

UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA PARA SISTEMA “HVAC” APLICANDO CONTROL MULTIVARIABLE CASCADA”

Tesis Presentada por el Bachiller:

TEJADA COAGUILA, José Arturo Sebastián

Para optar el Título Profesional
de Ingeniero Electrónico

Arequipa – Perú

2016

PRESENTACION

Sr. Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.

Sres. Miembros del Jurado.

De conformidad con las disposiciones del reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, pongo a vuestra consideración el presente trabajo titulado “DISEÑO E IMPLEMENTACION DE PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA PARA SISTEMA HVAC APLICANDO CONTROL MULTIVARIABLE CASCADA” el mismo que de ser aprobado me permitirá optar título de Ingeniero Electrónico.



José Arturo Sebastián Tejada Coaguila
Bachiller en Ingeniería Electrónica

Dedicada la presente TESIS a:

A mi padre

Por sus contantes consejos y experiencias compartidas que desde mi infancia es guía persistente que orienta el sendero de cada etapa de mi vida ya que muchas de ellas se encuentran plasmadas en mi desarrollo profesional.

A mi madre y hermano

Porque son parte importante en mí y me ayudaran a seguir adelante en esta etapa importante de mi vida.

A mí novia y futura esposa

Por su constante apoyo y el amor incondicional me dio la firme confianza puesta en mí ya que sin ellos no hubiese logrado este éxito profesional y es el que me dará fuerzas para seguir cumpliendo mis metas.

Tengan por seguro que no los defraudare hare que siempre ustedes estén orgullosos de mi dando lo mejor de mi persona.

Mis cordiales agradecimientos

Primeramente a Dios en darme las fuerzas necesarias de terminar con el proyecto y a mis mentores por darme la oportunidad de ser parte del desarrollo y conductores del saber ya que fueron guías indispensables en esta etapa de mi vida.

Ing. Cesar Málaga Chávez

Ing. Lucy Delgado Barra

Ing. Víctor Hugo Rivera Chávez

Ing. Henry Zegarra Gago

José Arturo Sebastián Tejada Coaguila

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	X
INDICE DE ECUACIONES	XI
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCION	3
CAPITULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	5
1.1.Planteamiento del Problema	5
1.2.Descripción del Problema	6
1.3.Objetivos	7
1.3.1 Objetivo General	7
1.3.2 Objetivos Específicos	7
1.4.Justificación del Estudio	8
1.5.Hipótesis	9
1.6.Alcances	9
1.7.Instrumentos de Verificación	10
CAPITULO II	
MARCO TEORICO	11
2.1 Introducción a los Sistema Hvac.	11
2.2 Sistemas De Control Automático	12
2.3 Definición De Control Automático	13
2.3.1 Control de Lazo Abierto	13
2.3.2 Control de Lazo Cerrado	14
2.4 Tipos De Sistemas De Control	15
2.4.1 Control de dos posiciones o de si-no.-	15
2.4.2 Control proporcional	16
2.4.3 Control integral	17

2.4.4 Control proporcional e integrativo (PI)	17
2.4.5 Control Proporcional –Integral - Derivativo (PID).	18
2.4.6 Control de Sistemas Multivariables	19
A) Control En Cascada	19
B) Control en Serie	22
2.5 Características de Sistema de Control	23
2.6. Instrumentación Industrial	24
2.6.1. Definición de Instrumentación	24
2.6.2. Característica De Los Instrumentos	26
2.6.3. Clasificación De Los Instrumentos	26
2.6.4. Medidores De Flujo	28
2.6.4.1 Clasificación de medidores de Flujo	29
A. Medidores De Caudal Másico	29
B. Tipos de medidores volumétricos	29
2.6.4.2 Caudalímetro de Turbina	31
2.6.4.3. Principio de Funcionamiento	31
2.6.4.4 Características de Flujo de Aire.	32
A. Número de Reynolds	32
B. Velocidad Media	33
2.6.4.5. Montaje o posicionamiento de medidor de Flujo.	34
A. Acoplamiento entre secciones	34
2.6.5 Medidores de Temperatura.	34
2.6.5.1. Escalas de Temperatura	35
2.6.5.2. Clasificación de Medidores de Temperatura.	36
2.6.5.3. Sensor Detector Resistivo de temperatura (RTD)	39
2.6.5.4. Características de Funcionamiento del sensor RTD.	40
2.6.5.5. Montaje de Sensores	42
2.6.6 Resistencia Calefactora	43
2.6.6.1 Características de la resistencia calefactora	44
2.6.6.2 Transferencia de calor	46
A. Modos de transferencia	47
B. Transferencia de calor por Convección.	47

2.7 Teoría de Temporizadores	47
2.7.1 Modos de Configuración	48
2.7.1.1 Monoestable	49
2.7.1.2 Astable	49
2.7.1.3 Oscilador controlado por tensión (VCO)	49
2.8 Modulación por Ancho de pulso con Controladores PID	51
2.8.1. Aplicación en Motores y Ventiladores.	51
2.9 Ventiladores	51
2.9.1. Clasificación de ventiladores	51
2.9.2. Ventilador tipo Centrífugo	52
2.9.2.1 Tipos de Alabes	54
2.9.2.2 Trayectoria y dirección	55
2.9.2.3 Flujo Laminar o Media del Ventilador en Ducto	56
2.9.3. Principio de Funcionamiento	56
2.9.3.1 Leyes de Ventiladores	56
2.9.3.2 Curva Característica de un Ventilador	57
2.9.3.3 Zona de funcionamiento de márgenes	58
2.9.3.4 Punto de Trabajo seguro de los Ventiladores	59
2.9.4 Rendimiento del Ventilador	60
2.10 Conductos de Aire	61
2.10.1 Conducto acrílico	61
2.10.2 Pérdida de carga en tramos rectos	62
2.10.3 Consideraciones de zona de ventilación	63
2.11 Conductores eléctricos	64
2.11.1 Rigidez dieléctrica	64
2.11.2 Conexiones a tierra	66
2.12 Controladores Lógicos Programables	65
2.12.1 Clasificación PLC según fabricantes: Allen Bradley	69
2.12.1.1 PLC Tipo Nano	69
2.12.1.2 PLC Tipo Compacto	69
2.12.1.3 PLC Tipo Modular	70
2.12.2. Módulos De I/O Analógicos	70
2.12.2.1 Características de Módulos De I/O Analógicos	71

2.12.2.2	Direccionamiento De Entradas Y Salidas	72
2.12.3.	Módulos De Interfase De Comunicación Y Redes	72
2.12.3.1	Interfase Punto Por Punto (P.P.I)	73
2.12.3.2	Interfase Multipunto (M.P.I)	74
2.12.3.3	Según Protocolos A Medida	75
2.12.4.	Características De Los Módulos del PLC	75
2.12.4.1	Ventajas	75
2.13	Sistemas SCADA	76
2.13.1	Características Principales de un SCADA	77
2.13.2	Hardware	78
2.13.3	Software	78
 CAPITULO III		
ANALISIS Y DISEÑO DEL PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA		79
3.1	Análisis Metodológico	79
3.2.1	Selección de la muestra	83
3.2	Diseño del prototipo de control de flujo y temperatura	85
3.2.1	Dimensionamiento	86
3.2.1.1	Elementos y Estructuras.	86
3.2.1.2	Dimensiones del Tablero de Control	87
3.2.2	Selectividad y cálculo de equipos actuadores	87
3.2.2.1	Selectividad de Ventilador centrífugo	87
3.2.2.2	Selectividad de Resistencia calefactora	91
3.2.3.	Selección de Equipos de Medición	94
3.2.3.1.	Sensor de temperatura	94
3.2.3.2.	Transmisor del sensor de temperatura	96
	A. Configuración de entrada y salida	99
3.2.3.3.	Sensor de flujo de aire	100
3.2.3.4.	Diseño del Acondicionador del Sensor de Flujo	102
3.2.4	Pruebas de instrumentos	104
3.2.5.	Selectividad de dispositivos y componentes de Control	105
3.2.5.1.	Modulador Por Ancho de Pulso “PWM” por SSR	106

3.2.5.2. Acoplamiento entre señal de control y potencia	107
3.2.6. Alimentación de voltaje y elementos de protección	110
3.2.7. Cableado y conductores Eléctricos	111
3.2.8. Conducto de Aire	111
3.2.9. Manufactura	112
3.3. Configuración del Sistema de Control Multivariable	114
3.3.1 Elementos del Sistema	113
3.3.2 Modelamiento e implementación de control	117
3.3.3 Diseño de Control Multivariable CASCADA	119
3.3.4 Configuración del Modulador por ancho de pulso PWM	129
3.4 Programación del Controlador con Rockwell Software	131
3.4.1 Configuración de Módulos Analógicos I/O	132
3.4.2 Configuración del sensor al PLC.	132
3.4.3 Condiciones del Programa	134
3.4.4 Configuración de puertos de entrada serial RS232	136
3.4.5 Programación del RSLinx para comunicación entre PLC y PC	138
3.4.6 Configuración del RSLogix para la programación LADDER	142
3.4.7. Bloques de Control PID para Lazos de Control	145
CAPITULO IV	
FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS	149
4.1 Programación del Controlador Micrologix 1200	150
4.1.1 Programa LADDER Para El Control Multivariable CASCADA	150
4.2 Desarrollo del sistema de supervisión, control y adquisición de datos SCADA	157
4.3 Resultados de la adquisición de datos del Sistema Multivariable CASCADA	170
4.4 Aplicación del RSTune para Ajuste de Lazos PID	175
4.5 Resultados Económicos	177
4.6 Conclusiones	180
4.7 Recomendaciones	181
4.8 Observaciones	181
4.9 Bibliografía	182
4.10 Anexos	183

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

Fig. 2.1 Sistema de control de lazo abierto.	14
Fig. 2.2 Sistema de control de lazo cerrado.	14
Fig. 2.3 Diagrama de bloques de un control si-no	16
Fig. 2.4 Diagrama de bloques de un control proporcional.	17
Fig. 2.5 Diagrama de bloques de control integral.	17
Fig. 2.6 Diagrama de bloque de un control proporcional e integral	18
Fig. 2.7 Diagrama de bloques de un control proporcional, derivativo e integral	19
Fig. 2.8 Diagrama De Planta Tipo Control Cascada	21
Fig. 2.9 Diagrama Del Lazo De Control En Cascada	21
Fig. 2.10 Sistema en Serie	22
Fig. 2.11 Funcionamiento Caudalímetro eléctrico Tipo turbina	32
Fig. 2.12 Comportamientos del Flujo de Aire	33
Fig. 2.13 Escalas de Temperaturas	35
Fig. 2.14 Sensor de temperatura (RTD)	40
Fig. 2.15 RTD de dos hilos	41
Fig. 2.16 RTD de cuatro hilos	41
Fig. 2.17 Resistencias Calefactoras Tubulares	43
Fig. 2.18: Equilibrio Térmico entre Calefactor y Aire.	47
Fig. 2.19: Temporizador 555	48
Fig. 2.20 Esquema del Modo VCO	49
Fig. 2.21 Configuración de parámetros del VCO	49
Fig. 2.22 Vista transversal del análisis del flujo de entrada	52
Fig. 2.23 Ventilador Centrífugo	54
Fig. 2.24 Tipos de alabes en ventiladores Centrífugos	54
Fig. 2.25 Tipos de alabes en ventiladores Centrífugos	55
Fig. 2.26 Triangulo de Velocidad Media del impulsor alabes hacia adelante	55
Fig. 2.27 Flujo medio laminar o uniforme del aire	56
Fig. 2.28 Curva Característica Caudal vs Presión	56
Fig. 2.29 Zona recomendable de funcionamiento	59
Fig. 2.30 Curva Característica Caudal vs Presión	69

Fig. 2.31 Rendimiento del motor	60
Fig. 2.32 Comportamiento del Flujo en interior del Conducto	62
Fig. 2.33. Conductor eléctrico	64
Fig. 2.34 Valores de rigidez dieléctrica para algunos materiales	65
Fig. 2.35: Secuencia de operaciones de un PLC	66
Fig. 2.36 Esquema de un PLC para control de Procesos	67
Fig. 2.37 Estructura de un Controlador Lógico Programable	68
Fig. 2.38 Lectura entrada Ejecución de programa	69
Fig. 2.39 PLC Micrologix 1200	70
Fig. 2.40 Esquema básico de un sistema SCADA	77
 CAPITULO III	
Fig. 3.1 Esquema proceso de investigación	81
Fig. 3.2 Causas que originan mayores problemas de corrosión	81
Fig. 3.3 Referencia de valores de la temperatura en control ON – OFF	82
Fig. 3.4 Balance de costos de corrosión	83
Fig. 3.5 Daños de Corrosión	83
Fig. 3.6 Pérdidas monetarias de producción y tiempo	84
Fig. 3.7 Comparación de Precios	85
Fig. 3.8 Soportes y Estructuras para el prototipo del sistema HVAC	87
Fig. 3.9 Vistas del Tablero de Control	88
Fig. 3.10 Curvas de funcionamiento del ventilador	90
Fig. 3.11 Comparación de Precios	90
Fig. 3.12 Ventilador Centrífugo	91
Fig. 3.13 Calefactor	92
Fig. 3.14 Curva del calefactor	93
Fig. 3.15 Funcionamiento del calefactor	94
Fig. 3.16 Principio del Sensor de Temperatura	95
Fig. 3.17 Características del Sensor del sensor de temperatura	96
Fig. 3.18 Curvas y Valores de la resistencia del PT100	97
Fig. 3.19 Diagrama Montaje y Conexión del Reg48	98
Fig. 3.20 Montaje y conexionado del Reg48	99
Fig. 3.21 Comparación de dispositivos de la misma marca	100
Fig. 3.22 Configuración de Entrada y Salida	101

Fig. 3.23 Características del Sensor de Flujo (Motor DC y Alabe de 8 aletas)	102
Fig. 3.24 Sensor de Flujo	103
Fig. 3.25 Diseño del Amplificador de señal de Flujo	103
Fig. 3.26 Placas del Amplificador de señal de Flujo	104
Fig. 3.27 Conexionado entre el PIC 16F877A y el LCD	105
Fig. 3.28 Pruebas de Continuidad	106
Fig. 3.29 Esquemas de Configuración y conexionado	108
Fig. 3.30 Montaje del SSR con el Heater y Blower	110
Fig. 3.31 Características del Heater y Blower	110
Fig. 3.32 Montaje de Equipos sobre Prototipo de Sistema HVAC	113
Fig. 3.33 Montaje de estructuras	113
Fig. 3.34 Montaje de componentes y accesorios	114
Fig. 3.35 Canalización Eléctrica, cableado y conexionado	114
Fig. 3.36 Prototipo de Control Multivariable	115
Fig. 3.37 Diagrama de Bloques del Prototipo de Control Cascada	116
Fig. 3.38 Graficas Referenciales de Temperatura y Flujo	119
Fig. 3.39 Graficas de Lazos de Control	121
Fig. 3.40 Diagrama de Bloques de Control Multivariable CASCADA	126
Fig. 3.41 Grafica Estándar de la respuesta del sistema	128
Fig. 3.42 Ilustración de control on-off manual	129
Fig. 3.43 Conexionado de la Salida del PLC al SSR	130
Fig. 3.44 Grafica de Periodo de Lazo Principal	130
Fig. 3.45 Respuesta del Sistema controlador por PWM	131
Fig. 3.46 Diagrama de Flujo	132
Fig. 3.47 Esquema de conexión del módulo analógico	133
Fig. 3.48 Aproximación entre valores de entrada y valores escalados	134
Fig. 3.49 Esquema de comunicación entre PC y PLC	137
Fig. 3.50 Configuración del conversor RS232 – UBS	137
Fig. 3.51 Identificación de entrada Serial RS232	138
Fig. 3.52 Configuración de entrada serial al Virtual Machine	138
Fig. 3.53 Identificación de entrada Serial RS232	139
Fig. 3.54 Ventana Principal de RSLinx	140
Fig. 3.55 Ventana Configure Drivers en Comunicación Con El Controlador	140
Fig. 3.56 Ventana de ingreso de nuevo Driver RSLinx	141

