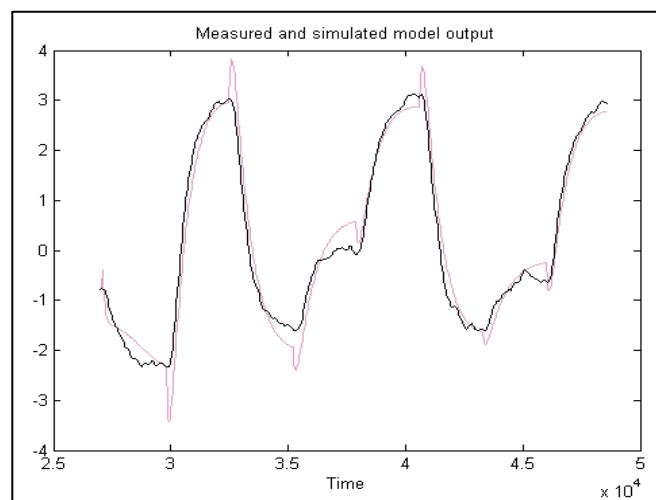
Tabla 13 – Modelos obtenidas con la estructura OE

Modelo escogido a partir de la identificación.

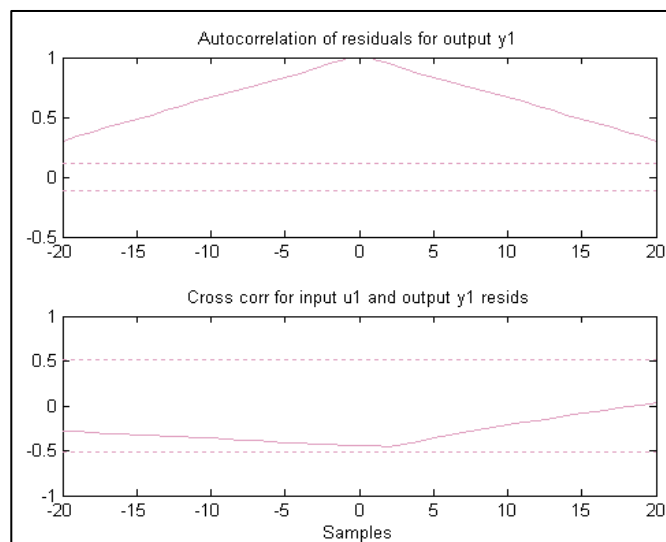
<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>
oe432	80.81%

**Tabla 14 – Modelo OE seleccionado**

A continuación se muestran las graficas obtenidas por el modelo:

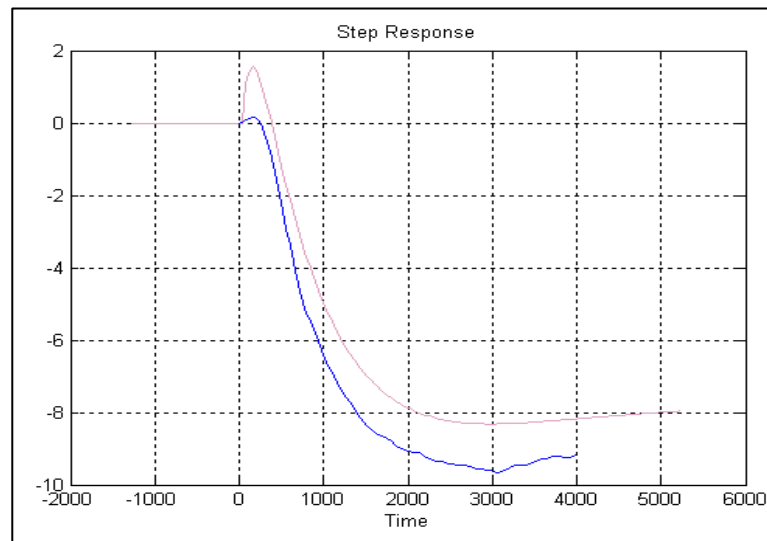


**Figura 54 – Simulación del modelo con los datos de validación.**

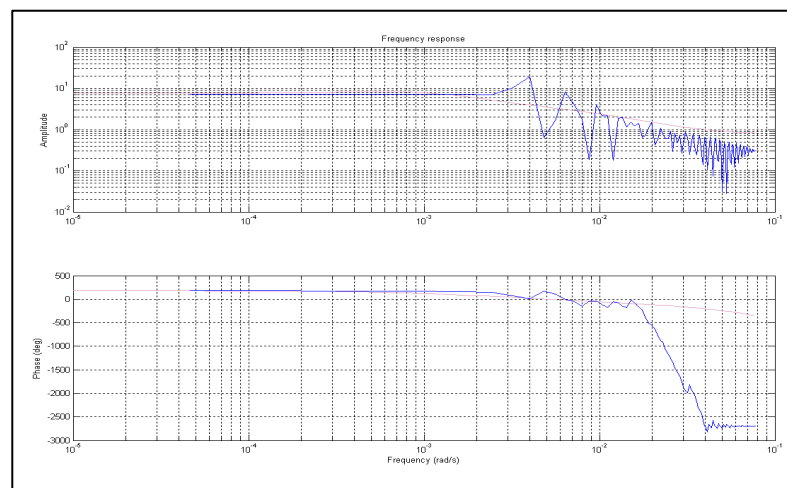


**Figura 55 – Análisis Residual OE432.**





**Figura 56 – Respuesta al step del Modelo OE432 Vs CRA**



**Figura 57 – Respuesta de frecuencia del Modelo OE432 Vs SPA**

- ✓ Análisis Residual: Los valores están dentro de los márgenes de confianza para la correlación cruzada. Para este modelo no se estima el modelo de auto correlación.
- ✓ Respuesta al step: No Tiene una muy buena aproximación comparada con la obtenida desde el CRA.
- ✓ Respuesta de frecuencia: Es buena aproximación de la respuesta de frecuencia comparada con el SPA.

#### 4.8 Modelo BOX-JENKIS:

El siguiente modelo a analizar será el OE, a continuación se muestra la interfaz de la IDENT y una tabla comparativa de modelos estimado de acuerdo a esta estructura.

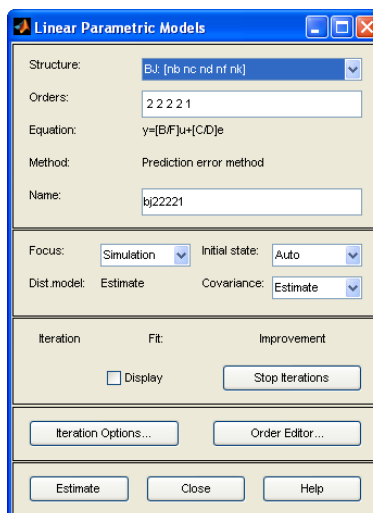


Figura 58 – Linear Parametric Models – B-J

<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>	<i>Características</i>
bj42323	80.07%	Correlación Cruzada excede intervalos de confianza. No posee buena respuesta al step
bj54222	79.67%	Auto Correlación y Correlación Cruzada excede intervalos de confianza. No posee buena respuesta al step y frecuencial
bj56321	78.95%	Correlación Cruzada excede intervalos de confianza. No posee buena respuesta al step y frecuencial
bj58423	80.31%	Correlación Cruzada excede intervalos de confianza. No posee buena respuesta al step y frecuencial
bj75323	80.05%	Correlación Cruzada excede intervalos de confianza. No posee buena respuesta al step y frecuencial

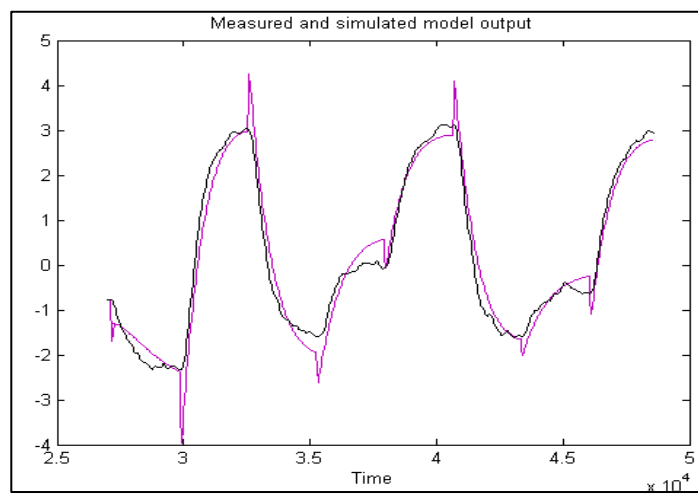
Tabla 15 – Modelos obtenidas con la estructura B-J

Modelo escogido a partir de la identificación.