Fig. 3.57 Ventana de Configuración RS232	141
Fig. 3.58 Ventana Configure Drivers después de Comunicarse Con El Controlador	142
Fig. 3.59 Ventana RSWho	142
Fig. 3.60 Ventana RSLogix 500	143
Fig. 3.61 Ventana de Selección de Controlador	144
Fig. 3.62 Ventana de Configuración de Entradas y Salidas	144
Fig. 3.63 Ventana de Configuración de Entradas y Salidas del Módulo	145
Fig. 3.64 Ventana de Descarga del Programa	145
Fig. 3.65 Bloque Funcional del Lazo PID	146
Fig. 3.66 Programación del Lazo PID	147

CAPITULO IV

Fig. 4.1 Graficet del Sistema de Control Multivariable Cascada.	151
Fig. 4.2 Arranque del Programa Multivariable CASCADA	152
Fig. 4.3 Parada del Programa Multivariable CASCADA	152
Fig. 4.4 Escalamiento de Temperatura	150
Fig. 4.5 Set Point del Control Multivariable CASCADA	153
Fig. 4.6 Bloque PID de Lazo Maestro	153
Fig. 4.7 Escalamiento y Modulación de la señal de control Maestro	154
Fig. 4.8 Escalamiento del Flujo de Aire	155
Fig. 4.9 Set Point Esclavo	155
Fig. 4.10 Bloque PID del Lazo Esclavo	156
Fig. 4.11 Escalamiento de la Señal de Control del Blower	156
Fig. 4.12 Modulación de la Señal de Control del Lazo Esclavo	157
Fig. 4.13 Parada de Actuadores del Sistema	157
Fig. 4.14 Ventana de comunicación entre RSLogix y Rsvew32	158
Fig. 4.15 Ventana Principal y Creación de Nuevo Proyecto del RSView 32	158
Fig. 4.16 Ventana Principal del SCADA y su Canal de Comunicación	159
Fig. 4.17 Ventana De Selección De Controlador y Configuración De Un Nodo	159
Fig. 4.18 Ventana Project	160
Fig. 4.19 Ventana de Configuración De Tags y Selección Del Controlador	160
Fig. 4.20 Ventana Para La Asignación y Configuración De Tags	161
Fig. 4.21 Creación De Las Ventanas De Visualización, Control y Herramientas	162
Fig. 4.22 Creación De Las Ventanas De Visualización, Control y Herramientas	162

Fig. 4.23 Creación De Las Ventanas De Visualización, Control y Herramientas	163
Fig. 4.24 Ventana “Trend” Creada	164
Fig. 4.25 Configuración de la Animación Del Botones Start y Stop	164
Fig. 4.26 Ingreso a la Configuración del Start y Stop	165
Fig. 4.27 Configuración de la Animación de Blower y Heater	165
Fig. 4.28 Configuración de la Animación del Heater	166
Fig. 4.29 Configuración de la lectura de Valores del Blower y Heater	166
Fig. 4.30 Configuración de la lectura de Temperatura y Flujo	167
Fig. 4.31 Configuración para Animación del Flujoómetro	167
Fig. 4.32 Configuración de la Animación de Sensores	167
Fig. 4.33 Configuración Del Ingreso Del Set Point	168
Fig. 4.34 Configuración de las Gráficos de Datos	169
Fig. 4.35 Configuración de la Lectura del Flujo	169
Fig. 4.36 Configuración De La Lectura Del Set Point	170
Fig. 4.37 Configuración de la Lectura Animación Fill para la PV y HEATER	170
Fig. 4.38 Visualización de Datos de Control y Gráficas	170
Fig. 4.39 Ubicación Del Programa Creado (cascada) En RSView 32	171
Fig. 4.40 Ajuste Óptimo de la señal del flujo de Aire al 90, 50 y 10 Por ciento	172
Fig. 4.41 Parámetros Finales de Lazos Maestro y Esclavo	173
Fig. 4.42 Señal de la Respuesta del Sistema a 50 Centígrados deseados	173
Fig. 4.43 Señal de la Respuesta del Sistema al 40 y 45 Centígrados deseados	174
Fig. 4.44 Señal de la Respuesta del Sistema al 30 y 35 Centígrados deseados	175
Fig. 4.45 Graficas de Temperatura por Unidad de Flujo de Aire	176
Fig. 4.46 Pantalla Principal RSTune	177
Fig. 4.47 Pantalla de configuración de control PID	177
Fig. 4.48 Pantalla de control PID	178
Fig. 4.49 Costos del prototipo	180

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II

Tabla 2.1 Medida entre Conducto y tramo de sensor	34
Tabla 2.2 Características de materiales del RTD	39
Tabla 2.3 Valores de resistencias y temperaturas del platino	40
Tabla 2.4 Coeficientes de Resistividad de materiales	44
Tabla 2.5: Coeficientes de temperatura de materiales	45
Tabla 2.6 Descripción de Pines de Temporizador	48
Tabla 2.7 Simbología de variables e Unidades	53

CAPITULO III

Tabla 3.1: Tabla de Pruebas de valores del ventilador	89
Tabla 3.2: Especificaciones del ventilador	91
Tabla 3.3: Características de materiales del RTD	96
Tabla 3.4: Valores de Entrada y salida	99
Tabla 3.5: Valores del Flujo de Aire	102
Tabla 3.6: Valores del Voltage del Flujo de Aire	104
Tabla 3.7: Continuidad de terminales de sensores de temperatura y flujo	106
Tabla 3.8: Tabla de Características del ventilador	109
Tabla 3.9: Mediciones del Ventilador	111
Tabla 3.10: Características del Conductor Eléctrico	112
Tabla 3.11: Valores referenciales de los Lazos	118
Tabla 3.12: Valores referenciales de parámetros del algoritmo PID	120
Tabla 3.13: Valores de Lazos de Temperatura y Flujo	122
Tabla 3.14: Parámetros de control de Temperatura y Flujo	123
Tabla 3.15: Parámetros Calculados de Lazos de Control	129
Tabla 3.16: Valores de Bits	134
Tabla 3.17: rangos de Conversión A/D	134
Tabla 3.18: Tabla De Especificación De Equipos	136
Tabla 3.19: Asignación De Valores De Sintonización Para Lazos De Control PID	147
Tabla 3.20: Lista De Ordenamiento Final	149

CAPITULO IV

Tabla 4.1: Tabla De Parámetros Medidos	176
Tabla 4.2: Costos del prototipo del Control Multivariable	179

INDICE DE ECUACIONES

CAPITULO II

Ec.2.1 Número de Reynolds	33
Ec. 2.2 Ecuación de variación de resistencia.	39
Ec. 2.3 Valor de resistencia respecto al tipo de material	44
Ec. 2.4 Valor de resistencia respecto al cambio de temperatura	45
Ec. 2.5 Potencia equivalente de resistencia calefactora	45
Ec. 2.6 Valor del calor respecto a potencia por tiempo	46
Ec. 2.7 Equilibrio térmico de energías térmicas	46
Ec. 2.8 Valor de la potencia del ventilador	60
Ec. 2.9 Valor del rendimiento del ventilador	61

CAPÍTULO III

Ec. 3.1 Valor equivalente de porcentajes por Minuto	89
Ec. 3.2 Recta del Calefactor	93
Ec. 3.3 Función de la señal de potencia de un semiciclo	108
Ec. 3.4 Recta de la Temperatura	111
Ec. 3.5 Lazo de Control	122
Ec. 3.6 Ecuaciones de Control	124
Ec. 3.7 Lazo de Control Secundario	125
Ec. 3.8 Lazo de Control Cascada	126
Ec. 3.9 Parámetros de la respuesta al escalón	126
Ec. 3.10 Parámetros de Función de Transferencia	127
Ec. 3.11 Parámetros de la respuesta gráfica del sistema	128
Ec. 3.12 Parámetros de Respuesta del Sistema	129
Ec. 3.13 Calculo del Periodo del Lazo Principal	131

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA PARA SISTEMA “HVAC” APLICANDO CONTROL MULTIVARIABLE CASCADA.

RESUMEN

El desarrollo de la presente Tesis, está precisamente dedicado a la implementación de un prototipo de prueba HVAC el cual permita realizar un tipo de simulación de control de flujo y temperatura, utilizando el sistema de control multivariable en cascada, supervisado por SCADA vía Ethernet o RS232, el cual nos permite la supervisión, monitoreo y control del proceso de flujo y temperatura sensada.

Se tiene en cuenta que el censado más importante es el de temperatura, para ello utilizaremos un sensor de temperatura RTD basado en la variación de la resistencia de un conductor con respecto a la temperatura, tendremos en cuenta que la unidad de medida será en celsius por ohmios.

Se consideró el diseño para la programación de sistema de control cascada mediante PLC, lo que ha permitido la implementación del prototipo HVAC. Así mismo, se ha diseñado e implementado toda la instrumentación correspondiente al prototipo como son flujo, temperatura, variador de velocidad, ventilador centrífugo, resistencia calorífica, sistema eléctrico, así como se han aplicado soluciones técnicas al cableado, conexión e instalaciones. Posteriormente se realizaron las pruebas de validación correspondientes.

Consideramos, que para nuestro medio actual, el aporte técnico ha sido significativo por ser un Trabajo donde se han analizado y utilizado una gran diversidad de equipos, así como se han aplicado soluciones técnicas conforme a nuestros requerimientos.

ABSTRACT

The development of this thesis is precisely dedicated to the implementation of a prototype test HVAC which allows to perform a kind of simulation of flow control and temperature using the system multivariable cascade control, supervised by SCADA via Ethernet or RS232 which allows the supervision, monitoring and process control flow and temperature sensed.

One considers that the most important is the temperature sensed, to use it based on the variation of the resistance of a conductor with respect to temperature RTD temperature sensor, we will consider that the measurement unit is in celsius ohms.

Design for programming cascade system PLC control was considered, allowing the implementation of the prototype HVAC. Also, it has been designed and implemented for the entire prototype instrumentation and are flow, temperature, variable speed centrifugal fan, heat resistance, electrical systems and technical solutions have been applied to the wiring, piping and installations. Subsequently corresponding validation tests were performed.

We believe that for our current environment, the technical support was significant because it is a job where you have analyzed and used a wide variety of equipment and technical solutions have been applied in accordance with our requirements.

INTRODUCCION

El presente trabajo es el producto de una investigación y desarrollo de tecnología del control y automatización contribuyendo a la escuela profesional de ingeniería electrónica con el fin de aportar a la calidad educativa, considerándolo un buen material de apoyo para el análisis del control automático particularmente basándose en control multivariable en cascada con una aplicación orientada a los sistemas de aire acondicionado HVAC a nivel práctico ya que también podría ser tomado en cuenta para la simulación de otras aplicaciones como el análisis de sopladores de caldera u otros.

En la implementación se considerara la instrumentación, lógica de control con equipos con PLC, diseño electromecánico del prototipo y sus componentes además del cumplimiento de normas técnicas de montaje teniendo como prioridad las condiciones de seguridad, calidad y medio ambiente dentro de su funcionamiento.

Considerando entonces que el avance de la técnica del acondicionamiento del aire ha hecho indispensable su aplicación en interiores industriales ya que por hoy existe una visión mundial de conservar el medio ambiente y una mayor productividad de manera económica, ecológica, segura y sobre todo calidad de funcionamiento la cual como solución se acoge a la tecnología de última generación, siendo entonces como objetivo brindar una solución basado en ingeniería electrónica bajo el control multivariable, aplicando un tipo de control automático permitiendo optimizar el proceso de control siendo necesario saber elegir, implementar, instalar, operar, programar y sustituir los diferentes equipos y componentes que permitan una mejora continua debido a que la electrónica y en particular la automatización y control, ayudan a cumplir dicho objetivo dando soluciones a diversos problemas que vive el hombre.

La tesis en mención: “DISEÑO E IMPLEMENTACION DE PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA PARA SISTEMA HVAC APLICANDO CONTROL MULTIVARIABLE CASCADA”, contiene capítulos los cuales a continuación se mencionan.

Capítulo I: Planteamiento del proyecto de investigación.

Capítulo II: Marco teórico.

Capítulo III: Análisis y diseño del prototipo de control de flujo y temperatura.

Capítulo IV: Funcionamiento y resultados.

El capítulo I analiza el problema, después se plantea la solución y luego se justifica el motivo de estudio del desarrollo de la presente tesis. El capítulo II se realizara el estudio del presente trabajo enfocado al proceso con su debido control y la instrumentación. En el capítulo III se explicara al detalle el análisis metódico, el análisis estadístico, la selectividad y el desarrollo de diseño del hardware y software de los componentes del Prototipo y el diseño de control multivariable. El capítulo IV se detalla la programación LADDER con el desarrollo del SCADA, la demostración de resultados plasmados en las gráficas de las señales resultantes del control multivariable y posteriormente las conclusiones con sus sugerencias y la respectiva bibliografía que ha sido tomada en cuenta para la ejecución de la presente tesis.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO DE INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del problema

La técnica del aire acondicionado es considerada como una ciencia y un arte, ya que en la misma se ponen en juego elementos de un nivel técnico avanzado que se combina con la capacidad y el ingenio del técnico o ingeniero que diseñará el sistema, para asegurar una óptima instalación que cumpla todos los requisitos exigidos por el propietario del inmueble.

En la industria actual existen sistemas de control de forma aisladas, desordenadas y poco eficientes permitiendo que exista bajos niveles de productividad y con altos índices de deterioro sobre los equipos que las contiene para lo cual se propone desarrollar un prototipo orientado al control multivariable que satisfaga las necesidad de solución frente al problema de la industria actual de manera eficiente y segura para lo cual la aplicación de sistemas automatizados de control y la debida instrumentación deba estar sujeta finalmente al cumplimiento de márgenes de estabilidad sobre los equipos sujetos a factores ambientales.

1.2 Descripción Del Problema

El avance de la técnica del acondicionamiento del aire ha hecho indispensable su aplicación en interiores industriales ;el aire acondicionado ciertamente no es un lujo como generador de comodidad, sino un requerimiento indispensable que contribuye a la preservación de la salud de las personas y una necesidad fundamental en el funcionamiento de equipos industriales susceptibles a cambios climáticos como cuartos de control de motores, cuartos de baterías, tarjetas electrónicas, sala de control de operaciones industriales, que ocasionan pérdidas y reducen el tiempo de vida útil de sus equipos afectando a la producción ya que actualmente existe una visión mundial de conservar los recursos que no genere residuos industriales y pueda mitigar el calentamiento global sin uso de químicos refrigerantes.

Actualmente dentro de la localidad no se encuentran disponibles sistemas de monitoreo y controles automáticos lo suficientemente eficientes en los sistemas de aire acondicionado (HVAC) en distintas empresas industriales ya que no se realizó un estudio para este propósito a fin de estar a la vanguardia de los avances electrónicos en la actualidad.

Se estudió ciertas técnicas de diseño de sistemas de control continuo basados en especificaciones tanto del período transitorio como del período estacionario, lo cual se observa el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, desde el momento en que se introduce una variable hasta cuando el sistema responde controlando una variable de salida para lo cual se diseñan compensadores que tengan un función deseada, como es el caso de controladores P, PI, PID además también existen las perturbaciones externas, que pueden actuar después que el sistema ya ha comenzado a funcionar y ya se encuentran en estado estacionario entonces se pretende desarrollar uno de los métodos de diseño de realimentación y compensación para disminuir el efecto de las perturbaciones externas en el sistema optándose por el control multivariable cascada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar el estudio, diseño e implementación del prototipo de control en sistema HVAC en modo calefacción basado en el control multivariable en cascada de flujo relacionado con otro de temperatura controlado vía PLC, con un sistema de supervisión y monitoreo SCADA.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Diseño del proceso de acondicionamiento de aire HVAC para nuestro caso en modo de calefacción.
- ✓ Análisis e instalación de circuitos de modulación de señales de control, dispositivos eléctricos e instrumentos de medición como flujómetro, sensor de temperatura y ventilador centrífugo acorde a especificaciones del sistema y fabricante.
- ✓ Instalación y programación del sistema de control en cascada haciendo uso del autómatas programable Micrologix 1200 de la marca Allen Bradley.
- ✓ Desarrollar una aplicación para la supervisión y monitoreo en base a un sistema SCADA.
- ✓ Verificación y calibración de los componentes del sistema y posteriormente realizar las pruebas respectivas para finalmente tener la plena seguridad del correcto funcionamiento de los lazos de control de la presente tesis.

1.4 Justificación del Estudio

Particularmente dentro de distintas empresas industriales actuales de las regiones locales costeras no se encuentran disponibles sistemas de monitoreo y controles automáticos lo suficientemente sofisticados para el control de sistemas de aire acondicionado calefactores en instalaciones antiguas ya que hasta el momento no se realizó un estudio exhaustivo para este propósito como en el caso de la empresa TMT que presta el servicio de mantenimiento de sistemas de aire acondicionado HVAC dentro de las instalaciones de la planta generadora ENERSUR donde se halló que muchas de las tarjetas electrónicas empezaba a presentarse dañadas y corroídas debido a factores ambientales por efectos del aire húmedo y la poca eficiencia de los sistemas de control por ser antiguos, aislados y poco ordenados pues estos últimos no disponen de la tecnología suficiente que dispongan automatismos de control óptimos que contienen componentes fuera de circulación del mercado y muchos casos no existencia stock de sus repuestos y con características técnicas similares que no pueden ser reemplazados ya que también la localidad de la termoeléctrica es una zona marítima con altos factores de humedad, salinidad y bajas temperaturas en temporada de invierno trayendo conjuntamente consecuencias hasta deterioro total de las tarjetas electrónicas por oxidación y muchos casos cortos circuitos y señales de control con mucho ruido ocasionando fallas y mal funcionamiento en los sistemas de planta. Debido a ello se consideró entonces proponer el desarrollo de una mejor alternativa de solución en control basado en las variables de temperatura y flujo de aire caliente siendo de necesidad el desarrollo de nuevas alternativas para una mejor eficiencia de funcionamiento del sistema de aire acondicionado de calefacción a menor costo para los cuartos de tarjetas electrónicas siendo indispensable su funcionamiento en la planta.

Finalmente como tema principal de este proyecto se analiza al detalle el control multivariable cascada, también se analiza la instrumentación utilizada dentro del lazo de control y los diversos aspectos de los autómatas programables, por los que se pondrá en marcha el presente trabajo y después se analiza los diferentes tipos de sistemas de aire

acondicionado y su correspondiente comportamiento en el dominio del tiempo, finalmente se ha de implementar el prototipo del sistema HVAC.

1.5 Hipótesis

Se realizara el diseño y la implementación del prototipo de HVAC aplicando control multivariable cascada bajo el análisis de dos variables de flujo y temperatura, a su vez se pretende desarrollar sistema de monitoreo y supervisión bajo la plataforma SCADA la cual proporciona las ventajas del control por ordenador pero con más seguridad y flexibilidad posibilitando la integración de elementos de control íter-conexionados y controlados vía PLC mostrando el comportamiento de los procesos de aire acondicionados típicos totalmente automatizados.

1.6 Alcances

El presente trabajo permitirá diseñar y establecer parámetros de implementación del sistema automático mediante control multivariable cascada, monitoreado por SCADA con su respectivo montaje e instalación de equipos, componentes, que permitirá que el sistema HVAC pueda mejorar y adaptarse para futuras modificaciones además del cableado, protección de cables y conexionado de terminales que por lo que el proyecto pretende dar soluciones ofreciendo mejor calidad de funcionamiento de sistemas HVAC en ambientes cerrados.

También se analiza la instrumentación del tipo sensórica y actórica y detalles técnicos de los componentes eléctricos y mecánicos del sistema y software de supervisión y monitoreo para el control del mismo a su vez su debida sintonización de parámetros y puesta en marcha de la planta, facilitando así entonces para su aprendizaje respetando las debidas normas y estándares de diseño que pueda ser moderno, confiable, sencillo, eficaz

y susceptible a modificaciones. Por lo tanto, con este diseño se pretende lograr un control total del proceso de acondicionamiento de aire.

1.7 Instrumentos de Verificación

El Sistema de acondicionamiento de aire controlado automáticamente son verificados por medio de instrumentos de medición de temperatura y flujo en la zona a medir la cual proporcionará los datos de las variables de cambios climáticos y que finalmente puedan ser muestreadas por medio de un software de adquisición, monitoreo y supervisión de datos SCADA y controlado vía PLC.

Posteriormente se analizará y sintonizará los componentes de regulación y señales de salida de los dos lazos cerrados de control de flujo y temperatura para que luego puedan estar a disposición de la programación de la lógica y parámetros establecidos de control mediante el uso del software RSTune de Rockwell que finalmente se pondrá en marcha para su funcionamiento.

Una vez que la red del sistema de control este instalada y operativa, ha de ser puesta en marcha para lo cual confirmaremos de esta manera las señales de entrada y salida en tiempo continuo para que puedan ser analizadas por medio del comportamiento del sistema monitorizadas en el SCADA tomándose posteriormente también las medidas de seguridad empleadas para evitar y suprimir posibles errores como también contrastar la señal eficazmente y la veracidad de flujo de los datos.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1- Introducción a los Sistema HVAC.

El Sistema de acondicionamiento de aire (HVAC) por siglas en ingles Heating, Ventilating and Air Conditioning, expresión en la que aparecen tres conceptos de ventilación, calefacción y aire acondicionado se entiende exclusivamente como refrigeración y calefacción que para nuestro caso será un sistema de ventilación artificial tipo calefacción la cual regula las condiciones ambientales en interiores de baja temperatura.

La Calefacción es un proceso de tratamiento de aire que transportan el calor o energía térmica, y pueden ser: agua, aire o un fluido refrigerante que llega a su destino para ser climatizado finalmente. En nuestro caso el aire es el fluido que se trata de acondicionar y el cual mediante su paso por la resistencia calorífica de radiación se combina y convierte entonces en un fluido portador de Calor.

Los elementos del sistema HVAC tiene como primer lugar la generación de energía térmica por medio de una resistencia calorífica luego su transporte primario de la energía térmica a través del flujo de aire de ventilación la cual será aplicada para climatizar a modo de calefacción por medio de irradiación por resistencia calorífica bajo el principio del efecto de Joule que esta a su vez ira siendo regulada automáticamente. Por último el fluido tratado pasa por un

transporte de tipo secundario por medio de conductos adecuados para llevarlo finalmente a su destino a climatizar.

2.2- Sistemas De Control Automático

El control automático es parte del progreso de la industria desarrollado durante las épocas de la segunda revolución industrial como actualmente se conoce lo cual empieza el estudio intensivo de la ciencia de control automático la cual es producto de una evolución que en consecuencia proviene de las técnicas de medición y control. Su estudio intensivo ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas.

La mayoría de los controles automáticos industriales usan como fuentes de potencia la electricidad o un fluido a presión que puede ser aceite o aire. Se pueden clasificar los controles automáticos según el tipo de fuente de energía usada en su funcionamiento ya sea provenientes de controles neumáticos, hidráulicos o electrónicos lo cual depende de la naturaleza de la planta y sus condiciones de funcionamiento, inclusive consideraciones de seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

Se considera entonces que el principio del control automático mediante el empleo de una realimentación de medición para accionar un mecanismo de control, se usa en diversos campos, como control de procesos químicos y del petróleo, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas, siendo un sistema de manera simplificada y cómoda de entender la cuales originada en un principio desde el uso computadoras analógicas y digitales que dieron la posibilidad de la aplicación de ideas de control automático enfocados en sistemas físicos que emplean elementos de control automáticos industriales.

2.3- Definición De Control Automático

El control automático es la acción de mantener un valor deseado dentro de un rango o condición comparando el valor existente con el valor deseado y por medio de la diferencia entre ambos valores se proceder a reducirla. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana.

El lazo de control realimentado se conoce como el elemento de control más importante entendiéndose que el primer lazo de realimentación fue empleado por James Watt en 1774 para el control de la velocidad de las máquinas de vapor. A pesar de conocerse la conceptualización de su funcionamiento, los lazos no se desarrollaron en su totalidad hasta los 1940s la cual se emplearon en sistemas de transmisión neumática siendo comúnmente usados en aquel entonces, a medida que los años pasaban se comenzó un extenso estudio y desarrollo en la teoría y aplicación de los lazos realimentados de control. En la actualidad los lazos de control son un elemento esencial para la manufactura económica y prospera de virtualmente cualquier producto, desde el acero hasta los productos alimenticios. A pesar de todo, este lazo de control que es tan importante para la industria está basado en algunos principios entendibles de sistemas automáticos.

Basándonos en el comportamiento de los sistemas de control podemos clasificarlos como control lazo abierto y de control lazo cerrado.

2.3.1- Control Lazo Abierto

Los sistemas de control de lazo abierto son sistemas de control en los que la salida no tiene efecto sobre el controlador entendiéndose que no se mide ni se realimenta para que sea ajustada o comparada con el valor de consigna. La Figura.2.1 muestra la relación entrada-salida de tal sistema. Un ejemplo práctico es la máquina de lavar, las cuales acciones el remojo, lavado y enjuague en la máquina de lavar se cumplen sobre una base de tiempos. La máquina no mide la señal de salida, es decir, la limpieza de

la ropa. Por tanto, para cada entrada de referencia corresponde una condición de operación fijada.



Fig. 2.1 Sistema de control de lazo abierto.
Fuente: Elaboración Propia

2.3.2- Control Lazo Cerrado

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la señal de salida tiene efecto directo sobre el controlador la cual su salida realimenta por medio de un lazo de medición que se emplea para medir la variable y posteriormente es llevada para ser comparada con la señal de consigna teniéndose entonces la diferencia y finalmente se propone en reducirla y mantenerla estabilizada por medio de un actuador que regula la señal y llevar la señal de salida del sistema al valor deseado.

En otras palabras, el término lazo cerrado implica el uso de acción de realimentación para reducir el error del sistema .Ver figura 2.2.

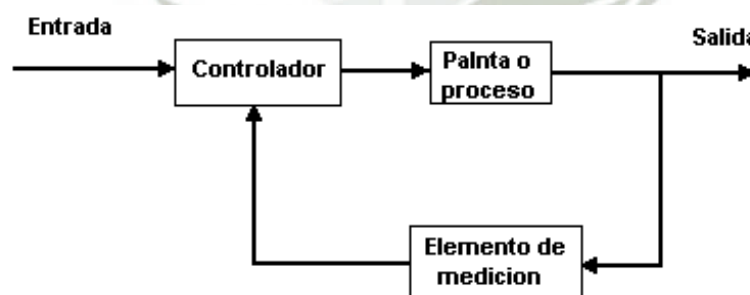


Fig. 2.2 Sistema de control de lazo cerrado.
Fuente: Elaboración Propia

Actualmente se conoce cuatro elementos básicos de cualquier sistema de control: el elemento medidor, el elemento controlador, el valor establecido y el elemento Actuador.

El elemento o instrumento medidor proporciona un valor de la variable en unidades de medida que es convertida a una señal adecuada para ser procesada por medio de detección o sensado y posteriormente proporcionarla al controlador. Equivale a los sentidos del sistema como por ejemplo ojos, oídos, tactos del sistema.

El elemento controlador es el sitio donde se toman todas las decisiones sobre las acciones a tomar basadas de acuerdo a los requerimientos establecidos. Los valores de consigna son introducidos en el sistema por el operador.

El elemento actuador es el lugar donde se realiza la acción de regulación de las variables que influyen en el comportamiento del proceso ejecutando acciones físicas en proporción a los valores de control establecidos por el controlador llevando al sistema a un comportamiento óptimo y estabilizado.

2.4 Tipos De Sistemas De Control

Cada tipo de sistema de control permite diferente tipo de respuesta ocasionando un comportamiento que más se ajuste al valor establecido las cuales se detallan cada una de ellas a continuación.

2.4.1 Control de dos posiciones o de si-no.-

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento Actuador tiene solamente dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente conectados y desconectados. El control de dos posiciones o sí-no es relativamente simple y económico y por esta razón ampliamente utilizada en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Sea la señal de salida del control $m(t)$ y la señal de error actuante $e(t)$. En un control de dos posiciones, la señal $m(t)$ permanece en un valor máximo o mínimo, según que la señal de error actuante sea positiva o negativa ver figura 2.3

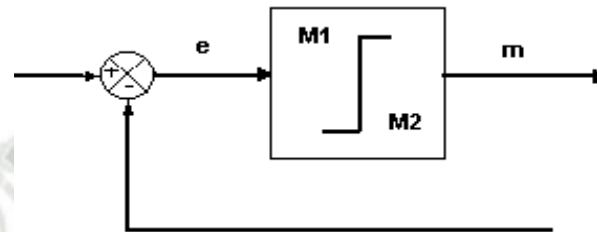


Fig. 2.3 Diagrama de bloques de un control si-no
Fuente: Elaboración Propia

2.4.2 Control proporcional

Para un control de acción proporcional, la relación entre la salida del controlador y la señal de error actuante es esencialmente un amplificador con ganancia ajustable donde K_p se denomina sensibilidad proporcional o ganancia.

En la Fig. 2.4 se puede ver un diagrama de bloques del control.

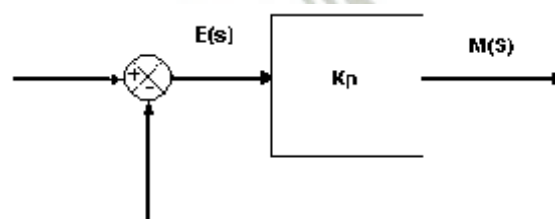


Fig. 2.4 Diagrama de bloques de un control proporcional.
Fuente: Elaboración Propia

2.4.3 Control integral

En un control con acción integral, el valor de salida del controlador varía proporcionalmente a la señal de error. Si se duplica el valor *del* error, el valor de la señal de salida de control varía dos veces más rápido en cambio para un error actuante igual a cero, el valor *de* la señal de salida de control se mantiene estacionario. La acción de control integral recibe a veces el nombre de control de reposición. La Fig.2.5 muestra un diagrama de bloques de este control.

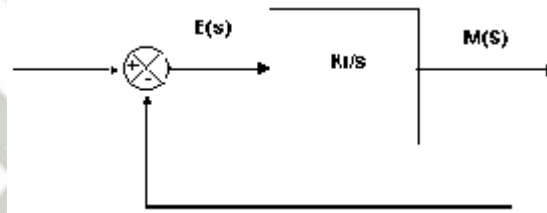


Fig. 2.5 Diagrama de bloques de control integral.
Fuente: Elaboración Propia

2.4.4 Control proporcional e integrativo (PI)

La acción integrativa permite que no exista un error de régimen estacionario en la respuesta a escalón del sistema. Al aplicar esta acción, se puede dar el caso de que la señal de salida de control tenga un valor diferente de cero cuando el error estacionario es cero.

Para la obtención de este tipo de acción se añade a la parte proporcional el resultado de integrar la señal de error habiendo afectando la con una cierta constante denominada constante de integración.

Tanto K_p como T_i son regulables donde K_p representa la sensibilidad proporciona lo ganancia y el tiempo integral T_i regula la acción de control integral. A la inversa del tiempo integral T_i , se la llama frecuencia de

reposición. La frecuencia de reposición es el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La frecuencia de repetición se mide en términos de repeticiones por minuto. La Fig. 2.6 muestra un diagrama de bloques de un control proporcional e integral. La acción de control proporcional e integral queda definida por el siguiente diagrama de bloques.

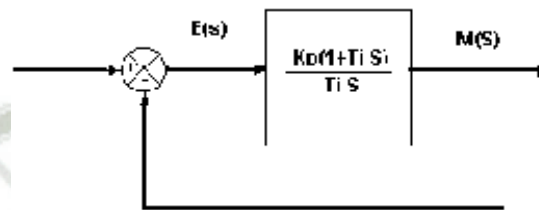


Fig. 2.6 Diagrama de bloque de un control proporcional e integral
Fuente: Elaboración Propia

2.4.5 Control Proporcional –Integral - Derivativo (PID).

Este controlador proporciona cada una de las ventajas de los controladores anteriormente mencionado siendo la combinación de los efectos de acción proporcional, acción de control derivativa y acción de control integral, se llama acción de control proporcional, derivativa e integral. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales donde K_p representa la sensibilidad proporcional, T_d el tiempo derivativo y T_i , el tiempo integral. En la Fig.2.7 se puede ver el diagrama de bloques de un control proporcional, derivativo e integral.