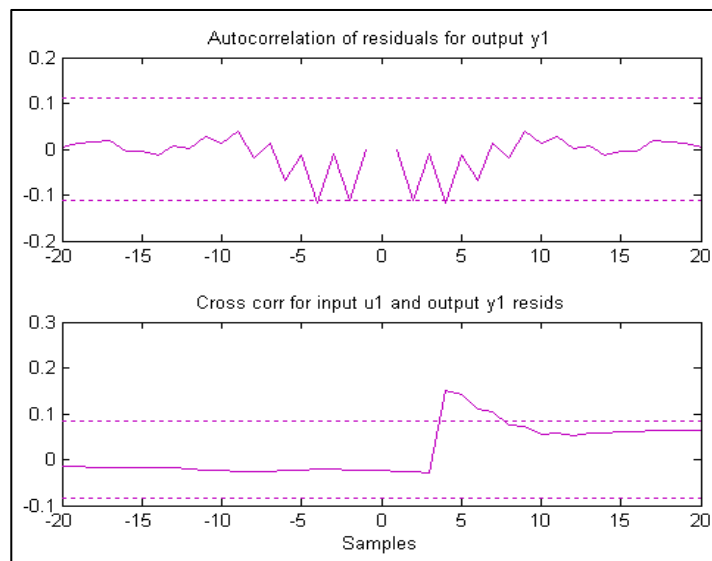
<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>
bj42323	80.07%

**Tabla 16 – Modelo B-J seleccionado**

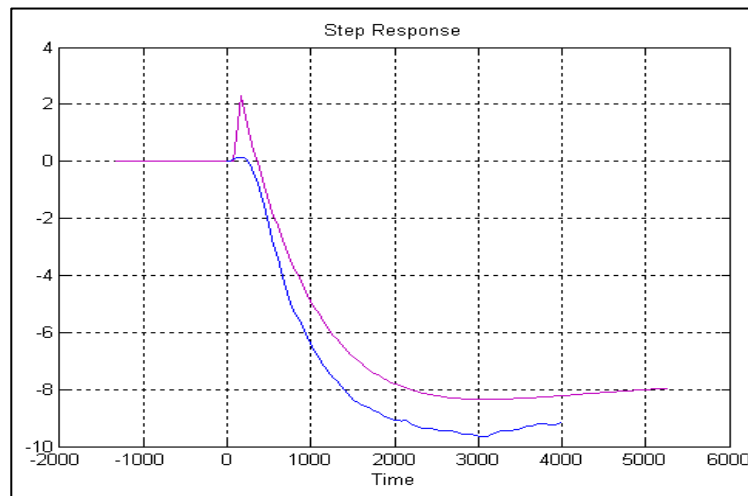
A continuación se muestran las graficas obtenidas por el modelo:



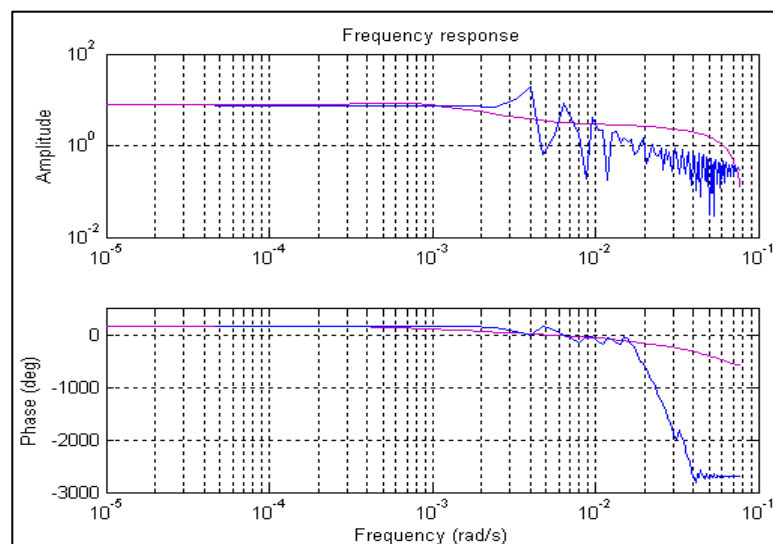
**Figura 59 – Simulación del modelo con los datos de validación.**



**Figura 60 – Análisis Residual BJ42323.**



**Figura 61 – Respuesta al step del Modelo BJ42323Vs CRA**



**Figura 62 – Respuesta de frecuencia del Modelo BJ42323Vs SPA**

- ✓ Análisis Residual: No existe auto correlación residual para la salida, los valores están dentro de los márgenes de confianza. Existen correlación entre los residuos de la entrada y la salida
- ✓ Respuesta al step: Es completamente diferente comparada con la obtenida desde el CRA.
- ✓ Respuesta de frecuencia: Se asemeja a la respuesta de frecuencia comparada con el SPA.

#### 4.9 Análisis de Resultados:

En la tabla siguiente se describen los mejores resultados obtenidos con las cuatros estructuras analizadas. De aquí se elige la respuesta que mejor represente a nuestra planta:

<i>Nombre del Modelo</i>	<i>Aprox</i>
arx1023	76.11%
armax7652	85.48%
oe432	80.81%
bj42323	80.07%

**Tabla 17 – Modelos seleccionados a partir de la identificación paramétrica.**

Cada una de los modelos de la tabla fueron estudiados individualmente en las secciones anteriores. De allí se puede concluir que el modelo armax7652 es el más apropiado.

#### 4.10 Obtención de la función de transferencia del modelo:

El modelo obtenido desde la IDENT es de la forma:

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - n_k) + C(z)e(t)$$

Ahora se busca mediante MATLAB, encontrar la función de transferencia de la planta; para esto se debe obtener los valores de B y A. Además, como la identificación nos dio un modelo discreto debe ser llevado a tiempo continuo. Se ejecuta las líneas de código:

```
>> PlantLap=d2c(amx7652)
>> [A,B,C]=polydata(PlantLap)
>> G=tf(B,A)
```

Esto nos deja como resultado:

$$\frac{Y_s}{U_s} = \frac{-1.256 * 10^{-4} s^6 + 1.75 * 10^{-6} s^5 + 1.419 * 10^{-7} s^4 - 2.5 * 10^{-8} s^3 + 2.812 * 10^{-9} s^2 - 6.918 * 10^{-11} s - 0.238 * 10^{-14}}{s^7 + 0.0676 s^6 + 4.869 * 10^{-3} s^5 + 1.096 * 10^{-4} s^4 + 1.37 * 10^{-6} s^3 + 6.695 * 10^{-9} s^2 + 1.029 * 10^{-11} s + 3.677 * 10^{-15}}$$

#### 4.11 Simulación del Modelo.

La función de transferencia obtenida en la sección anterior modela el comportamiento de nuestra planta, sin embargo, no dentro del rango de funcionamiento de la misma. Esto se debe a que durante el tratamiento de las señales previo a la identificación paramétrica, se removi6 la media del conjunto de datos, por esta raz6n, se debe compensar el modelo conseguido desde la identificaci6n.

El rango de temperatura va desde -5 a -12 6C, cuya media es -96C. El rango de control para el porcentaje de apertura de la v6lvula va desde 0.2 a 1, cuya media es 0.6. Por tanto, se debe restar a la se6al de entrada 0.6 y a la respuesta del modelo 96C.

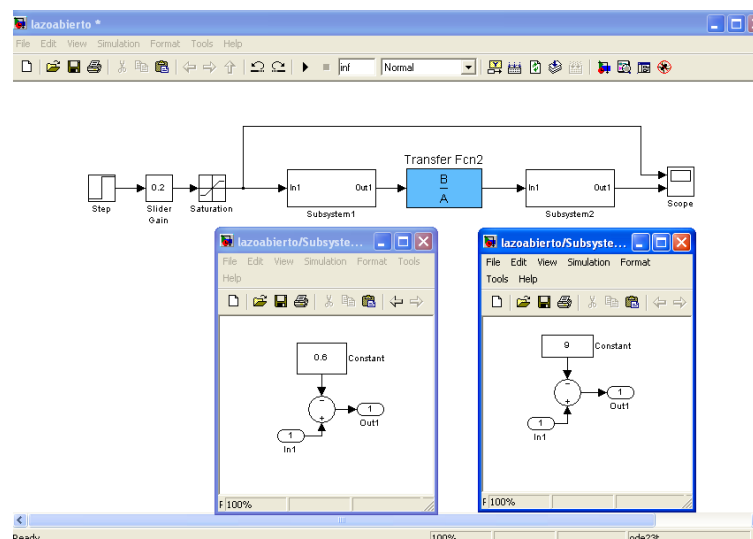
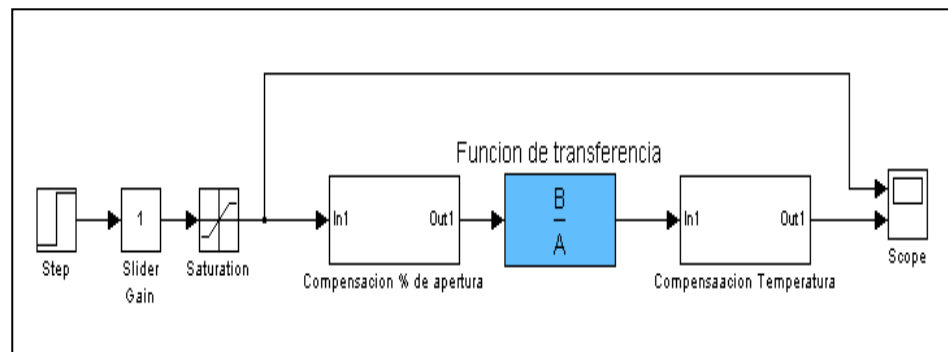
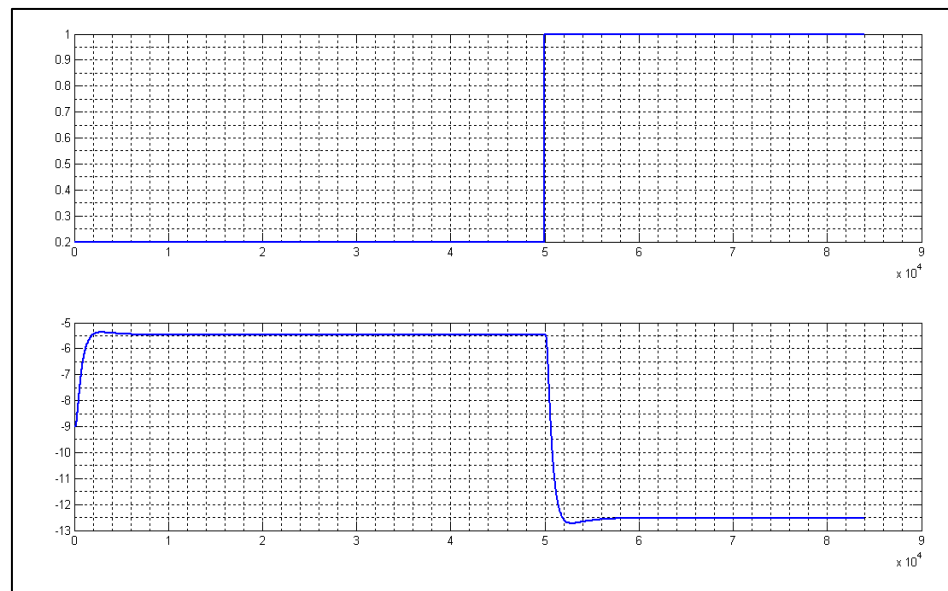


Figura 63 – Compensaci6n del modelo.



**Figura 64 – Simulación en lazo abierto de la planta.**



**Figura 65 – Resultado de la simulación.**

# CAPITULO 5

## DISEÑO DEL CONTROLADOR

### 5.1. Proceso de Diseño

El enfoque de este capítulo es diseñar un adecuado controlador que permita mejorar el funcionamiento de nuestro sistema.

Para ello partimos del modelo matemático estimado en el capítulo anterior, y mediante la herramienta SISOTOOL de MATLAB se proyecta hallar un controlador PID que permita alcanzar nuestro objetivo.

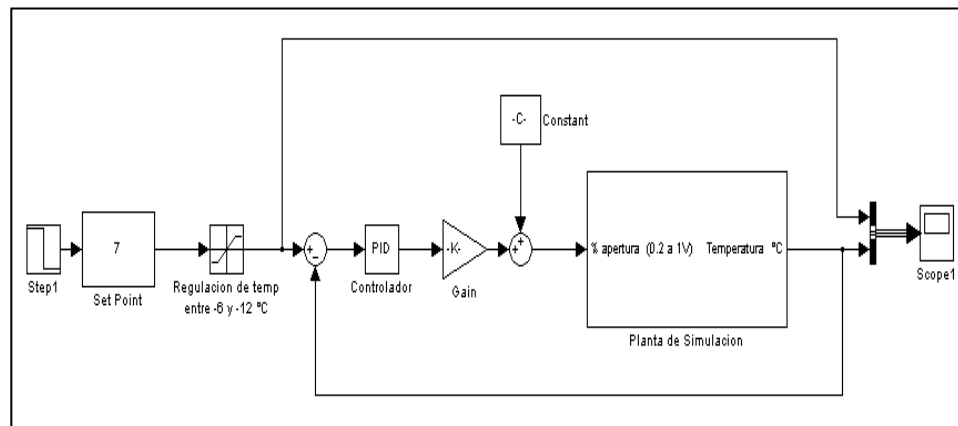
Dicho controlador será implementado en el sistema real y se juzgará su comportamiento; para de esta manera, modificar los parámetros estimados en caso de ser necesario.

### 5.2. Planta de Simulación en lazo cerrado.

Llamaremos como Planta de Simulación al modelo obtenido en el proceso de identificación.

Esta planta, recibe una señal entre 0.2 [V] y 1 [V], que está relacionado con el inverso del porcentaje de apertura de la válvula del sistema de expansión. La salida es Temperatura en °C, debemos recordar que el rango de control para la planta real se encuentra entre -6 y -12 °C. En la figura siguiente se ilustra el sistema de lazo cerrado con controlador.





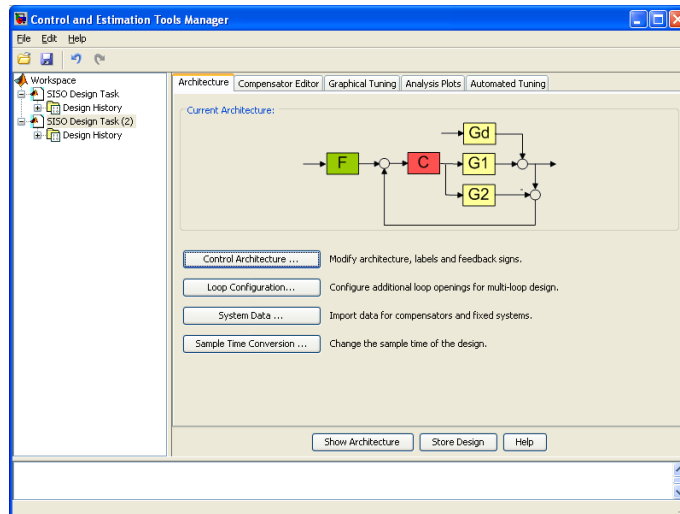
**Figura 66 – Esquema en lazo cerrado de la Planta de Simulación.**

Se persigue manipular la temperatura a la salida de la planta, el controlador se ha ubicado de tal manera que realice una regulación de temperatura hasta alcanzar el valor de set point establecido, por tanto a la salida de éste debe existir un bloque que relacione Temperatura con el inverso de porcentaje de apertura. Dicha relación viene dada por la siguiente ecuación, que ha sido determinada a partir de las respuestas al escalón de la planta real, para porcentajes de apertura de la válvula a 20 y 100% (véase tabla4):

$$\%apert = -0.1096 * T[^{\circ}C] - 0.3698$$

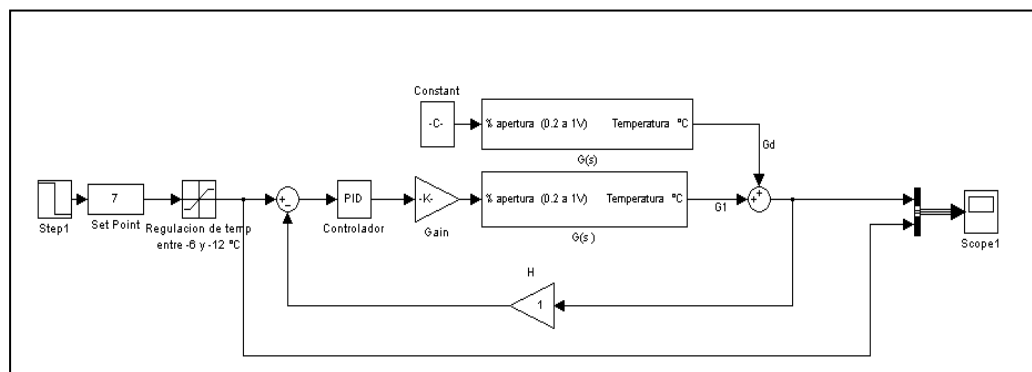
### 5.3. Determinación de las constantes del PID.

Para determinar los valores de las constantes de controlador, se ha trabajado en la herramienta SISOTOOL de MATLAB. Que es una interfaz de fácil manejo, debido a que es un entorno gráfico que permite diseñar controladores PID, ya sea a través de prueba y error, por medio de agregar polos, ceros al sistema, cambiando su ganancia a través de la trayectoria de la raíces; o por algoritmos específicos.



**Figura 67 – Sisotool de Matlab.**

Para adaptar nuestro modelo a la arquitectura dada por la SISOTOOL se ha modificado el diagrama en lazo cerrado de la siguiente manera:



**Figura 68 – Esquema en Lazo Cerrado.**

De allí tenemos que:

$$G1 = k * G$$

$$G2 = 0$$

$$Gd = c * G$$

$$F = 1$$

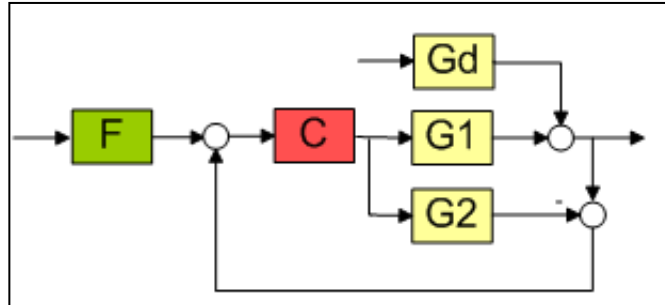


Figura 69 – Arquitectura de control de la SISOTOOL a utilizarse.

Esta aplicación es muy versátil, nos brinda la facilidad de ajustar un controlador de manera automática, basados en ciertos algoritmos de diseño. También permite mejorar dicho controlador, de acuerdo a nuestros requerimientos.