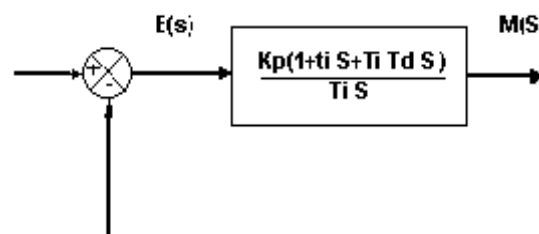


Fig. 2.7 Diagrama de bloques de un control proporcional, derivativo e integral
Fuente: Elaboración Propia

2.4.6 Control de Sistemas Multivariantes

El control multivariable es la acción de control que permite mantener dos o más valores de medida en valores deseados. Los sistemas de control que se han analizado en esta sección se caracterizan por tener una sola salida. El controlador tiene múltiples variables de entrada y una señal de salida de Control. Cuando a la planta hay que aplicar más de una variable de control, entonces el controlador a diseñar será de múltiples entradas-múltiples. A este tipo de controlador se le denomina control multivariable.

Este control puede considerar estrategias de modelado de múltiples entradas-múltiples salidas ya sea en modo directo e inverso.

Mediante el cual tiene una salida afecta a múltiples variables de entrada y viceversa una entrada afecta a múltiples salidas de control de acuerdo a ello se observa diferentes tipos de estructuras que se muestran a continuación.

A. Control En Cascada:

El control en cascada consiste en que la salida de un controlador es el punto de ajuste para otro controlador, por lo que el control cascada involucra lazos de realimentación que estén ordenados uno dentro del otro que permiten eliminar el efecto de algunas perturbaciones haciendo la respuesta de regulación del sistema más estable y más rápida y también mejora la dinámica del lazo de control y seguidamente el controlador secundario permite atenuar el efecto de la perturbación antes de afectar considerablemente la salida del controlador para producir una estabilidad más exacta en la operación

Esta estructura tiene dos lazos:

- Un lazo primario con un controlador primario $K_1(s)$, y
- Un lazo secundario con un controlador secundario $K_2(s)$.

El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria Incrementando la capacidad de producción.

Las consideraciones que se toman principalmente para la implementación de control en cascada son una cuestión importante ya que se debe de encontrar la variable secundaria controlada más ventajosa la cual la hace tan importante en un sistema de control ya que debe contener en su lazo de control perturbaciones más serias y actúen tan rápido como sea posible incluyendo solamente los menores retrasos del sistema y que estén directamente relacionados a los valores de la variable primaria permitiendo al controlador secundario operar a la ganancia más alta posible la cual se ordena de la siguiente manera según la figura 2.8.

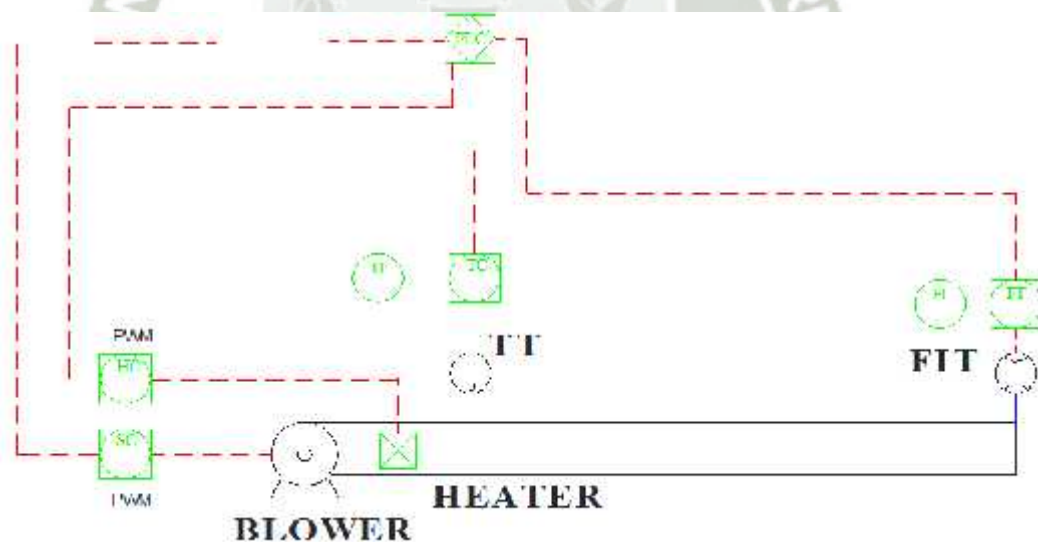


Figura 2.8 Diagrama De Planta Tipo Control Cascada
Fuente: Elaboración Propia

Para la aplicación del sistema de control multivariable cascada que se va a aplicar en el prototipo de control de flujo y temperatura, se propone el siguiente lazo de control según la figura 2.9.

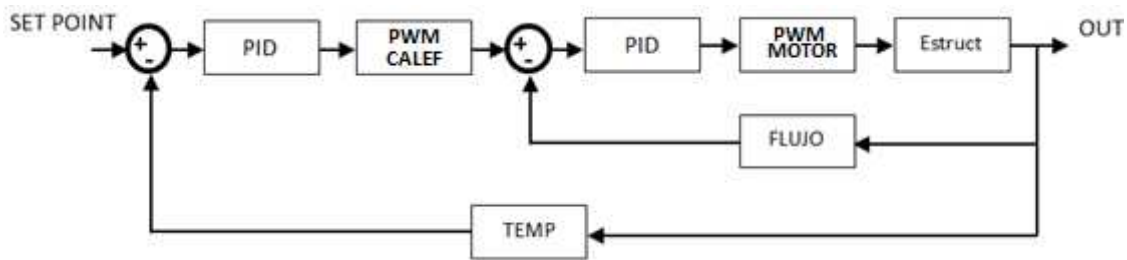


Figura 2.9 Diagrama Del Lazo De Control En Cascada
Fuente: Elaboración Propia

Básicamente el esquema de control en cascada es un lazo de realimentación dentro de otro lazo de realimentación, donde el lazo interno debe ser más rápido que el externo para hacer al sistema lo más insensible posible a las perturbaciones.

Existe actualmente dos tipos de arquitectura que se trabajan actualmente para el control multivariable cascada que son en serie y paralelo para nuestro caso emplearemos el tipo serie.

B. Control en Serie.

A continuación en la siguiente figura la variable manipulada tiene dominio sobre la variable a controlar la cual se denomina en serie ya que “u” afecta a una variable intermedia “ y_i ” y a su vez afecta a la variable que se desea controlar “y” tal como se muestra en la Figura 2.10.

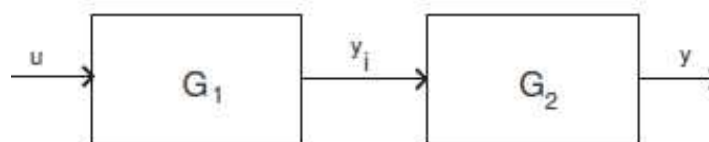


Figura 2.10 Sistema en Serie
Fuente: Elaboración Propia

El objetivo fundamental de diseñar un control multivariable es definir las entradas del controlador y adaptarlas de forma de que se consiga las salidas de las señales de control tenga como referencia para cada salida.

2.5.- Características de un Sistema de Control

- a) **Señal de Corriente de Entrada:** Considerada como estímulo aplicado a un sistema desde una fuente de energía externa con el propósito de que el sistema produzca una respuesta específica.
- b) **Señal de Corriente de Salida:** Respuesta obtenida por el sistema que puede o no relacionarse con la respuesta que implicaba la entrada.
- c) **Variable Manipulada:** Es el elemento al cual se le modifica su magnitud, para lograr la respuesta deseada. Es decir, se manipula la entrada del proceso.
- d) **Variable Controlada:** Es el elemento que se desea controlar. Se puede decir que es la salida del proceso.
- e) **Conversión:** Mediante receptores se generan las variaciones o cambios que se producen en la variable.
- f) **Variaciones Externas:** Son los factores que influyen en la acción de producir un cambio de orden correctivo.
- g) **Fuente de Energía:** Es la que entrega la energía necesaria para generar cualquier tipo de actividad dentro del sistema.
- h) **Retroalimentación:** La retroalimentación es una característica importante de los sistemas de control de lazo cerrado.

La representación de los problemas en los procesos de sistemas de control se lleva a cabo mediante las representaciones básicas o modelos:

- Diagramas en bloque y gráficas en flujo de análisis.
- Ecuaciones diferenciales, integrales, derivadas y otras relaciones matemáticas.

A partir del análisis de las características de los elementos de control se pone a disposición la selectividad de sus componentes del sistema bajo los métodos de diseño de control las cuales son:

- a) Diseño por análisis: Modifica las características de un sistema y sus componentes a partir de un modelo estándar.
- b) Diseño por síntesis: Define la forma del sistema a partir de las consideraciones del proceso.

2.6. Instrumentación Industrial

2.6.1. Definición de Instrumentación

La instrumentación se define como el conjunto de elementos que sirven para medir, controlar o registrar variables de un proceso con el fin de optimizar los recursos dentro de un proceso.

En otros términos son un grupo que transforman una variable física de interés, que se denomina variable medida, en una forma apropiada para registrarla o visualizarla o simplemente detectarla, llamada medición o señal medida. El elemento fundamental de un sistema de instrumentación, es el elemento sensor el cual es un elemento físico que está sujeto a un principio basado en un fenómeno natural para sensar la variable y seguidamente el transductor, convierte esta variable sensada en un valor de señal detectada, la cual es de origen eléctrico, mecánico, óptico, neumático, etc. Este valor detectado posteriormente es fácilmente cuantificado.

2.6.2. Característica De Los Instrumentos

Conforme a las normas SAMA (Scientific Apparatus Makers Association), PMC20, las características de mayor consideración para los instrumentos son:

2.6.2.1 Campo De Medida O Rango (Range)

Es el conjunto de valores dentro de los límites superior e inferior de medida, en los cuales el instrumento es capaz de trabajar en forma confiable. Por ejemplo, un termómetro de mercurio con rango de 0 a 50 grados celsius

2.6.2.2 Alcance (Span)

Es la diferencia entre el valor superior e inferior del campo de medida. Para el caso del termómetro del ejemplo anterior, el Span será de 50 grados Celsius.

2.6.2.3 Error

Es la diferencia que existiría entre el valor que el instrumento indique que tenga la variable de proceso y el valor que realmente tenga esta variable en ese momento.

2.6.2.4 Precisión

Esto es la tolerancia mínima de medida que permitirá indicar, registrar o controlar el instrumento. En otras palabras, es la mínima

división de escala de un instrumento indicador. Generalmente esta se expresa en porcentaje (%) del Span.

2.6.2.5 Zona Muerta (Dead Band)

Es el máximo campo de variación de la variable en el proceso real, para el cual el instrumento no registra ninguna variación en su indicación, registro o control.

2.6.2.6 Sensibilidad

Es la relación entre la variación de la lectura del instrumento y el cambio en el proceso que causa este efecto.

2.6.2.7 Repetibilidad

Es la capacidad de un instrumento de repetir el valor de una medición, de un mismo valor de la variable real en una única dirección de medición.

2.6.2.8 Histéresis

Similar a la repetibilidad, pero en este caso el proceso de medición se efectuara en ambas direcciones

2.6.2.9 Campo De Medida Con Supresión De Cero

Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por encima del cero real de la variable.

2.6.2.10 Campo De Medida Con Elevación De Cero

Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por debajo de cero de las variables

2.6.3. Clasificación De Los Instrumentos

La forma de clasificar los instrumentos son:

- a.- De acuerdo a su función en el proceso.
- b.- De acuerdo a la variable de proceso que miden.

De acuerdo a su función estos se agrupan en:

- Instrumentos indicadores: son aquellos que indican directamente el valor de la variable de proceso. Ejemplos: manómetros, termómetros, etc.
- Instrumentos ciegos: son los que regulan valores en el proceso, pero no muestran nada directamente. Ejemplos termostatos, presostatos, etc.
- Instrumentos registradores: Son los que registran variables en un determinado proceso.
- Elementos primarios: Elementos que entran en contacto directo con la variable de proceso que se desea medir, con el fin de recibir algún efecto sobre este la cual pueden evaluar la variable en cuestión. (placa orificio)
- Transmisores: Elementos que reciben la variable de proceso a través del elemento primario, y la transmiten a algún lugar remoto ya sea para su procesamiento en

control. Estos transmiten las variables de proceso en forma de señales proporcionales a esas variables.

- **Transductores:** Instrumentos que no en contacto con el proceso pero si son capaces de realizar operaciones lógicas y/o matemáticas con las señales de salida de uno o más transmisores.
- **Convertidores:** Generalmente la señal de salida de un transmisor para ser compatible con su receptor se utiliza un elemento convertidor entre ellos para lograr finalmente la compatibilidad de señal
- **Receptores:** Son instrumentos que generalmente son instalados en el panel de control, como interface entre el proceso y el hombre. Estos reciben la señal de los transmisores o de un convertidor.
- **Controladores:** Es el elemento más importante del sistema de control, ya que el instrumento será el encargado de enviar al controlador (PLC) la información del proceso por medio de sus señales, de tal manera que el controlador (PLC) pueda comparar datos que realmente se desea y que suceda en él, para posteriormente, diferenciar y enviar una señal al proceso que tienda a corregir las desviaciones de sus variables.
- **Elemento final de control:** Finalmente será este elemento que recibirá la señal de control del controlador y quien estando en contacto directo con el proceso y ejerza un cambio en el, de tal forma que se cambien los parámetros hacia el valor deseado. Ejemplo: válvulas de control, compuertas, dampers, etc.
- **De acuerdo a la variable de proceso que miden:** Esta clasificación, como su nombre lo indica, se refiere a la variable de proceso que tratemos de medir. En la actualidad, se pueden medir, casi sin excepción, todas las variables de proceso existentes, sin embargo, algunas se medirán de forma directa y otras indirectamente.

2.6.4. Medidores De Flujo

Los medidores de flujo son instrumentos utilizados para determinar la cantidad de flujo volumétrico y/o másico que pasa a través del área transversal de una tubería o en este caso ducto de aire. Otros nombres con los cuales suelen llamarse son: Flujómetro, caudalímetro o medidores de caudal.

Los sensores de caudal recogen las velocidades del flujo de aire o líquidos. Los sensores de caudal usan diferentes principios de medición. Los sensores de caudal para líquidos funcionan por ejemplo sobre la base de ultrasonidos.

Esta medición sin contacto tiene la ventaja que los sensores no están expuestos a golpes de ariete y medios sólidos. Por otro lado, los sensores de caudal son utilizados en el sector de calefacción, ventilación y climatización para el análisis de la velocidad del aire.

Las Mediciones que usan el principio manométrico de una película térmica permiten trabajar en un amplio rango de temperatura y caudal. Los sensores de caudal de la serie EE 75 permiten determinar la velocidad del aire hasta 40 m/s con temperaturas hasta 120 °. Estos sensores de medición finalmente se pueden montar en conductos de ventilación.

2.6.4.1 Clasificación de medidores de Flujo

A. Medidores De Caudal Másico

Examina las unidades de medida de flujo másico. La tasa de flujo másico mide la masa por unidad de tiempo, por lo que la unidad estándar de medida para la velocidad de flujo másico es el kilogramo por segundo (kg/s).

- ✓ **Térmico:** Diferencia de temperaturas en dos sondas de resistencia
- ✓ **Fuerza de Coriolis:** Tubo en vibración

B. Tipos de medidores volumétricos

Se clasifica por la adquisición de unidades de medida de la tasa del flujo volumétrico.

La tasa de flujo volumétrico mide el volumen por unidad de tiempo, por lo que su unidad estándar de medida es metros cúbicos por segundo (m^3/s).

✓ De presión diferencia

Placa orificio

Tobera

Tubo venturi

Tubo pitot

Tubo annubar

✓ De área variable

Rotámetro

✓ De velocidad

Caudalímetro de turbina

Caudalímetro ultrasónicas

✓ De Fuerza

Placa de impacto

✓ De desplazamiento positivo

Caudalímetro de disco oscilante

Caudalímetro de pistón oscilante

Caudalímetro de pistón alternativo

Caudalímetro rotativo

Caudalímetro de paredes deformables.