En la pestaña de automated tuning, mediante el algoritmo de ajuste de Ziegler-Nichols closed loop, se obtuvo el siguiente controlador:

$$C1(s) = 0.0062934 \frac{(1 + 70s)(1 + 410s)}{s}$$

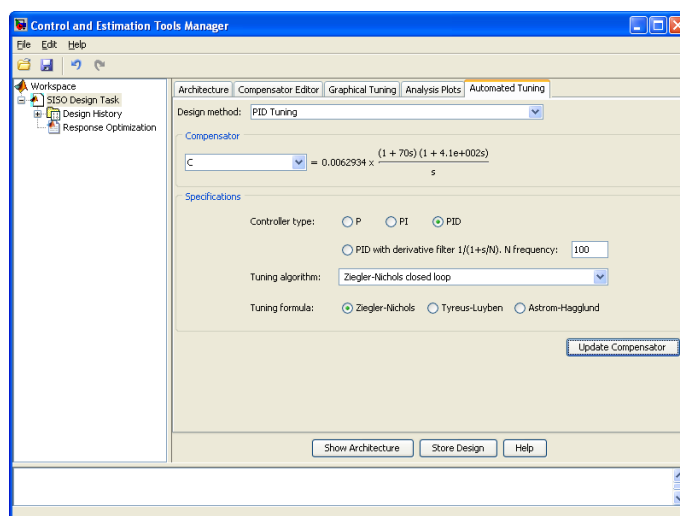
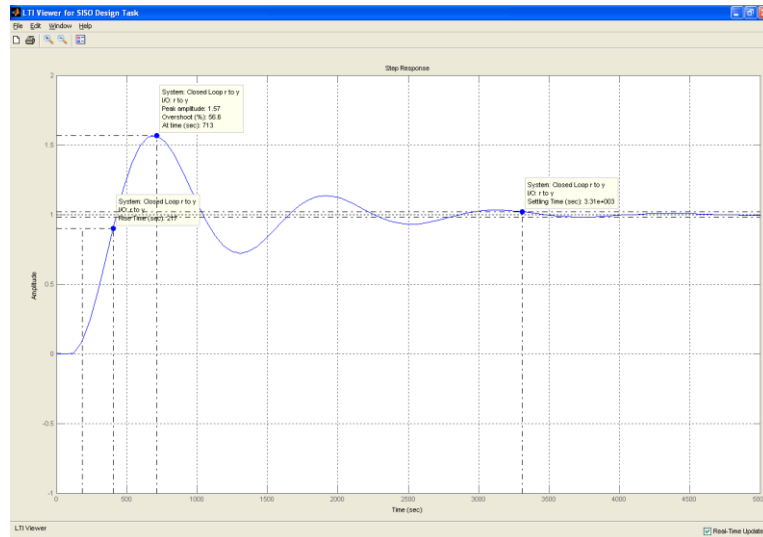


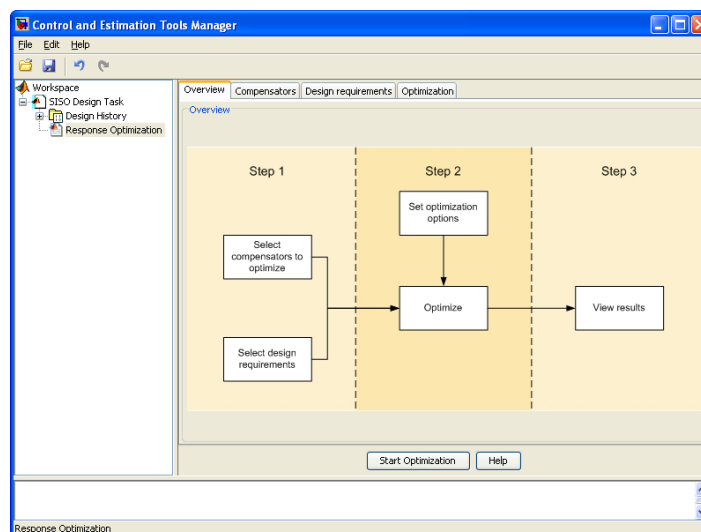
Figura 70 – Automated tuning.

Cuya respuesta a un escalón unitario se ilustra en el siguiente gráfico:



**Figura 71 – Respuesta al escalón unitario del sistema con un controlado PID.**

Este compensador puede ser mejorado obteniendo un nuevo valor de  $C(s)$ , a través de método de diseño Optimization Based Tuning de la pestaña Automated Tuning.



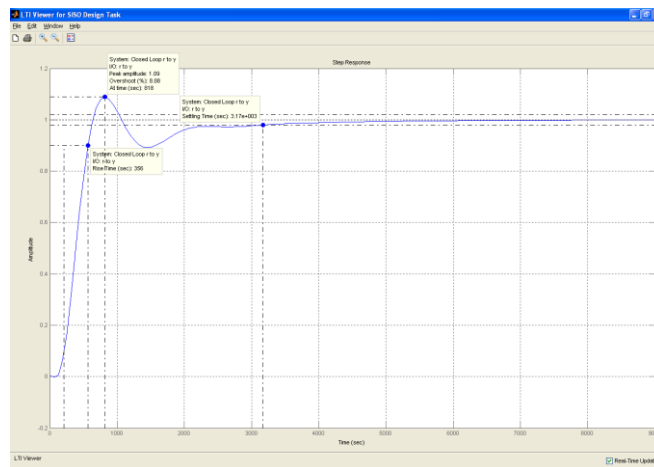
**Figura 72 – Optimización del compensador**

Luego de realizar varias pruebas modificando los requerimientos de diseño se encontró el siguiente compensador:

$$C(s) = 0.002 \frac{(1 + 34s)(1 + 969)}{s}$$

$$C(s) = 0.003 \frac{1 + 1003s + 32946s^2}{s}$$

Cuya respuesta a un escalón unitario es:



**Figura 73 – Respuesta al escalón unitario del sistema con el controlado pid seleccionado.**

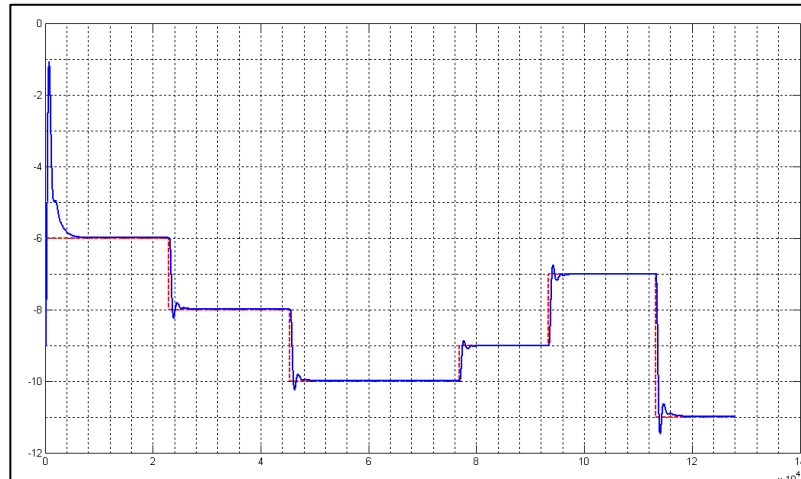
Por tanto las constantes de controlador PID serian:

$$ki = 0.003$$

$$kp = 1003 * ki = 3$$

$$kd = 32946 * ki = 100$$

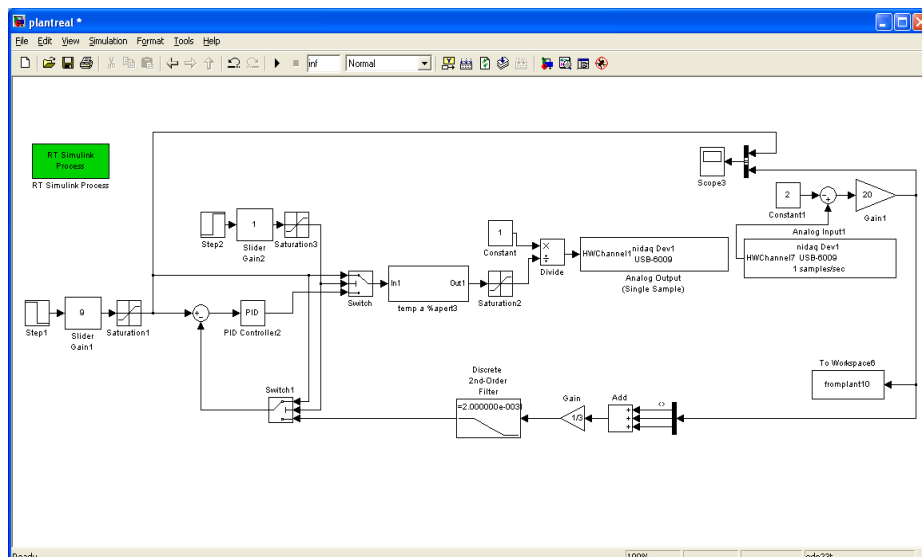
A continuación se muestra la simulación con el controlador PID:



**Figura 74 – Simulación del Modelo en lazo cerrado con controlador**

#### 5.4. Pruebas con la planta real.

Para la implementación del controlador en la planta real se diseñó el siguiente programa en SIMULINK:



**Figura 75 – Prueba en lazo cerrado de la planta real con el controlador PID**

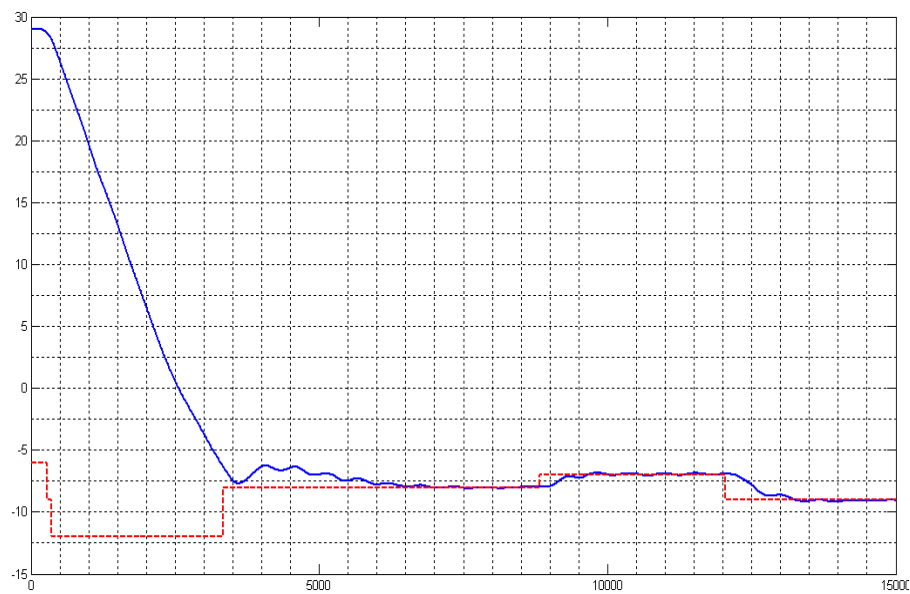
Al realizar las pruebas en la planta real, con las constantes del PID encontradas en la sección anterior, se logro controlar eficientemente la temperatura dentro de la cámara frigorífica.

A continuación se muestran las constantes del PID con la respectiva respuesta del sistema en lazo cerrado con controlador:

$$k_i = 0.003$$

$$k_p = 3$$

$$k_d = 100$$



**Figura 76 – Respuesta de planta real en lazo con el controlador  
PID**

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones

1. El modelado es un proceso mediante el cual se elabora una representación matemática que simboliza de manera simplificada un sistema real, y de esta manera, poder analizar su comportamiento, el mismo que es fundamental a la hora de tomar decisiones, tanto para su perfeccionamiento o para el control de alguna función específica.
2. En muchas ocasiones, cuando se posee escasa información sobre un sistema o cuando el modelado mediante ecuaciones físicas es muy complejo debido a las limitaciones reales, es necesario recurrir a técnicas experimentales de identificación.
3. Se demostró que el método de identificación de sistemas analizado en el presente trabajo, es una herramienta muy eficiente y de gran ayuda cuando se precisa determinar un modelo matemático de un sistema dinámico real.
4. El proceso de identificación debe ser realizado en una secuencia específica para obtener resultados consistentes. El mismo va desde el diseño del experimento, la adquisición y tratamiento de la información,



la elección de la estructura del modelo, la selección de los parámetros y la validación.

5. Un aspecto fundamental del proceso de identificación es la validación del modelo, se hace con base en pruebas de blancura de ruido, es decir, si una señal posee total independencia estadística de sus valores en diferentes periodo de tiempo, se dice que el modelo se ajusta perfectamente a los datos, por tanto, se considera válido.
6. Luego de realizar varias pruebas con diferente estructura de modelos, se puede concluir que el modelo que mejor se ajusta a nuestro sistema es el ARMAX.
7. Para la validación del modelo matemático determinado se usaron datos de pruebas con la planta real, los que demostraron que proceso de identificación fue realizado con éxito.
8. El diseño de un adecuado controlador en un sistema industrial real, es de fundamental importancia, ya que de él depende un correcto y eficiente funcionamiento del sistema.
9. El controlador PID determinado con la ayuda de la herramienta SISOTOOL de MATLAB, para el modelo matemático que representa el sistema de refrigeración por compresión mecánica de vapor, demuestra ser eficaz en el proceso de control de temperatura al trabajar con el sistema real.

## Recomendaciones

1. Se recomienda tomar mediciones en puntos claves para tener una mejor perspectiva del funcionamiento de la planta y evitar posible mal funcionamientos o daños provocados por exceso de funcionamiento o algún fallo en llaves o válvulas
2. Realizar varias pruebas con varias señales de entrada para observar cual se aproxima más al original.
3. No solo evaluar el porcentaje de error, sino también el análisis residual y la respuesta al paso, ya que puede que no concuerden muy bien estos valores y esto puede provocar varias anomalías cuando se proceda a diseñar el controlador
4. Seleccionar la variable de control que sea más lineal posible sino es el caso, intentar por medio del ordenador linealizarla
5. Trabajar en un rango de valores de entrada ya que no siempre se puede generalizar a muchos valores y al generalizarlo podemos diseñar un controlador solo para cierta zona de trabajo pero para otros valores de trabajo el controlador no tendría buen funcionamiento.

# ANEXOS

## ANEXO A

**Tabla Para la selección de Tubos Capilares, de acuerdo a la capacidad de refrigeración del sistema [9].**

CAPACIDAD (KCAL/H)	TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN					
	7.2 ° C		-6.7 ° C		-23.3 ° C	
	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Diámetro (mm)
<b>50-75</b>					3.0	0.6
<b>75-100</b>					2.8	0.6
					2.2	0.6
<b>100-125</b>			3.6	0.7	1.8	0.6
					2.8	0.7
<b>125-150</b>			3.4	0.7	2.6	0.7
			4.0	0.8	3.4	0.8
<b>150-175</b>			3.9	0.8	3.2	0.8
			3.6	0.8	2.8	0.8
<b>175-200</b>			3.4	0.8	2.6	0.8
			2.7	0.8	2.2	0.8
<b>200-225</b>	2.9	0.8	2.4	0.8	1.8	0.8
	2.4	0.8	2.2	0.8	4.9	1.0
<b>225-250</b>	2.2	0.8	1.8	0.8	4.6	1.0
	5.0	1.0	4.7	1.0	4.3	1.0
<b>250-275</b>	4.8	1.0	4.5	1.0	3.8	1.0
	4.4	1.0	4.1	1.0	3.1	1.0
<b>275-300</b>	4.2	1.0	3.9	1.0	3.0	1.0
	3.6	1.0	3.4	1.0	2.6	1.0
<b>300-325</b>	3.4	1.0	3.2	1.0	2.4	1.2
	3.1	1.0	2.9	1.0	5.0	1.2
<b>325-350</b>	3.0	1.0	2.7	1.0	4.8	1.2
	2.6	1.0	2.2	1.0	4.3	1.2
<b>350-375</b>	2.4	1.0	5.4	1.2	4.1	1.2
	5.2	1.2	4.9	1.2	3.7	1.2
<b>375-400</b>	4.9	1.2	4.7	1.2	3.6	1.2
	4.6	1.2	4.2	1.2	3.3	1.2

<b>400-425</b>	4.3	1.2	4	1.2	3.1	1.2
	3.9	1.2	3.7	1.2	2.9	1.2
<b>425-450</b>	3.8	1.2	3.6	1.2	2.8	1.2
	3.6	1.2	3.4	1.2	2.6	1.2
<b>450-475</b>	3.5	1.2	3.3	1.2	2.5	1.2
	3.2	1.2	3	1.2	2.3	1.2
<b>475-500</b>	3.1	1.2	2.9	1.2	2.2	1.2
	2.8	1.2	2.4	1.2	2	1.2
<b>500-625</b>	2.6	1.2	2.2	1.2	1.8	1.2
	5.3	1.5	4.8	1.5	3.9	1.5
<b>625-750</b>	5.1	1.5	4.6	1.5	3.7	1.5
	3.6	1.5	3.4	1.5	2.4	1.5
<b>750-1000</b>	3.4	1.5	3.2	1.5	2.3	1.5
	2.2	1.5	4.8	1.8	3.7	1.8
<b>1000-1250</b>	2	1.5	4.6	1.8	3.5	1.8
	3.4	1.8	3.2	1.8	4.2	2.0
<b>1250-1500</b>	3.2	1.8	3.0	1.8		
	3.6	2.0	2.2	1.8		
<b>1750</b>	2.8	2.0	2.4	2.0		
<b>2000</b>	2.9	2.2	2.4	2.0		
<b>2250</b>	2.4	2.2	2.2	2.2		
<b>2500</b>	3.6	2.5	3	2.5		
<b>2750</b>	2.8	2.5	2.4	2.5		

**Tabla 18 – Tabla para la sección de Tubos Capilares.**

## ANEXO B

### Adquisición de Datos con la NI USB-6009 y MATLAB.

#### Requerimiento de sistemas:

- ✓ Mínima versión requerida de Matlab : R2007b.
- ✓ Mínima versión requerida del Data Acquisition Toolbox: 2.8.3 (para verificar que versión posee ejecute el comando daqhwinfo en la ventana del command window de Matlab).
- ✓ Instalar la versión completa del driver NIDAQmx.