✓ **De torbellino**

Medidor de frecuencia de termistancia, o condensador o ultrasonidos

✓ **Oscilante**

Válvula oscilante

✓ **De tensión inducida**

Caudalímetro magnético

Otra manera de medir los canales de velocidad del aire es a través de sensores en cruz. Estos tienen como señal de salida una presión diferencial, que es proporcional a la velocidad del flujo de aire. Con la ayuda de las unidades de análisis conectadas (sensores de presión diferencial) permite calcular la velocidad del flujo de aire y el volumen de flujo.

2.6.4.2 Caudalímetro de Turbina

Es un medidor de flujo tipo volumétrico que se utiliza para medir fluidos en conductos cerrados por lo que también el flujo de aire está en función de la potencia del motor y sus revoluciones por minuto “RPM”

Tipos de Caudalímetros por turbina:

✓ **Ópticos:**

✓ **Magnéticos:**

Tipo reluctancia

Tipo inductancia

- ✓ Mecánicos.
- ✓ Eléctricos.

2.6.4.3. Principio de Funcionamiento

Un flujómetro de turbina consiste en un rotor con hélices que está suspendido en la corriente de fluido sobre cojinetes que giran libremente por el paso del flujo que impacta contra las cuchillas del rotor que causa la rotación del rotor haciéndola girar sobre su eje. La velocidad de rotación es directamente proporcional a la velocidad de la corriente del fluido lo cual es registrada por el sensor en nuestro caso es eléctrico y después emite una señal de salida en forma de tensión o voltaje dentro de su rango lineal.

La salida eléctrica es generada utilizando el principio de reluctancia en el cual la señal de salida es generada por el paso del rotor de la turbina en proximidad a su estator o bobina cercana de la turbina a su vez la tasa de rotación del rotor es directamente es proporcional a la tasa del flujo que pasa en el ducto.

A diferencia de fluidos líquidos se reduce grandemente la torsión motriz (torque) por la baja densidad del aire como la siguiente figura 2.11.

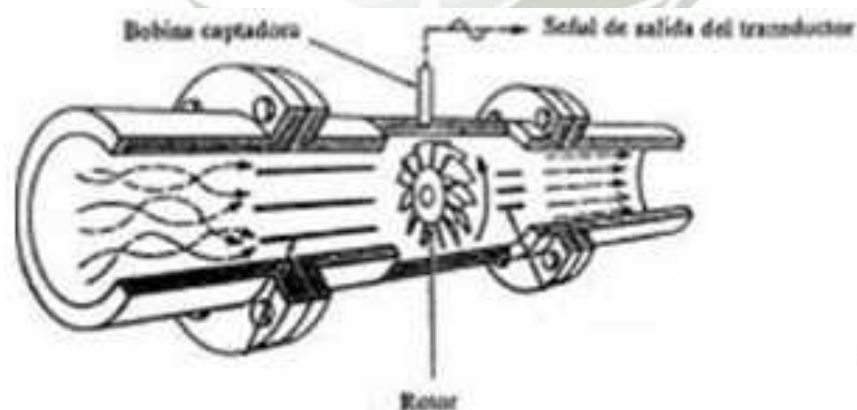


Figura 2.11 Funcionamiento Caudalímetro eléctrico Tipo turbina

Fuente: <http://www.industriaynegocios.cl>

2.6.4.4 Características de Flujo de Aire.

A. Número de Reynolds

Es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido a través de su comportamiento producto del diámetro del ducto por la velocidad del flujo e inversamente proporcional por la viscosidad del fluido mediante la cual podemos determinar la velocidad del fluido y el diámetro del ducto desarrollado por Osborne Reynolds en 1851.

Para un fluido que circula por el interior de un conducto circular recto, el número de Reynolds viene dado por la ecuación.2.1.

$$Re = \frac{v_s D}{\nu}$$

- v_s : Velocidad característica del fluido
- D : Diámetro del Conducto.
- ν : Viscosidad cinemática del fluido

Ec.2.1 Número de Reynolds

Fuente: <http://www.industriaynegocios.cl>

Finalmente cuando el número de Reynolds se encuentra por debajo de 2100 se sabe que es laminar y el intervalo entre 2100 y 4000 es flujo de transición y para mayores valores de 4000 es flujo turbulento como indica la figura 2.12.

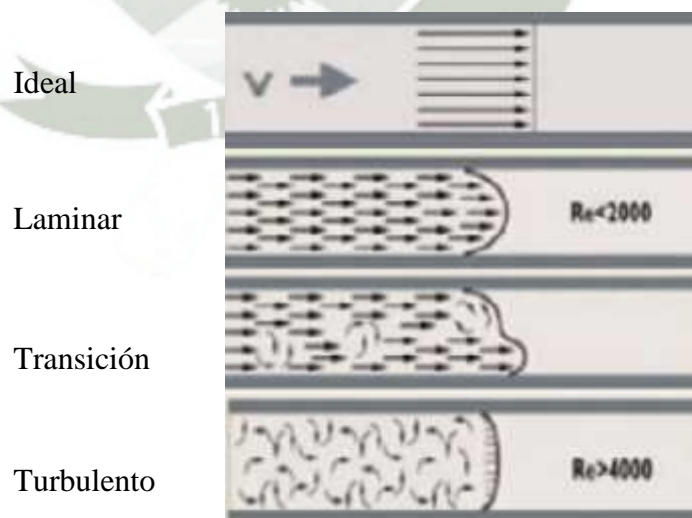


Figura 2.12 Comportamientos del Flujo de Aire

Fuente: Fuente: <http://www.industriaynegocios.cl>

En ocasiones se determina experimentalmente un coeficiente de corrección que nos permite obtener la velocidad media por la expresión:

$$V_{media} = \text{Coeficiente} \cdot V_{m\acute{a}xima}$$

El coeficiente es igual a 0.925 lo cual podremos calcular la velocidad media y su caudal:

$$V_{media} = 0.925 \cdot V_{m\acute{a}xima}$$

El caudal es finalmente determinado por el producto de la velocidad media y el área transversal del conducto.

$$\text{Caudal} = V_{media} \times \text{Área transversal del conducto.}$$

Finalmente obtenemos la medición del Flujo lo cual es igual al caudal.

2.6.4.5. Montaje o posicionamiento de medidor de Flujo.

En general, la velocidad en un conducto es una línea de corriente que depende de su posición radial que idealmente tiene una máxima velocidad en el centro del conducto y cero en las paredes del mismo, dependiendo de la condición de régimen laminar o turbulento del flujo.

Para el cálculo del caudal en el régimen laminar nos interesa la velocidad media que idealmente es la velocidad constante a lo largo del radio del conducto la cual nos proporcionará finalmente el caudal.

Si colocamos el instrumento en el centro del conducto, estaremos determinando la velocidad máxima siendo conformidad los tramos en la tabla 2.1.

A. Acoplamiento entre secciones

TRAMO DE CONDUCTO RECTO	TRAMO DE SENSOR TURBINA
1 x DN	1x DN
DN = Diámetro nominal	

Tabla 2.1 Medida entre Conducto y tramo de sensor
Fuente: Elaboración Propia.

2.6.5 Medidores de Temperatura.

Definimos a la temperatura como el movimiento o el grado de agitación térmica de las moléculas.

La medición de temperatura constituye una de las medidas más comunes e importantes que se efectúan en los procesos industriales. La calidad de los productos depende grandemente de su exacta medición y control.

Las limitaciones del sistema de medición empleado quedan definidas por la precisión, la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor y por el tipo de instrumento controlador necesarios. Los instrumentos de medición de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura de difícil adquisición de datos lo cual fue desarrollándose en una estructura estadística cuya exactitud puede verse afectada por la masa térmica, el tiempo de medida, el ruido eléctrico y los algoritmos de medida para hacer del dispositivo de medición más exacto aún en condiciones óptimas.

2.6.5.1. Escalas de Temperatura

En la actualidad se emplean diferentes escalas de temperatura; entre ellas está la escala celsius también conocida como escala centígrada, la escala fahrenheit, la escala kelvin, la escala rankine que son definidas para la medición de temperatura como la figura 2.13.

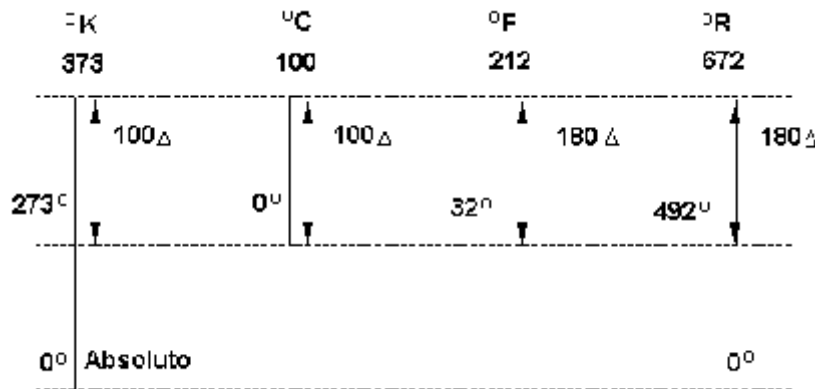


Figura 2.13 escalas de Temperaturas

Fuente: <http://www.unet.edu.ve/>

En la escala celsius, el punto de congelación del agua equivale a 0°C y su punto de ebullición a 100°C. Esta escala se utiliza en la mayoría en registro de temperatura en la actualidad la cual a comparación de la escala Fahrenheit se emplea en los países anglosajones de uso no científico.

2.6.5.2. Clasificación de Medidores de Temperatura.

Entendiendo las ventajas y los inconvenientes de los diversos enfoques que existen para medir la temperatura, resultará factible realizar una comparación de los cuatro tipos más importantes de sensores de temperatura.

Los transductores eléctricos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y entre los cuales figuran:

Dispositivos Electrónicos de Medición de Temperatura:

- RTD: Mide la variación de resistencia en un conductor de material de Platino, níquel o aleaciones de níquel.
 - ✓ RTD de dos hilos.
 - ✓ RTD de tres hilos.
 - ✓ RTD de cuatro hilos.

- Termistor: Mide la variación de resistencia de un semiconductor.
 - ✓ NTC: Coeficiente de temperatura negativo.
 - ✓ PTC: Coeficiente de temperatura positivo.
- Termopar: Llamado también termocupla que produce una diferencia de potencial en mili voltios en función de la diferencia de temperatura entre el punto caliente y el otro punto frío como referencia.
- ✓ **Tipo K:** Tienen un rango de temperatura de -200 °C a $+1372\text{ °C}$ y una sensibilidad $41\text{ }\mu\text{V/°C}$ aproximadamente. Posee buena resistencia a la oxidación.
- ✓ **Tipo E:** Ideales para el uso en bajas temperaturas, en el ámbito criogénico. Tienen una sensibilidad de $68\text{ }\mu\text{V/°C}$.
- ✓ **Tipo J:** Su rango es de $-270/+1200\text{ °C}$. Se usa en atmósferas inertes, reductoras o en vacío su inconveniente es la rápida oxidación que sufre, encima de 550 °C ; y por debajo de 0 °C causa condensación de vapor de agua sobre el hierro.
- ✓ **Tipo T:** Ideales para mediciones entre -200 y 260 °C . Resisten atmósferas húmedas, reductoras y oxidantes y son aplicables en criogenia. El tipo termopares de T tiene una sensibilidad de cerca de $43\text{ }\mu\text{V/°C}$.
- ✓ **Tipo N:** Ideal para mediciones de alta temperatura con gran estabilidad y resistencia a la oxidación de altas temperaturas, y no necesita del platino utilizado en los tipos B, R y S, que son más caros.

Por otro lado, los termopares tipo B, R y S son los más estables, pero debido a su baja sensibilidad ($10\text{ }\mu\text{V/°C}$ aprox.) generalmente son usados para medir altas temperaturas (superiores a 300 °C).
- ✓ **Tipo B:** Adecuados para medición de altas temperaturas superiores a 1800 °C .
- ✓ **Tipo R:** Adecuados para medición de temperaturas hasta 1300 °C de baja sensibilidad ($10\text{ }\mu\text{V/°C}$) y elevado precio.
- ✓ **Tipo S:** Ideales para mediciones de altas temperaturas hasta los 1300 °C , de baja sensibilidad ($10\text{ }\mu\text{V/°C}$) con elevado precio y elevada estabilidad utilizado para la calibración universal del punto de fusión del oro ($1064,43\text{ °C}$).

Dispositivos Pirometricos de Medición de Temperatura:

- Pirómetros de radiación: Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo.
- Pirómetros ópticos: basados en la brillantez de un objeto caliente.
- Pirómetros de radiación: miden el índice de emisión de energía por unidad de área.

Dispositivos Mecánicos de Medición de Temperatura:

- Medición de temperatura por dilatación/expansión
 - ✓ Termómetros bimetálicos: Está compuesto de dos o más metales unidos entre sí tendiendo a cambiar de curvatura cuando se somete a una variación de temperatura debido a la diferencia de coeficientes de temperatura de los materiales.
 - ✓ Termómetros llenos a presión de Gas: Compuesto por un bulbo o ampolla que contiene un gas o un líquido que cambia su volumen en función de la temperatura por medio de un tubo capilar al tubo de bourdon u otro dispositivo sensible a la presión y el volumen.
 - ✓ Termómetros de líquido en capilares de vidrio
 - Los totalmente hechos de vidrio (de cuello grabado o de escala cerrada).
 - De tubo y escala.
 - Industriales: Dispositivo de medición para el control manual y en laboratorios de control.

Los termistores tienen coeficientes de temperatura negativos grandes que no son constantes lo cual el cambio de resistencia por unidad de cambio de temperatura es mucho mayor que para el metal puro inversamente ocasionando que la resistencia disminuya a medida que se aumenta la temperatura dado que su coeficiente también diferente a medida que cambia la temperatura.

Como regla general, los termistores son preferibles cuando la banda de temperatura esperada es angosta porque da una clara respuesta a un cambio de temperatura pequeña mientras que los RTD son preferibles cuando la banda de temperatura esperada es amplia. Ningún transductores el mejor en todas las situaciones de medida, por lo que se tiene que saber cuándo debe utilizarse cada uno de ellos.

2.6.5.3. Sensor Detector Resistivo de temperatura (RTD)

El detector de temperatura RTD se basa en el principio de la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura con coeficiente de temperatura positivo.

La variación de la resistencia puede ser expresada de manera polinómica. Por lo general, la variación es bastante lineal en márgenes amplios de temperatura según la siguiente ecuación Ec. 2.2.

$$RT = R_0 * (1 + \alpha * t)$$

**Ec. 2.2 Ecuación de variación de resistencia.
Fuente: Elaboración Propia**

- R_0 : resistencia en ohmios a 0 grados Celsius
- R_t : resistencia en ohmios a t grados Celsius
- α es el coeficiente de temperatura del conductor especificado a 0 °C, interesa que sea de gran valor y constante con la temperatura.

2.6.5.4. Características de Funcionamiento del sensor RTD.

Metal	Resistividad	Coefficiente Temperatura	Intervalo Temperatura	Resistencia a 0 °C	Presión °C
Platino	9.83	0.003850	-200 - 950	25,100,130	0.01
Niquel	6.38	0.0063	-15 - 300	100	0.50
Cobre	1.56	0.00425	-200 -120	10	0.1

**Tabla 2.2: Características de materiales del RTD
Fuente: Elaboración Propia**

Un sensor RTD muy común es el PT100 (PT significa material de platino con $R=100 \Omega$ a 0°C). En la siguiente tabla 2.2 se muestran valores estándar de resistencia a distintas temperaturas para un sensor Pt100 con $\alpha = 0.00385 \text{K}^{-1}$.

También realiza medidas más exactas y estables hasta una temperatura de aproximadamente 500°C .

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	0	20	40	60	80	100
Resistencia (Ω)	100	107.79	115.54	123.24	130.87	138.50

Tabla 2.3 Valores de resistencias y temperaturas del platino
Fuente: <http://es.wikipedia.org>

Los RTD más económicos utilizan níquel o aleaciones de níquel, pero no son tan estables ni lineales como los que emplean platino. En la Fig. 2.14 se indica la apariencia física del sensor.



Fig. 2.14 Sensor de temperatura (RTD)
Fuente: <https://es.wikipedia.org>

En cuanto a las desventajas, el platino encarece los RTD. Además, para medir la resistencia hay que aplicar una corriente, que, por supuesto, produce una cantidad de calor que distorsión a los resultados de la medida.