#### Entorno con SIMULINK:

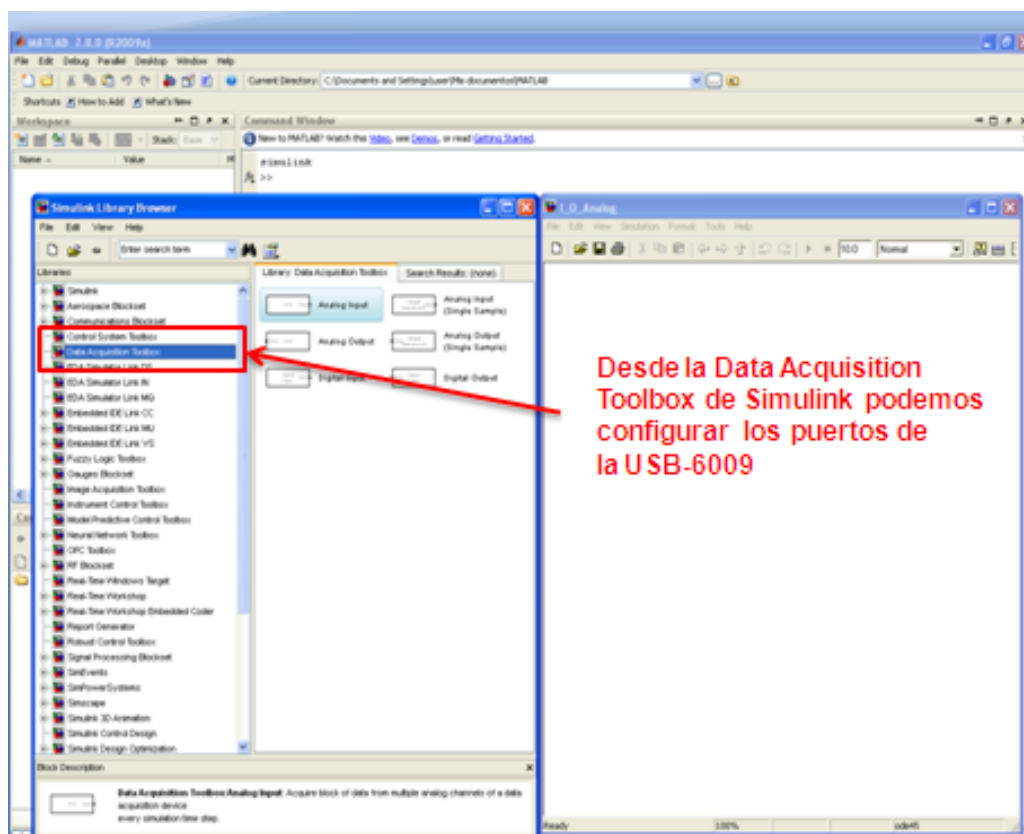


Figura 77 – Entorno Con SIMULINK de USB-6009

## **Configuración de las entradas analógicas.**

### Modo de adquisición:

- ✓ Asincrónico: se van adquiriendo datos y se almacena en la memoria interna de la USB-6009, esto permite que la simulación se continúe.
- ✓ Sincrónico: se adquieren datos con cada flanco de reloj, la simulación se detiene mientras se realiza este proceso.
- ✓ Para nuestra aplicación debemos trabajar en modo asincrónico

### Device:

- ✓ Dispositivo de adquisición desde el cual se van a tomar los datos.

### Hardware sample rate:

- ✓ Velocidad a la que se adquirirán los datos.

### Block Size:

- ✓ Número de muestras que se toman por cada punto de adquisición.

### Input Type:

- ✓ Especifica el tipo de entrada, puede ser referencial o diferencial.

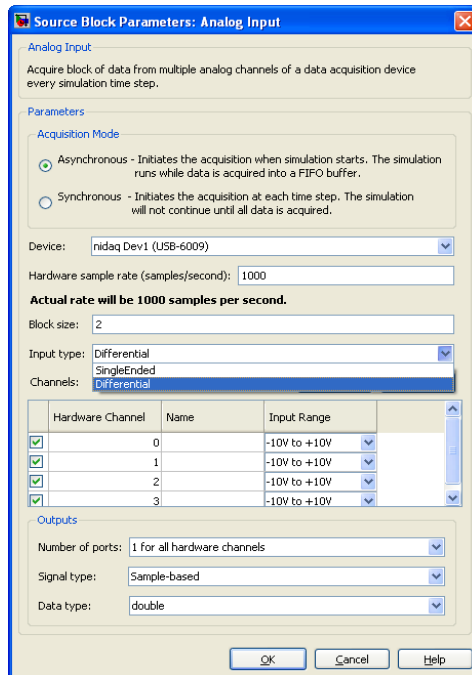
### Channel:

- ✓ Se configuran los canales de entradas análogas con los que se desea trabajar.

### Number of Ports:

Especifica las salidas de los canales en el bloque de SIMULINK:

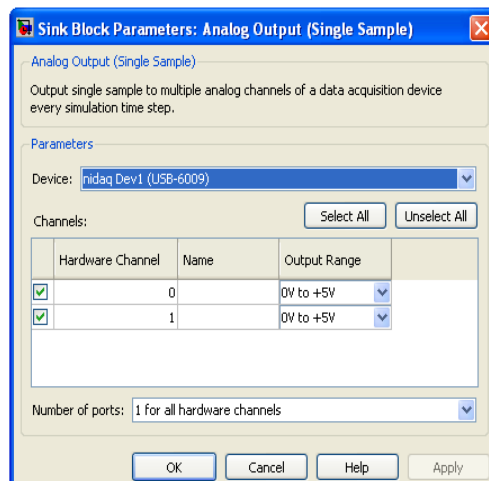
- ✓ 1 for all hardware channels crea un solo puerto de datos por todos los canales configurados.
- ✓ 1 per hardware channel crea un puerto de salida por cada canal configurado.



**Figura 78 – Configuración de las entradas analógicas USB-6009**

### Configuración de las Salidas analógicas.

- ✓ Se envían muestras a los múltiples dos de salida por cada paso de simulación. La velocidad de salida del dispositivo es fija (250 muestras/Seg), en un rango de 0 a 5 [V]



**Figura 79 – Configuración de las salidas analógicas USB-6009**



## Entorno de trabajo con SIMULINK.

Elementos de un archivo de simulación:

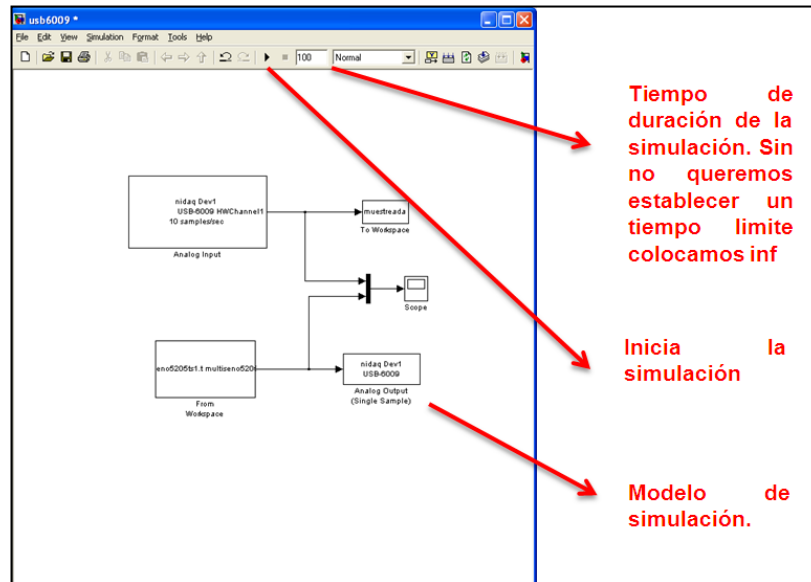


Figura 80 – Entorno de trabajo con SIMULINK

En los parámetros de configuración seleccionamos fixed-step, que permite que la simulación se realice por pasos fijos. Se fija para todos los elementos en modelo de simulación.

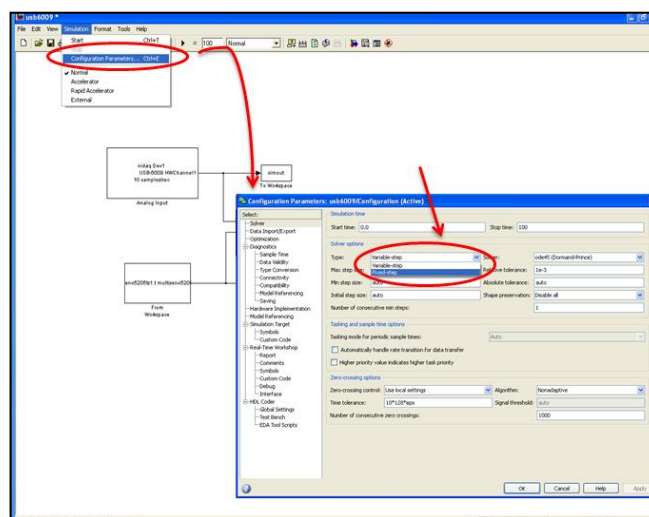


Figura 81 –Parámetros de configuración

## Consideraciones Especiales:

- ✓ La UBS-6009 no posee la capacidad de trabajar en tiempo real con MTLAB.
- ✓ Para realizar la adquisición de datos correctamente se utiliza un bloque que simule pasos de ejecución en tiempo real. Esto crea un ambiente pseudo-real en el modelo de simulación de SIMULINK.
- ✓ Se utiliza la librería Real-Time Toolbox que debe ser instalada independientemente de la instalación de MATLAB.