Al ser tan baja la resistencia de los hilos conductores que conectan el RTD puede provocar errores importantes. En la denominada técnica de dos hilos la resistencia se mide en los terminales del sistema de adquisición de datos, por lo que la resistencia de los hilos forma parte de la cantidad desconocida que se pretende medir según la figura 2.15.

La velocidad de reacción de la señal de salida se ven afectadas por la masa y el tamaño de los RTD además también por su autocalentamiento.

Por el contrario, la técnica de cuatro hilos mide la resistencia en los terminales del RTD, con lo cual la resistencia de los hilos queda eliminada de la medida según la figura 2.16.

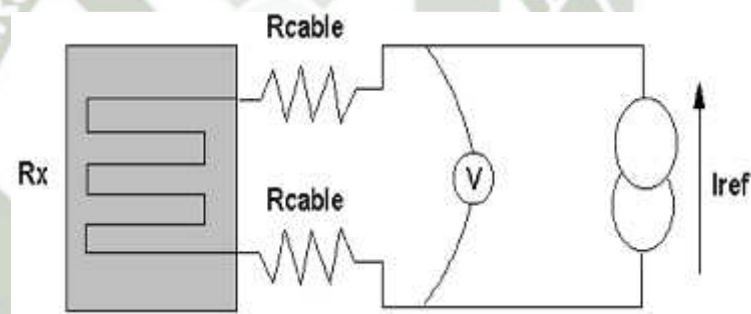


Figura 2.15 RTD de dos hilos
Fuente: <http://www.microbyte.cl>

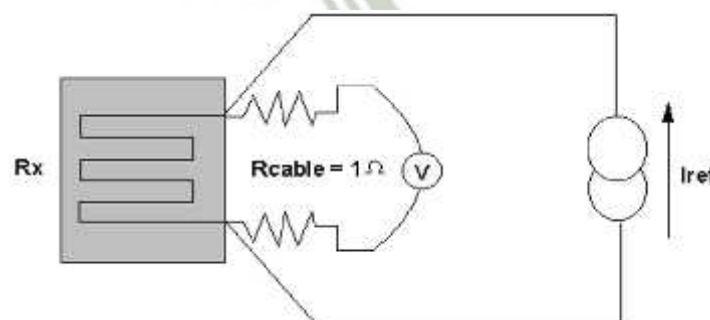


Figura 2.16 RTD de cuatro hilos
Fuente: <http://conbotassucias.files.wordpress.com>

2.6.5.5. Montaje de Sensores

En el montaje deben observarse los siguientes puntos:

- La dirección de flujo tiene que corresponder a la marca.
- Al montar los tornillos hay que observar el par máximo de apriete. Estos deberán elegirse a partir de los siguientes factores, entre otros: temperatura, presión, material de los tornillos y de las juntas y de conformidad con las normativas vigentes pertinentes.
- Al instalar los aparatos, evitar tensiones mecánicas (torsión, flexión).
- Los aparatos de plano paralelos se pueden instalar solamente si se utilizan las juntas apropiadas correspondientes.
- Sólo deben utilizarse juntas que estén fabricadas de un material resistente al fluido y a la temperatura del fluido.
- Las juntas no deben penetrar en la zona de flujo, porque se pueden producir turbulencias que afectan la precisión del aparato.
- El conducto no debe ejercer ninguna fuerza o par de torsión sobre el aparato.
- El convertidor de medición independiente debe instalarse en un lugar libre de vibraciones y rayos del sol.

2.6.6 Resistencia Calefactora

Es un dispositivo eléctrico cuyo objetivo es la producción de calor permitiendo tener un cierto grado de temperatura la cual dará calentamiento para la calefacción de aire, dependiendo del grado de temperatura que se desee obtener.

Su principio de funcionamiento se basa en el Efecto Joule pudiendo realizar el calentamiento tanto por convección, conducción o radiación y está en función de la conductividad, longitud, la superficie transversal del objeto y su temperatura.

Generalmente, la resistencia de un material aumenta cuando crece la temperatura, cuanto mayor sea la superficie de intercambio y mayor sea la diferencia de temperatura mayor será el intercambio de calor.

Finalmente la resistencia eléctrica es proporcional a la longitud del conductor e inversamente proporción a la su conductividad y a su superficie transversal.



Figura 2.17: Resistencias Calefactoras Tubulares
Fuente: <http://img.directindustry.es>

Aunque no siempre los elementos calefactores se bobinan por la misma razón que al bobinar un cable se incrementa la cantidad de alambre por unidad de espacio incrementando de dos o tres veces en su longitud y también arrojan más calor en un espacio reducido siendo más eficientes según la clase de resistencia según observando la Figura 2.17.

La mayoría de las bobinas calefactoras usan nicromo o tungsteno la cual convierten mayormente la electricidad en calor, aunque el tungsteno también libera alrededor de un 10% de energía como luz, ejemplo similar las bombillas de iluminación de luz a un mayor porcentaje.

2.6.6.1 Características de la resistencia calefactora.

La resistencia es un conductor con la mayor o menor oposición al paso de la corriente eléctrica está en función del tipo de material la cual se conoce inicialmente como la siguiente ecuación Ec. 2.3 y la Tabla 2.4.

$$R = \rho * \frac{L}{S}$$

- ρ = coeficiente de resistividad ($\Omega * mm^2/m$)
- L = longitud del conductor (m)
- S = sección del conductor (mm^2)
- R = resistencia del conductor (Ω)

Ec. 2.3 Valor de resistencia respecto al tipo de material

Fuente: <http://salesianos.fzs.es>

MATERIAL	SIMBOLO	a 20 °C ($\Omega * mm^2/m$)
PLATA	Ag	0,0159
COBRE	Cu	0,0178
ALUMINIO	Al	0,028
ESTAÑO	Sn	0,12
HIERRO	Fe	0,13
PLOMO	Pb	0,21
MERCURIO	Hg	0,957
CARBON	Cu	63
MADERA		1013
BAQUELITA		1020
MICA		1021
VIDRIO		1021
PORCELANA		1024

Tabla 2.4 Coeficientes de Resistividad de materiales

Fuente: <http://salesianos.fzs.es>

Posteriormente durante el tiempo que fluye la corriente sobre la resistencia incrementará su temperatura la cual finalmente influirá en el valor de la resistencia dando el valor de la resistencia en la ecuación Ec.2.4 y coeficiente de temperatura según la tabla 2.5.

$$R_{t^{\circ}} = R_o(1 + \alpha\Delta t^{\circ})$$

- $R_{t^{\circ}}$ = resistencia en caliente
- R_o = resistencia a temperatura inicial
- α = coeficiente de temperatura
- t° = elevación de temperatura en °C

Ec. 2.4 Valor de resistencia respecto al cambio de temperatura

Fuente: <http://salesianos.fzs.es>

MATERIAL	
Constatan	0,0001
Wolframio	0,0005
Oro	0,0035
Plata	0,0035
Aluminio	0,0038
Cobre	0,0040
Estaño	0,0044
Hierro	0,0600

Tabla 2.5: Coeficientes de temperatura de materiales

Fuente: <http://salesianos.fzs.es>

Finalmente hallamos la energía eléctrica en función de la potencia durante el tiempo de funcionamiento del calefactor según la potencia equivalente de la ecuación Ec.2.5.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

- Q =energía (Joule)
- t =tiempo (h)
- R = resistencia
- I = intensidad corriente eléctrica

Ec. 2.5 Potencia equivalente de resistencia calefactora

Fuente: <http://salesianos.fzs.es>

Entonces bajo el principio de conservación de la energía y el efecto joule que permite emanar la energía térmica en forma de calor generada por la energía eléctrica es igual al calor que desprende del calefactor.

2.6.6.2 Transferencia de calor

Se dará cuando se transfiera calor entre dos cuerpos por medio de energía calorífica.

A. Modos de transferencia:

- Conducción: Transferencia por un medio estacionario o sólidos.
- Convección: Transferencia por medio de un fluido (líquido o aire)
- Radiación: Es por el cambio de su configuración electrónica emitiendo ondas electromagnéticas.

La transferencia de calor es la transmisión de energía térmica de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura para alcanzar un equilibrio térmico siendo resultado de la segunda ley de la termodinámica entre dos objetos en el caso por convección es entre el calefactor y el aire, también la transferencia de calor no puede ser detenida solo hacerse más lenta la cual es determinada por la ecuación Ec. 2.6.

$$Q_{\text{calor}} = \frac{P \text{ potencia}}{t \text{ tiempo}}$$

Ec. 2.6 Valor del calor respecto a potencia por tiempo

Fuente: <https://es.wikipedia.org>

En el caso del aire, al tratarse de una mezcla de gases su masa queda descartada y se considera el gas como una sustancia con peso molecular. El calor Q_1 del calefactor sumando con Q_2 del aire llega a la expresión según la ecuación Ec. 2.7.

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

Ec. 2.7 Equilibrio térmico de energías térmicas

Fuente: <https://es.wikipedia.org>

Transferencia de calor al aire que fluye en el ducto para alcanzar su equilibrio térmico siendo expresada de la siguiente forma según la figura 2.18.

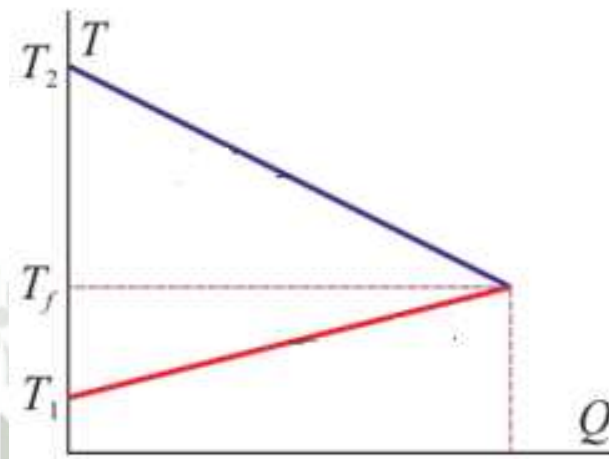


Figura 2.18: Equilibrio Térmico entre Calefactor y Aire.
Fuente: <http://laplace.us.es>

T_2 equivale la temperatura del calefactor que disminuye transmitiendo su calor al aire ocasionando T_1 temperatura de aire se incremente y al final lleguen a una temperatura promedio que será medida por el sensor.

Entendemos entonces que el calor es el proceso de transferencia de energía térmica de un medio a otro para nuestro caso será por convección basándose fundamentalmente en la teoría del calor establecido por los autores Benjamín Thompson y James Prescott Joule afirmando finalmente es igual a la energía.

B. Transferencia de calor por Convección.

- Cambio de Fase: por cambio de estado del fluido de líquido a gaseoso o viceversa.
- Convección Libre: Si el fluido circula naturalmente sin ventilación artificial.
- Convección Forzada: El fluido circula por medio de un ventilador.

2.7 Teoría de Temporizadores

El temporizador es un circuito integrado (chip) que se utiliza en una variedad de aplicaciones y se aplica en la generación de pulsos y de oscilaciones. Introducido en 1971 por Signetics siendo creador el ingeniero suizo Hans Camenzind. Este dispositivo fue pionero en muchos aspectos, no solo por ser el primer circuito integrado temporizador sino además sigue siendo de uso en múltiples aplicaciones con facilidad de operación, precio bajo y la estabilidad encontrándose disponible hasta la actualidad mostrando sus características según la tabla 2.6 y la figura 2.19.

Pin	Símbolo	Nombre	Descripción
1	GND	TIERRA	Terreno (0 V)
2	TRIG	GATILLO	Ajusta el temporizador.
3	OUT	SALIDA	Salida de los temporizadores
4	RESET	RESET	Reinicio forzado del temporizador.
5	CTRL	CONTROL	Tensión de referencia
6	THR	UMBRAL	Restablece el temporizador.
7	DIS	DESCARGA	Open-Kollektor outout
8	Vcc	SUPPLY	Tensión de alimentación (3 - 15 V)

Tabla 2.6 Descripción de Pines de Temporizador
Fuente: Elaboración Propia



Figura 2.19: Temporizador 555
Fuente: <http://img.f-alpha.net>

2.7.1 Modos de Configuración

2.7.1.1 Monoestable

2.7.1.2 Astable

2.7.1.3 Oscilador controlado por tensión (VCO)

Un oscilador controlado por tensión, VCO, (voltage controlled oscillator) se trata de un dispositivo que proporciona una salida oscilante con una frecuencia en función de la tensión de entrada aplicada al mismo según el esquema en la figura 2.20.

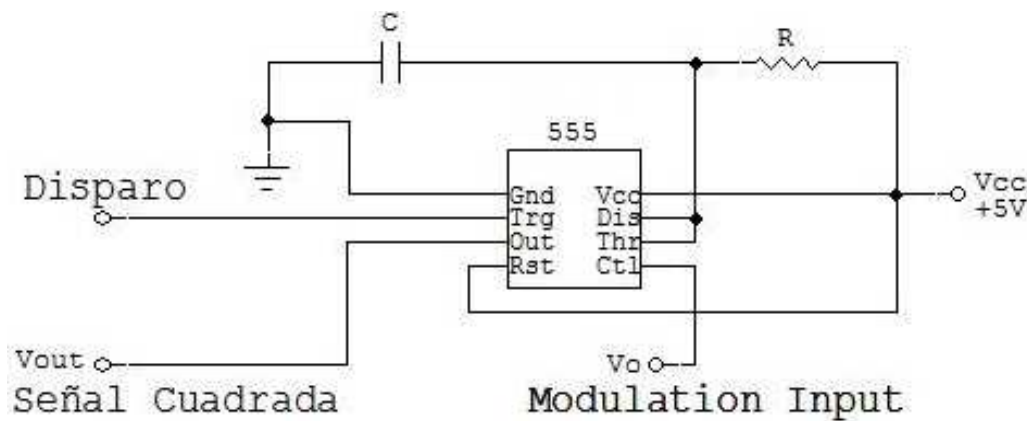


Figura 2.20 Esquema del Modo VCO

Fuente: <http://daqcircuitos.net>

En este caso el integrado primeramente se configura en modo astable estableciendo la frecuencia con un potenciómetro entre las patas 7 y 4 del integrado, la frecuencia de salida es inversamente proporcional a la entrada de voltaje de control en el pin5, esto quiere decir que entre más tensión reciba el circuito, menor será la frecuencia y entre menos tensión reciba el circuito la frecuencia será mayor según la figura 2.21.

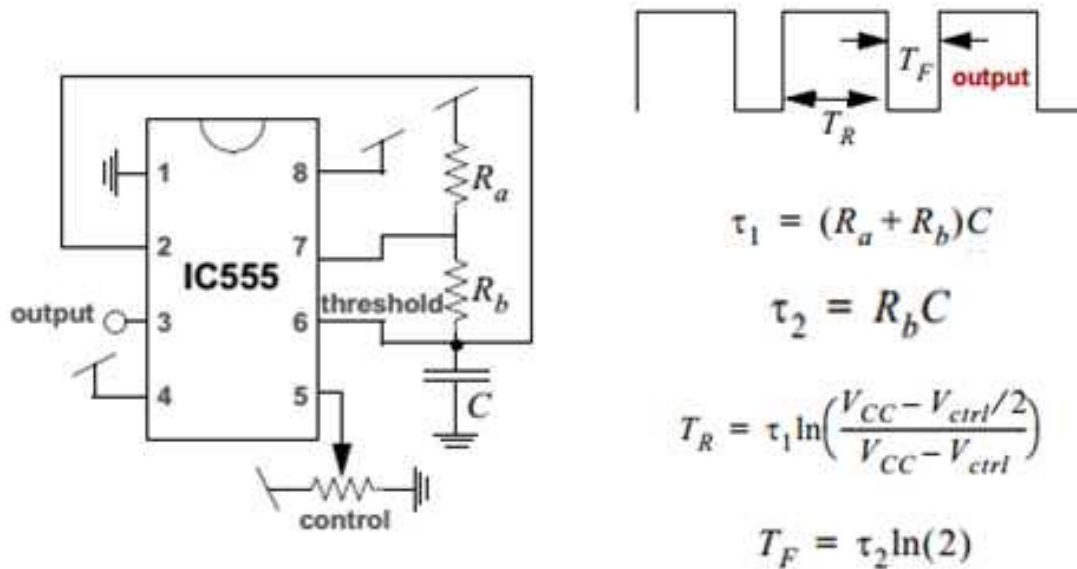


Figura 2.21 Configuración de parámetros del VCO

Fuente: <http://www2.imsecnm.csic.es>

La señal de control del pin 5 recibe el voltaje de salida del PLC en un rango de 0 - 10V permitiendo modular la frecuencia de la señal cuadrada dirigida hacia su carga como el calefactor o el motor.