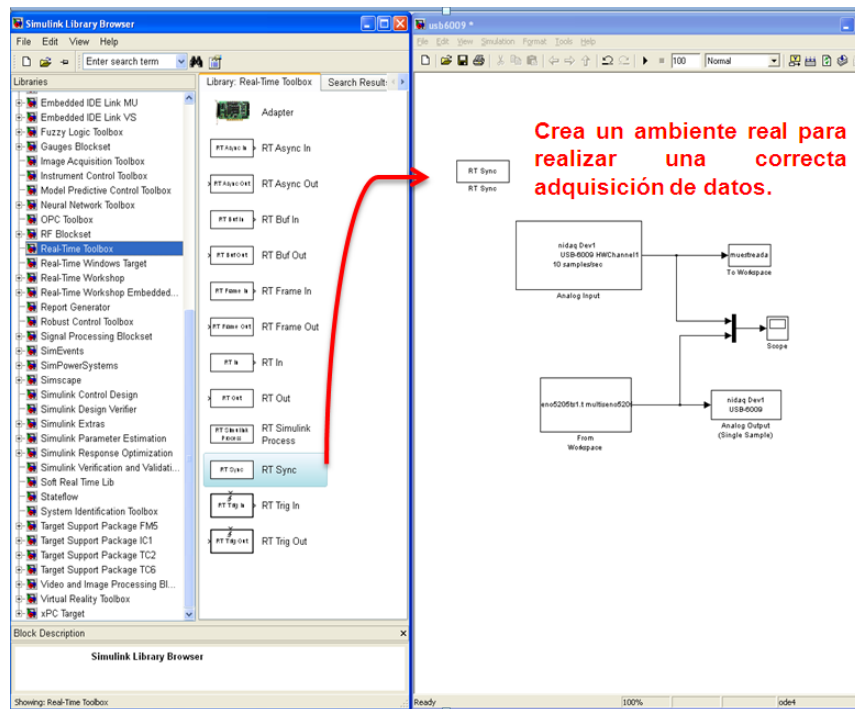


Figura 82 –Real Time Toolbox.

# Anexo C

## Programa del PIC16f887

```
#include "D:\Simulacion_Tarjeta\CompletoModificadoTemSuccion\completo.h"
```

```
//FUNCIONES Y PROCESOS
```

```
void bintobcd (int32 VALOR);  
void LecturaCanal (int16 canal);  
void AsignarValor (int16 canal);  
void MostrarDisplay (boolean var_sig);
```

```
//VARIABLES PARA DISPARO
```

```
int32 contador=0,max_conth;  
float T_high;  
int32 lec_disp;  
int16 Ancho_Pulso=125;
```

```
//VARIABLES PARA MULTIPLEXACION
```

```
int32 Tcamara, Tevaporador, Tsuccion, Tcondensador, Tdescarga;  
boolean Scamara, Sevaporador, Ssuccion, Scondensador, Sdescarga;  
int32 valor_temp;  
int32 valor_lec;  
boolean band;  
int8 D_msb, D_lsb;  
int8 h_valor,m_valor,l_valor,tmp;  
float Duty;  
boolean EsCamara=FALSE, EsDuty=FALSE, actualizar=TRUE,  
EsSuccion=FALSE;  
boolean desp;
```

```
//CONSTANTES DE DISPARO
```

```
#define Tpwm 10.  
#define Mult 1000  
#define Periodo (int32)Tpwm*Mult
```

```
//MODO DE TRABAJO
```

```
#define IDENTIFICACION !input(PIN_B6)  
#define CONTROLADOR !input(PIN_B7)
```

```
//CANALES ANALOGICOS
```

```
#define canalC 0 //Analogica 0 A0 camara
```

```

#define canalE 1 //Analogica 1 A1 evaporador
#define canalS 2 //Analogica 2 A2 succion
#define canalO 8 //Analogica 8 B2 condensador
#define canalD 4 //Analogica 4 A5 descarga
#define canalI 11//Analogica 11 B4 identificacion
#define canalT 13//Analogica 13 B5 controlador
#define canalL 9 //Analogica 9 B9 lazo abierto

//DISPARO
#define DISPARO PIN_A4

//TIEMPO DE MANTENIMIENTO DE LOS DISPLAYS
#define TIEMPO_DELAY 1000

//SIGNO DE TEMPERATURA
#define SIGNO PIN_A7
#define enable_signo      output_bit(PIN_A7,0)
#define disable_signo     output_bit(PIN_A7,1)
#define disable_all      output_d(0), output_c(0xFC), output_e(0),
output_bit(PIN_A7,1)

//MULTIPLEXACION DISPLAYS
//PROGRAMA DEFINITIVO
#define enable_camara      output_bit(PIN_C1,1)
#define disable_camara     output_bit(PIN_C1,0)
#define enable_duty        output_bit(PIN_C3,0)
#define disable_duty       output_bit(PIN_C3,1)
#define enable_evaporador  output_bit(PIN_C4,0)
#define disable_evaporador output_bit(PIN_C4,1)
#define enable_succion     output_bit(PIN_C5,0)
#define disable_succion    output_bit(PIN_C5,1)
#define enable_condensador output_bit(PIN_C6,0)
#define disable_condensador output_bit(PIN_C6,1)
#define enable_descarga    output_bit(PIN_C7,0)
#define disable_descarga   output_bit(PIN_C7,1)

//VARIABLES DE PRECISION
#define Bits_ADC 255
#define Vref_pos 5
#define Cero_grados 2*Bits_ADC/Vref_pos
#define Un_Voltios 1*Bits_ADC/Vref_pos

#int_EXT
void EXT_isr(void)

```

```

{
//SELECCION DEL CANAL PARA EL PWM DE LA VALVULA
//DEPENDIENDO DEL MODO DE TRABAJO SELECCIONADO

if (IDENTIFICACION)
{
set_adc_channel(canalI);
delay_us(20);
lec_disp=read_adc();
delay_us(20);
}
else if (CONTROLADOR)
{
set_adc_channel(canalT);
delay_us(20);
lec_disp=read_adc();
delay_us(20);
}
else//LAZO ABIERTO POTENCIOMETRO EXTERNO
{
set_adc_channel(canalL);
delay_us(20);
lec_disp=read_adc();
delay_us(20);
}

//MINIMO TIEMPO DE APERTURA 20%(2 SEG)
//QUE CORRESPONDE A UN VALOR DE 1 VOLTIO
if(lec_disp<Un_Voltios)
lec_disp=Un_Voltios;

//SE INCREMENTA EL CONTADOR
contador=contador+1;

//CADA 0.2 SEGUNDOS SE ACTUALIZA LA INFORMACION
if (contador%200==0)//
actualizar=TRUE;

}

void main()
{
setup_oscillator(OSC_8MHZ);
setup_adc_ports(sAN0/sAN1/sAN2/sAN3/sAN4/sAN11/sAN13/VSS_VREF);
}

```

```

setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL/RTCC_DIV_1);
setup_timer_1(T1_DISABLED);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,124,1);
setup_comparator(NC_NC_NC_NC);

set_tris_a(0x3F);
set_tris_b(0xFF);
set_tris_c(0x00);
set_tris_d(0x00);
set_tris_e(0x00);

setup_ccp1(CCP_PWM);//Selecciono CCP1 para trabajar en PWM
set_pwm1_duty(Ancho_Pulso);

enable_interrupts(INT_EXT);
ext_int_edge(L_TO_H);
enable_interrupts(GLOBAL);
disable_all;

while(TRUE)
{

    if (actualizar)
    {
        LecturaCanal(canalC);
        delay_us(20);
        LecturaCanal(canalE);
        delay_us(20);
        EsSuccion=TRUE;
        LecturaCanal(canalS);
        EsSuccion=FALSE;
        delay_us(20);
        LecturaCanal(canalO);
        delay_us(20);
        LecturaCanal(canalD);
        delay_us(20);

        T_high=lec_disp*Tpwm/Bits_ADC;
        max_conth=(int32)Mult*T_high;

        Duty=T_high*100/Tpwm;
    }
}

```

```
    actualizar=FALSE;
}

//MUTIPLEXACION
EsCamara=TRUE;
bintobcd(Tcamara);
disable_descarga;
MostrarDisplay(!Scamara);
enable_camara;
delay_us(TIEMPO_DELAY);
EsCamara=FALSE;

bintobcd(Tevaporador);
disable_camara;
MostrarDisplay(Sevaporador);
enable_evaporador;
delay_us(TIEMPO_DELAY);

bintobcd(Tsuccion);
disable_evaporador;
MostrarDisplay(Ssuccion);
enable_succion;
delay_us(TIEMPO_DELAY);

EsDuty=TRUE;
bintobcd((int32)Duty);
disable_succion;
MostrarDisplay(1);
enable_duty;
delay_us(TIEMPO_DELAY);
EsDuty=FALSE;

bintobcd(Tcondensador);
disable_duty;
MostrarDisplay(Scondensador);
enable_condensador;
delay_us(TIEMPO_DELAY);

bintobcd(Tdescarga);
disable_condensador;
MostrarDisplay(Sdescarga);
enable_descarga;
delay_us(TIEMPO_DELAY);
```

```

//CONTROL DE DISPARO
if ((contador>0) & (contador<=max_conth))
    output_high(DISPARO);
else if ((contador>max_conth) & (contador<Periodo))
    output_low(DISPARO);
else if (contador>=Periodo)
    contador=0;
}
}

```

```

void bintobcd(int32 valor)
{ // Funcion que convierte de Binario a BCD

```

```

    h_valor=0;
    m_valor=0;

    if (valor>=100){
    do{
        valor-=100;
        h_valor++;
    }while (valor>=100);
    }

```

```

    if (valor>=10){
    do{
        valor-=10;
        m_valor++;
    }while (valor>=10);
    }

```

```

    l_valor=valor;

```

```

if((Escamara==FALSE) & (EsDuty==FALSE))
{
    if (l_valor>=5)
    {
        if(m_valor==9)
        {
            h_valor=h_valor+1;
            m_valor=0;
        }
        else
            m_valor=m_valor+1;
    }
}