- El funcionamiento es cuando recibe un impulso de disparo inferior a $1/2 V_{ref}$ por el terminal 2 (disparo) del cual el condensador se carga a través de R, hasta que la tensión en sus bornes alcance el valor V_{ref} (tensión en el terminal 5) la cual por medio de este va a controlar el circuito, V_0 . Durante este periodo, la salida del circuito integrado (pin 3) ha estado a nivel alto, y después la salida del 555 pasa a “0” cesando la temporización y pasando a descargarse el condensador, quedando en disposición de iniciar una nueva temporización.
- En la actualidad existen muchos circuitos integrados en los que se implementa la modulación PWM, además de otros muy particulares para lograr circuitos funcionales que puedan controlar fuentes conmutadas, controles de motores, controles de elementos termoeléctricos, choppers para sensores en ambientes ruidosos y algunas otras aplicaciones. Se distinguen por fabricar este tipo de integradas compañías como Texas Instruments, National Semiconductor, Maxim, y algunas otras más.

2.8 Modulación por Ancho de pulso con Controladores PID

A partir del principio claro de la Modulación por ancho de pulso en sus diferentes modos y combinado con un controlador PID da como resultado un control continuo suave, que no se diferencia en absoluto en un sistema de control en el que se dispone de un elemento de control final que puede ser regulado en un rango continuo determinado.

El funcionamiento de este tipo de modulación implica la determinación de un ciclo o periodo de tiempo que se será equivalente al 100% del ancho del pulso

2.8.1 Aplicación en Motores y Ventiladores.

Esta aplicación permite regular la velocidad de giro de los motores eléctricos de inducción o asíncronos manteniendo el par motor constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica. Se utiliza tanto en corriente continua como en alterna.

Algunos sistemas regulan su velocidad modificando la tensión eléctrica, con lo que disminuye el par motor; o interponen una resistencia eléctrica, con lo que se pierde energía en forma de calor en esta resistencia.

Para regular el giro del motor se varía el tiempo entre pulsos de duración constante llamado modulación por frecuencia de pulsos, en los motores de corriente alterna se conoce como la variación de frecuencia.

2.9 Ventiladores

Es una máquina de accionamiento eléctrico concebida para producir una corriente de aire.

2.9.1. Clasificación de ventiladores

Ventiladores por su presión:

- ✓ Ventiladores de baja presión.
- ✓ Ventiladores de media presión.
- ✓ Ventiladores de alta presión.

Ventiladores por su función:

- ✓ Ventiladores impulsores.
- ✓ Ventiladores extractores.
- ✓ Ventiladores extractores-impulsores.

Ventiladores por la trayectoria de aire:

- ✓ Ventiladores axiales.
- ✓ Ventiladores transversales.
- ✓ Ventiladores centrífugos.
- ✓ Ventiladores helicocentrífugos.

Otros:

- ✓ Ventiladores estándar
- ✓ Ventiladores especiales
- ✓ Ventiladores propulsión
- ✓ Ventiladores compresión

Según su presión y caudal:

En los ventiladores de mediana presión el caudal está definido como el volumen que circula por unidad de tiempo y la presión está entre los 70 y 3.000 Pascales que pueden ser centrífugos o axiales sin embargo en fluidos de alta presión se toma en cuenta la compresibilidad del fluido.

En cambio los ventiladores de baja presión se consideran por que no alcanzan los 70 Pascales. Suelen ser centrífugos se utilizan en climatizadores.

2.9.2. Ventilador tipo Centrifugo

Un ventilador centrífugo es una máquina rotativa o turbomaquina que pone el aire, o un gas, en movimiento cambiando su dirección en 90 grados la cual transmite energía al fluido generando la presión necesaria que pueda vencer su resistencia manteniendo un flujo continuo de aire del sistema según observándose la figura 2.22.

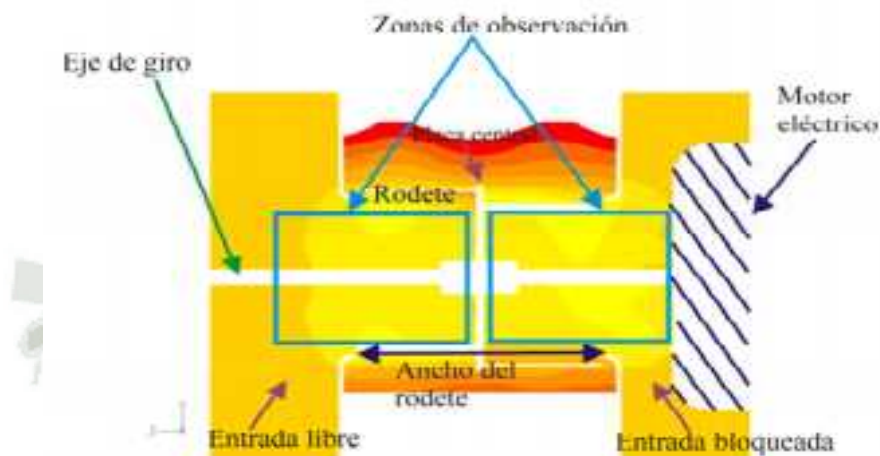


Figura 2.22 Vista transversal del análisis del flujo de entrada
Fuente <http://www.uclm.es>

El ventilador consta en esencia de un motor monofásico eléctrico de accionamiento directo acoplado al impulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía.

Las variables que comprenden a un ventilador son la velocidad de rotación, el diámetro o medida de la hélice o rodete, las presiones total, estática y dinámica, el caudal, la densidad del gas, la potencia absorbida, el rendimiento y el nivel sonoro.

Las normas internacionales ISO, 5801-96 (E) y WD 13348-1998, a estas variables les asignan los siguientes símbolos y unidades, que aquí usaremos para ilustrar las definiciones y aplicaciones según mostradas en la tabla 2.7.

Símbolo	Concepto	Unidad
Dr	Diámetro hélice/rodete	m
Lwt	Nivel Potencia total sonora	dB
n	Velocidad rotacional	s-1
Pr	Potencia mecánica suministrada al ventilador	W
Pf	Presión del ventilador	Pa
qv	Caudal de entrada	m ³ /s-1
r	Densidad	kg/m-3

Tabla 2.7 Simbología de variables e Unidades**Fuente: <http://www.soler-palau.mx>**

El Impulsor centrífugo adopta la forma de rodete con una serie de álabes de diversas formas que giran dentro de una carcasa circular y va unido al eje y es la parte móvil del ventilador según se muestra en la figura 2.23.

La directriz, que guía el aire, para aumentar la presión y el rendimiento del aparato y su característica de potencia absorbida crece rápidamente con el caudal.

**Figura 2.23 Ventilador Centrífugo****Fuente <http://static.grainger.com>**

2.9.2.1. Tipos de Alabes o Hélices

- a) Álabes curvados hacia adelante,
- b) Álabes rectos,
- c) Álabes inclinados hacia atrás/curvados hacia atrás.

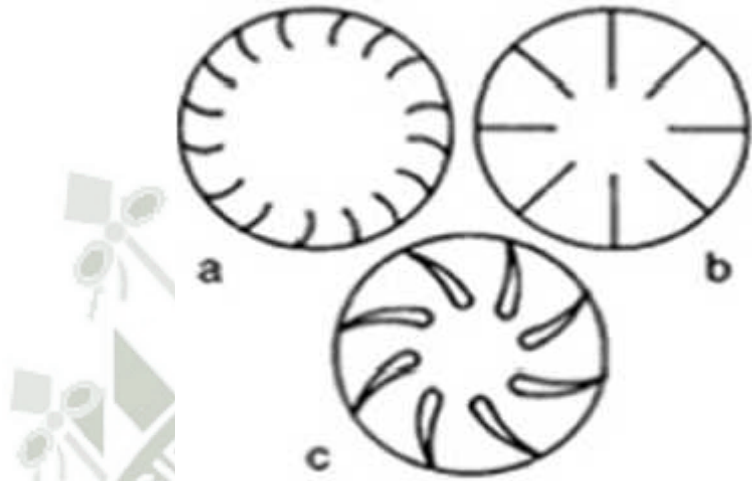


Figura 2.24 Tipos de alabes en ventiladores Centrífugos
Fuente <http://www.ecured.cu>

2.9.2.2. Trayectoria y dirección

La trayectoria del fluido sigue la dirección del eje del rodete a la entrada y perpendicular al mismo a la salida. Si el aire a la salida se recoge perimetralmente en una voluta, entonces se dice que el ventilador es de voluta según la figura 2.25.

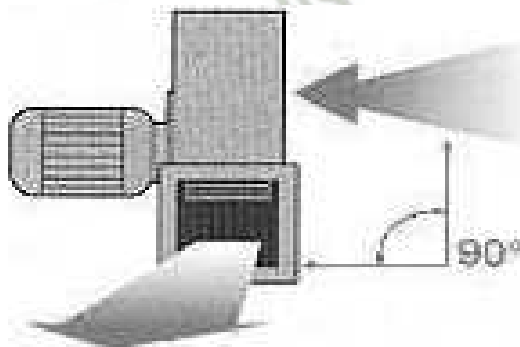


Figura 2.25 Tipos de alabes en ventiladores Centrífugos
Fuente <http://www.ecured.cu>

Se realiza el cálculo de velocidad media del impulsor de alabes hacia adelante basado en la característica del ventilador según la figura 2.26.

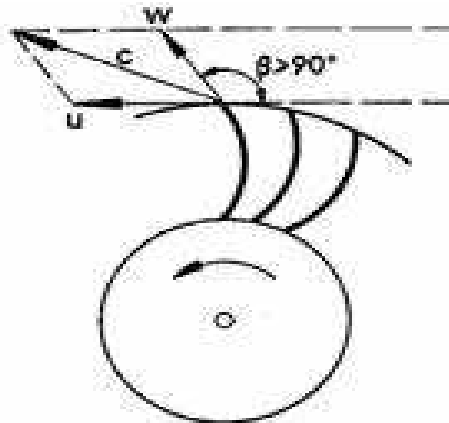


Figura 2.26 Triángulo de Velocidad Media del impulsor alabes hacia adelante
Fuente <http://www.ecured.cu>

2.9.2.3. Flujo Laminar o Media del Ventilador en Ducto.

En el análisis se introduce la idea del flujo uniforme en una sección transversal dada la cual es la velocidad es constante en toda la extensión de la sección transversal normal al flujo. El término flujo uniforme se emplea para describir un flujo en el cual la magnitud y la dirección del vector velocidad son constantes proporcional al RPM del motor, basados en la siguiente figura 2.27 se considera el flujo.

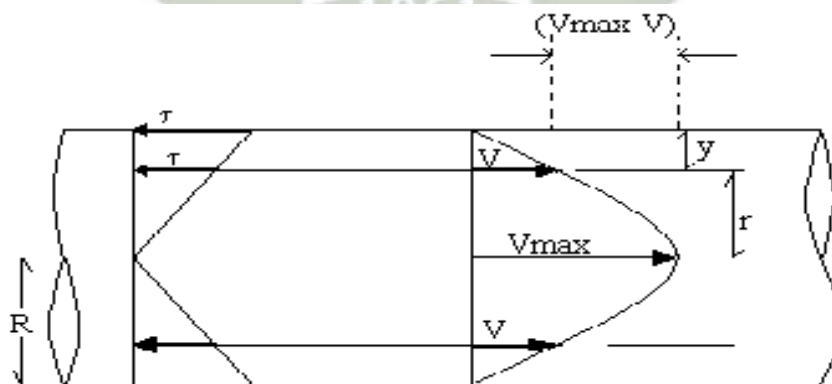


Figura 2.27 Flujo medio laminar o uniforme del aire
Fuente: <http://www.monografias.com>

2.9.3. Principio de Funcionamiento

Los ventiladores de álabes curvados hacia adelante también llamados de jaula de ardilla tienen una hélice o rodete con los álabes curvados en el mismo sentido que la dirección de giro. Estos ventiladores necesitan poco espacio, baja velocidad periférica y son silenciosos. Se utilizan cuando la presión estática necesaria es de baja a media.

Su característica de potencia absorbida crece rápidamente con el caudal, ha de tenerse mucho cuidado con el cálculo de la presión necesaria en la instalación para no sobrecargarlo.

2.9.3.1. Leyes de Ventiladores

Permite determinar los parámetros, a partir de las características del ventilador expresado en magnitudes que se basan en la teoría de la mecánica de fluidos.

Las variables que involucran las leyes de ventiladores son: la velocidad de rotación, el diámetro de la hélice o rodete, las presiones totales estática y dinámica, el caudal, la densidad del gas, la potencia absorbida, el rendimiento y el nivel sonoro.

2.9.3.2. Curva Característica de un Ventilador.

Según sea el ventilador, su curva característica adopta una u otra forma. En la figura se observa una curva característica de un ventilador centrífugo en términos de la presión total, la presión estática y la presión dinámica.

Para trazar la curva característica de un ventilador se ensaya el aparato variándole la carga desde el caudal máximo al caudal cero.

Después los valores obtenidos caudal-presión se llevan a ejes coordenados (x,y) obteniéndose su curva característica la cual se representa

gráficamente las presiones estáticas, que representan las pérdidas de carga, las totales y dinámicas.

Sobre ella se representa una curva de rendimiento mecánico del aparato y es la mejor referencia del mismo ya que indica su capacidad en función de la presión que se le exige lo cual se muestra en la figura 2.28.

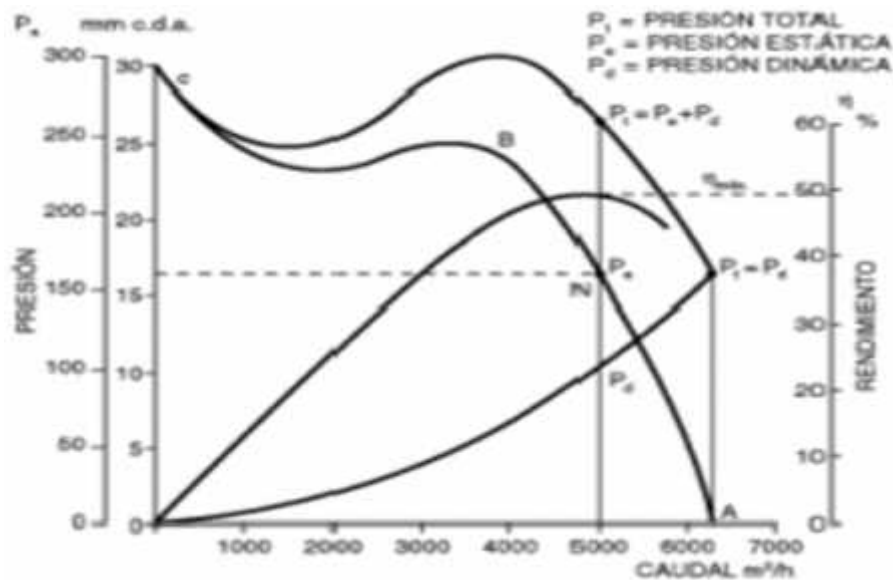


Figura 2.28 Curva Característica Caudal vs Presión
Fuente <http://www.unet.edu.ve>

Tomando como referencia la figura anterior, la zona de trabajo idónea de un ventilador es el tramo A-B sobre la curva de rendimiento del aparato. Entre B y C su funcionamiento es inestable.

Es indispensable disponer de las curvas características de los ventiladores susceptibles para que sean instalados.

1. Las curvas deben estar avaladas por el fabricante, quien las garantizará haciendo referencia a la norma y disposición adoptada para su determinación.
2. Las curvas características de ventiladores se obtienen en laboratorios de ensayos debidamente equipados y por analistas especializados. Ello supone la sujeción a procedimientos según normalizaciones oficiales y

aparatos, túneles y cámaras calibrados. La máxima garantía se obtiene cuando el laboratorio cuenta con una acreditación oficial.