```



```

    }
}

if(EsDuty / EsCamara)
    D_lsb=l_valor;

tmp= h_valor<<4;
D_msb=tmp+m_valor;

return;
}

void LecturaCanal (int16 canal)
{
    disable_interrupts(GLOBAL);
    set_adc_channel(canal);
    delay_us(20);
    valor_lec=read_adc();
    delay_us(20);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    if (EsSuccion==TRUE)
    {
        valor_temp=1000*valor_lec/Bits_ADC;
        band=1;
    }
    else
    {
        if (valor_lec>=Cero_grados)
        {
            valor_temp=1000*valor_lec/Bits_ADC-400;
            band=1;
        }
        else
        {
            band=0;
            valor_temp=400-1000*valor_lec/Bits_ADC;
        }
    }
    AsignarValor(canal);

return;
}

```

```

void AsignarValor (int16 canal)
{
    if (canal==canalC)
    {
        Tcamara=valor_temp;
        Scamara=band;
    }
    if (canal==canalE)
    {
        Tevaporador=valor_temp;
        Sevaporador=band;
    }
    if (canal==canalS)
    {
        Tsuccion=valor_temp;
        Ssuccion=band;
    }
    if (canal==canalO)
    {
        Tcondensador=valor_temp;
        Scondensador=band;
    }
    if (canal==canalD)
    {
        Tdescarga=valor_temp;
        Sdescarga=band;
    }
    return;
}

void MostrarDisplay (boolean var_sig)
{
    int8 tmp2;
    tmp2=D_lsb;

    if(EsCamara / EsDuty)
    {
        disable_all;
        output_d(D_msb);
        desp=shift_right(&tmp2,8,1);
        output_e(tmp2);
        output_bit(PIN_C0,desp);
    }
}

```

```
else
{
  disable_all;
  output_d(D_msb);
}

  output_bit(SIGNO,shift_right(&var_sig,8,1));

return;
}
```

# ANEXO D

## SELECCIÓN DEL TANQUE DE SUCCION

Tabla de Selección de Capacidades (Tons)

MODELO	CONEX.	TONELADAS DE REFRIGERACION									
		R-134a					R-404A/507				
		-40°C -40°F	-29°C -20°F	-18°C 0°F	-7°C +20°F	+5°C +40°F	-40°C -40°F	-29°C -20°F	-18°C 0°F	-7°C +20°F	+5°C +40°F
*2825-AS-37-5-4 (1)	1/2"	0.2	0.3	0.6	0.8	1.2	0.2	0.4	0.8	1.0	1.3
*2826-AS-394-5	5/8"	0.3	0.5	0.8	1.2	1.7	0.4	0.6	1.2	1.6	2.0
*2827-AS-3115-5 (1)	5/8"	0.3	0.5	0.8	1.2	1.7	0.4	0.6	1.2	1.6	2.0
*2828-AS-3115-6	3/4"	0.4	0.6	1	1.6	2.3	0.4	0.7	1.5	2.0	2.6
*2829-AS-3138-5	5/8"	0.3	0.5	0.8	1.2	1.7	0.4	0.6	1.2	1.6	2.0
*2830-AS-3138-6	3/4"	0.4	0.6	1.0	1.6	2.3	0.4	0.7	1.5	2.0	2.6
2834-AS-4100-5	5/8"	0.3	0.5	0.8	1.2	1.7	0.4	0.6	1.2	1.6	2.0
2835-AS-4100-6	3/4"	0.4	0.6	1	1.6	2.3	0.4	0.7	1.5	2.0	2.6
2839-AS-585-6	3/4"	0.4	0.6	1	1.6	2.3	0.4	0.7	1.5	2.0	2.6
2841-AS-585-7 (1)	7/8"	0.7	1.1	1.8	2.8	4.0	0.8	1.3	2.7	3.6	4.6
2840-AS-5117-6	3/4"	0.4	0.6	1	1.6	2.3	0.4	0.7	1.5	2.0	2.6
2842-AS-5117-7	7/8"	0.7	1.1	1.8	2.8	4.0	0.8	1.3	2.7	3.6	4.6
2843-AS-5134-7	7/8"	0.7	1.1	1.8	2.8	4.0	0.8	1.3	2.7	3.6	4.6
2844-AS-5134-9 (1)	1-1/8"	1.3	2.0	3.1	5.0	7.2	1.4	2.1	4.4	5.9	7.6
2845-AS-5169-9	1-1/8"	1.9	3	3.1	5.0	7.2	1.4	2.1	4.4	5.9	7.6
2846-AS-5169-11 (1)	1-3/8"	1.9	3	4.6	7.3	10.7	2.2	3.4	7.2	9.6	12.2
2848-AS-6126-7	7/8"	0.7	1.1	1.8	2.8	4.0	0.8	1.3	2.7	3.6	4.6
2849-AS-6126-9	1-1/8"	1.3	2.0	3.1	5.0	7.2	1.4	2.1	4.4	5.9	7.6
2850-AS-6138-11	1-3/8"	1.9	3.0	4.6	7.3	10.7	2.2	3.4	7.2	9.6	12.2
2851-AS-6202-13 (1)	1-5/8"	3.0	4.8	7.3	11.7	17.0	3.3	5.1	10.7	14.2	18.2
MODELO	CONEX.	TONELADAS DE REFRIGERACION									
		R-22					R-502				
		-40°C -40°F	-29°C -20°F	-18°C 0°F	-7°C +20°F	+5°C +40°F	-40°C -40°F	-29°C -20°F	-18°C 0°F	-7°C +20°F	+5°C +40°F
*2825-AS-375-4 (1)	1/2"	0.4	0.6	0.9	1.4	2.0	0.3	0.5	0.8	1.3	1.8
*2826-AS-394-5	5/8"	0.8	0.8	1.4	2.1	3.0	0.5	0.8	1.2	1.9	2.7
*2827-AS-3115-5 (1)	5/8"	0.5	0.8	1.4	2.1	3.0	0.5	0.8	1.2	1.9	2.7
*2828-AS-3115-6	3/4"	0.72	1.1	1.8	2.8	4.0	0.6	1.0	1.6	2.5	3.5
*2829-AS-3138-5	5/8"	0.5	0.8	1.4	2.1	3.0	0.6	0.8	1.2	1.9	2.7
*2830-AS-3138-6	3/4"	0.72	1.1	1.8	2.8	4.0	0.6	1.0	1.6	2.5	3.5
2834-AS-4100-5	5/8"	0.5	0.8	1.4	2.1	3.0	0.5	0.8	1.2	1.9	2.7
2835-AS-4100-6	3/4"	0.72	1.1	1.8	2.8	4.0	0.6	1.0	1.6	2.5	3.5
2839-AS-585-6	3/4"	0.72	1.1	1.8	2.8	4.0	0.6	1.0	1.6	2.5	3.5
2841-AS-585-7 (1)	7/8"	1.3	2.0	3.3	5.1	7.3	1.1	1.7	2.8	4.3	6.2
2840-AS-5117-6	3/4"	0.72	1.1	1.8	2.8	4.0	0.6	1.0	1.6	2.5	3.5
2842-AS-5117-7	7/8"	1.3	2.0	3.3	5.1	7.3	1.1	1.7	2.8	4.3	6.2
2843-AS-5134-7	7/8"	1.3	2.0	3.3	5.1	7.3	1.1	1.7	2.8	4.3	6.2
2844-AS-5134-9 (1)	1-1/8"	2.1	3.3	5.3	8.3	11.8	1.9	2.9	4.6	7.1	10.2
2845-AS-5169-9	1-1/8"	2.1	3.3	5.3	8.3	11.8	1.9	2.9	4.6	7.1	10.2
2846-AS-5169-11 (1)	1-3/8"	3.4	5.3	8.5	13.2	18.8	3.0	4.6	7.4	11.6	16.5
2848-AS-6126-7	7/8"	1.3	2.0	3.3	5.1	7.3	1.1	1.7	2.8	4.3	6.2
2849-AS-6126-9	1-1/8"	2.1	3.3	5.3	8.3	11.8	1.9	2.9	4.6	7.1	10.2
2850-AS-6138-11	1-3/8"	3.4	5.3	8.5	13.2	18.8	3.0	4.6	7.4	11.6	16.5
2851-AS-6202-13 (1)	1-5/8"	5.1	8.0	12.8	20.0	28.5	4.4	6.9	11.0	17.2	24.5

Figura 83 –Selección de tanques de succión.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jose Alarcón Creus, "Tratado Práctico de Refrigeración Automática", Marcombo, 1998.
- [2] Edward g. Pita, "Principios y Sistemas de Refrigeración", Limusa, 2005.
- [3] REOCITIES,"Respuesta transitoria", <http://reocities.com/Area51/starship/6611/cap4.pdf>, Fecha de consulta: 28-Dic.-2010.
- [4] Lennart Ljung, "System Identification: Theory for the User", Prentice-Hall, 1999.
- [5] L. A. Zadeh, "From circuit theory to system theory", In Proc. IRE 50, pages 856–865, 1962.
- [6] T. Söderstrom and p. Stoica, "System Identification", Prentice Hall, 1989.
- [7] Santiago Garrido, "Identificación, Estimación y Control de Sistemas No-lineales mediante RGO", Universidad Carlos III, 1999.
- [8] Dr. Juan Carlos Gomes, "ISIS Identificación de Sistemas", <http://www.fceia.unr.edu.ar/isis/>, Fecha de consulta: 14-Feb-2011.
- [9] YoReparo, "Dimensionamiento de Tubos Capilares", [www.yoreparo.com](http://www.yoreparo.com), Fecha de consulta: 15-Feb-2011.
- [10] Lennart Ljung & Torkled Glad, "Modeling of dynamic system", Prentice-Hall, 1994.