Según estas están conformes finalmente a las normas americanas AMCA/ASHRAE 210-85/51-1985, conciliadas todas ellas en la mundial ISO CD 5801/3-1992.

2.9.3.3. Zona de funcionamiento de márgenes

Dentro la curva característica existe la zona de funcionamiento la cual fuera de ella aumenta el ruido e incluso produciendo flujos intermitentes de aire en sentido inverso lo cual actualmente los catálogos de ventiladores vienen indicadas las zonas dentro de la curva característica mostrada en la figura 2.29.

La pérdida de carga es proporcionalmente al cuadrado del caudal que fluye a través de la canalización.

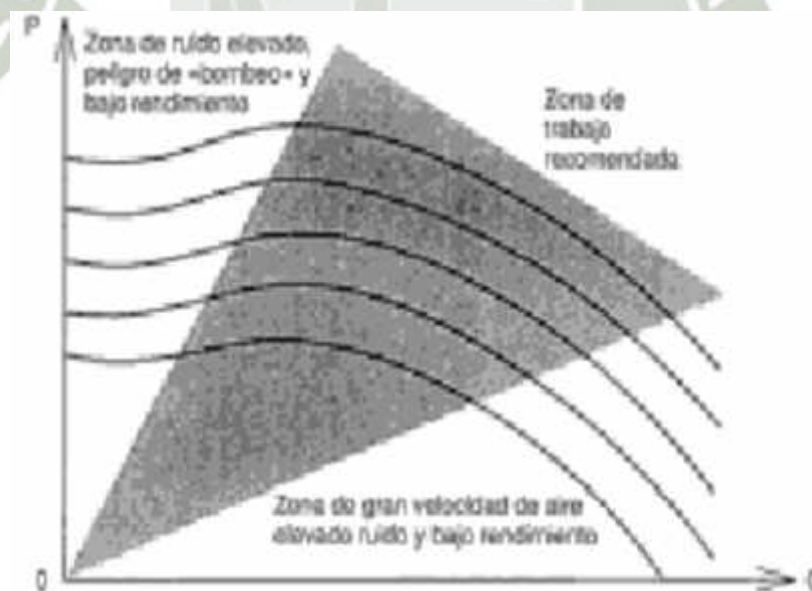


Figura 2.29: Zona recomendable de funcionamiento

Fuente: <http://www.soler-palau.mx>

2.9.3.4. Punto de Trabajo seguro de los Ventiladores

Sobre la curva característica y los márgenes establecidos encontramos el punto de trabajo de un ventilador acorde al ducto o canal del fluido que finalmente se superponen ambas curvas características que se indica en la Fig.2.30

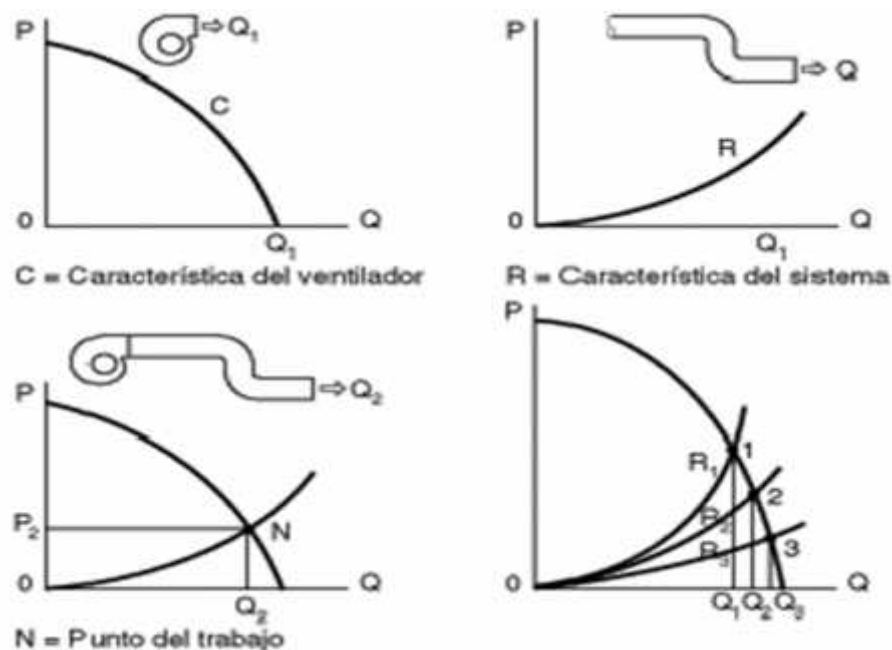


Figura 2.30 Curva Característica Caudal vs Presión
Fuente <http://www.unet.edu.ve>

2.9.4 Rendimiento del Ventilador

La potencia consumida por el ventilador se calcula pues multiplicando la potencia eléctrica por el rendimiento del motor mostrado en la ecuación Ec. 2.28

$$Pot_V = Pot_E \eta_M$$

Ec. 2.8 Valor de la potencia del ventilador
Fuente: <https://es.wikipedia.org>

Según hoja de datos del motor se muestra su rendimiento en la figura 2.31.

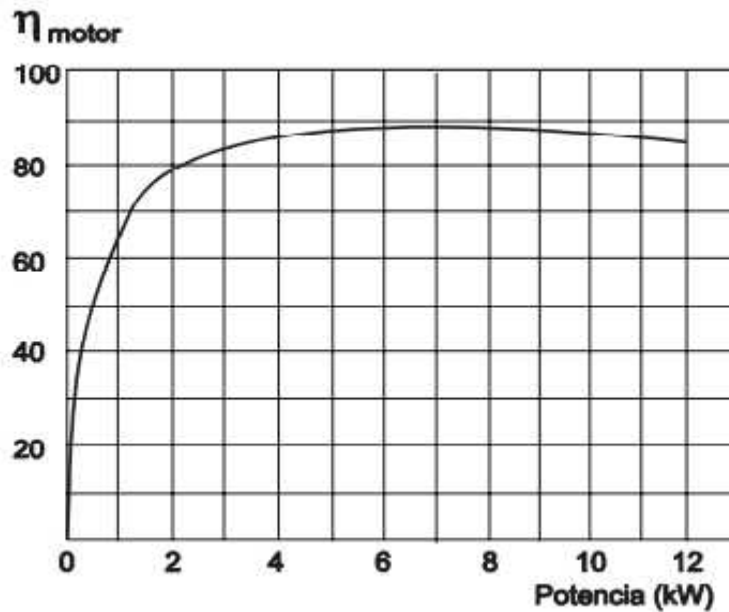


Figura 2.31: Rendimiento del motor
Fuente: <https://shop.strato.com>

El cálculo del rendimiento del ventilador puede realizarse a partir los resultados anteriores mediante la siguiente expresión de la ecuación Ec. 2.9.

$$\eta_v = \frac{P_T Q}{Pot_v}$$

- $HP = Q \times SP / 6356 \times n$
- n = Eficiencia del ventilador
- 1 HP = 0.7457 KW

Ec. 2.9 Valor del rendimiento del ventilador
Fuente: <https://es.wikipedia.org>

2.10 Conductos de Aire

El aire circula por un conducto gracias a la diferencia de presión que existe entre sus extremos.

El flujo del aire por tal conducto absorbe energía del ventilador que lo impulsa/extrae debido al roce con las paredes, los cambios de dirección o los obstáculos que se hallan a su paso. La rentabilidad de una instalación exige que se minimice esta parte de energía consumida.

2.10.1. Conducto acrílico

El conducto acrílico es de material plástico orgánico de monómero de merilmetacrilato, el que brinda muchas ventajas, entre las principales tenemos:

- ✓ 50% más liviano que el vidrio.
- ✓ 54% más liviano que el aluminio.
- ✓ Resistencia al impacto con 14 veces superior al vidrio en calibres de 3 a 6mm de espesor.

También ofrece transparencia absoluta dependiendo de las necesidades y de su instalación y sus propiedades físicas no se alteran por la acción del rayo ultravioleta por esta razón no se cristaliza manteniendo todas sus propiedades de transmisión de luz.

La termo-formación del material permite realizar domos de sección circular, cuadrada, rectangular, polígonos regulares e irregulares.

2.10.2. Pérdida de carga en tramos rectos

A la presión del aire necesaria para vencer la fricción en un conducto, que es la que determina el gasto de energía del ventilador, se llama pérdida de carga. Se calcula por la fórmula de Darcy que contempla la longitud de la conducción, el llamado diámetro hidráulico, la velocidad y densidad del aire y el coeficiente de frotamiento que, éste, a su vez, depende del número de Reynolds, de rugosidad de las paredes, de las dimensiones y la disposición del mismo.

El aire circula por un conducto gracias a la diferencia de presión que existe entre sus extremos.

El número de Reynolds determina el diámetro de un ducto recto para un fluido que circula por su interior y V su velocidad mostrándonos además que el comportamiento del fluido puede ser turbulento o laminar según la figura 2.32.

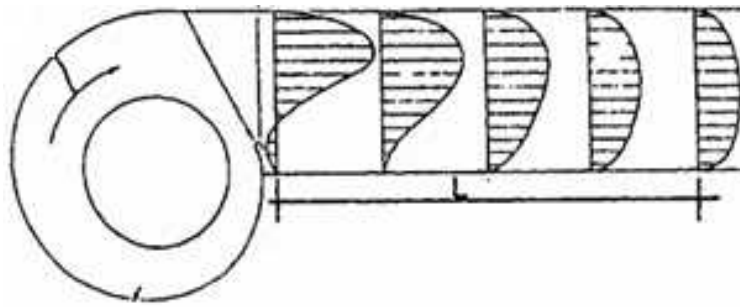


Figura 2.32 Comportamiento del Flujo en interior del Conducto
Fuente <http://www.ecured.cu>

2.10.3 Consideraciones de zona de ventilación

Una forma de proceder es calcular el caudal de aire necesario en base al número de ocupantes pero si se hace difícil entonces mejor se establece en función del local, recurriéndose al cálculo basado en el número de renovaciones/hora, significando las veces que debe renovarse por hora todo el volumen de aire del local.

Para su cálculo se determina primero el volumen del local, multiplicando el largo por el ancho y por el alto, en caso de que sea paralelepédico, o descomponiendo en figuras simples el volumen total.

$$\text{Volumen } V \text{ (m}^3\text{)} = L \times A \times H \text{ (m)}$$

Se escoge luego el número N de renovaciones por hora, según sea la actividad desarrollada en el local y se multiplican ambos.

$$\text{Caudal } Q \text{ (m}^3\text{/h)} = V \times N$$

Según el teorema de Bernoulli la expresión analítica del mismo dice: La suma de la presión estática, la dinámica y la debida a la altura, es constante para todos los puntos de un filete de fluido.

- ✓ Si el conducto es horizontal, o la diferencia es inferior a 100 metros, la presión por diferencia de altura es cero.
- ✓ La presión estática P_e actúa en todos sentidos dentro del conducto. Se manifiesta en el mismo sentido y en el contrario de la corriente. La presión dinámica P_d actúa en el sentido de la velocidad del aire. La presión total P_t es constante en todos los puntos del filete de fluido considerado y su expresión es:

$$P_t = P_e + P_d$$

- ✓ El caudal está definido como la cantidad de aire que circula por el conducto del cual se despeja el área del conducto y tiene la siguiente expresión.

$$\text{Caudal } Q = v * \text{volumen (m}^3/\text{h)}$$

2.11 Conductores eléctricos

Un conductor eléctrico es un material que ofrece poca resistencia al movimiento de carga eléctrica y empleado para el transporte de energía eléctrica, así como para cualquier instalación de uso doméstico o industrial la cual su mejor material es el cobre mostrado en la figura 2.33.



Figura 2.33. Conductor eléctrico
Fuente: <http://www.libertycable.com>

El calibre de alambre estadounidense (en inglés *american wire gauge* o AWG) es una referencia de clasificación de diámetro, en este caso se pretende un calibre 18 AWG.

2.11.1 Rigidez dieléctrica

Es la capacidad que mide la calidad de un material aislante en resistir contra sobrecargas, es decir la capacidad de la tensión en perforar un aislante y se expresa por la unidad kilovoltios por milímetro de espesor del aislante. Estos valores no son constantes ya sea por factores ambientales como humedad, temperatura, tiempo de duración de la tensión aplicada, etc.

Si la tensión es capaz de perforar el aislante, la chispa que lo atraviesa suele provocar averías, cortocircuitos y accidentes a las personas que manipulan las instalaciones sometidas a estas tensiones peligrosas y también la destrucción del mismo ya que alcanzan temperaturas muy grandes.

AGUA	12,0 KV / mm
PAPEL	16,0 KV/ mm
ACEITE MINERAL	4,0 KV / mm
CLORURO DE POLIVINILO	50,0 KV/ mm
AIRE SECO	3,1 KV / mm
POLITILENO	16,0 KV / mm

Figura 2.34 Valores de rigidez dieléctrica para algunos materiales.

Fuente: <http://salesianos.fzs.es>

Según la Figura 2.34 los materiales que se usan para instalaciones de baja tensión pueden ser:

- ✓ Policloruro de vinilo (PVC)
- ✓ Polietileno reticulado (XLPE)
- ✓ Etileno propileno (EPR)

Esto es muy importante para poder elegir el tipo de conductor que se va a utilizar en una instalación. Si se elige un muy buen conductor pero muy caro, la instalación tendrá pérdidas y si se elige un mal conductor y barato, la instalación tendrá muchas pérdidas eléctricas. El conductor más habitual que se usa para el cableado de las instalaciones es el cobre.

2.11.2 Conexiones a tierra

La puesta a tierra del transductor es importante, no sólo por motivos de seguridad, sino también para garantizar que los dispositivos eléctricos funcionen correctamente. Los tornillos de puesta a tierra deben ser ajustados al potencial del conductor protector.

Si se utilizan tuberías de plástico o tuberías con recubrimiento aislante, la toma a tierra se realiza mediante un anillo o electrodo de puesta a tierra. Si el tramo de tubería no está libre de tensiones parásitas, se recomienda que delante y detrás del transductor se instale un anillo de puesta a tierra.

2.12 Controladores Lógicos Programables

Un PLC (Programmable Logic Controller - Controlador Lógico Programable) Es una computadora de estado sólido para fines de automatizar procesos y diseñado para tener un control secuencial de ellos en tiempo real en un ámbito industrial.

Su utilización se desarrolla en instalaciones en donde es necesario un proceso de maniobra, control, señalización, etc. Por tanto, su aplicación abarca desde procesos de fabricación industriales a gran escala de cualquier tipo a control de instalaciones, etc. Según las figura 2.35 y 2.36 se verá su esquema y su secuencia.



Figura 2.35: Secuencia de operaciones de un PLC
Fuente: <http://www.geocities.com>

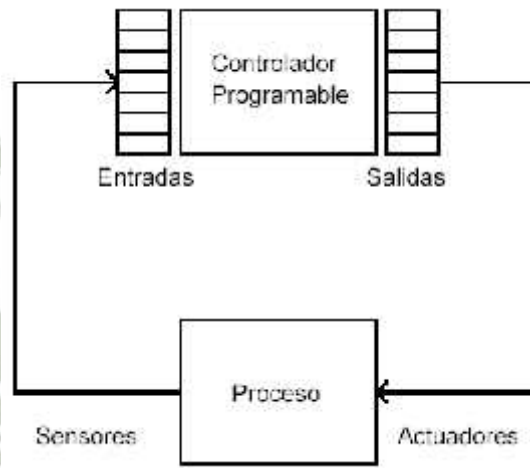


Figura 2.36 Esquema de un PLC para control de Procesos.
Fuente: <http://www.geocities.com>

De acuerdo con la definición de la "NEMA" (National Electrical Manufacturers Association) un controlador programable es: "Un aparato electrónico operado digitalmente, que hace uso de una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas con el propósito de controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales (ON/OFF) o analógicos (1-5 VDC, 4-20 mA, etc.) sobre varios tipos de maquinarias o procesos.

El funcionamiento del PLC, dispone de las siguientes partes:

- ✓ Interfaces de entradas y salidas
- ✓ CPU (Unidad Central de Proceso)
- ✓ Memoria
- ✓ Dispositivos de Programación

El usuario ingresa el programa a través del dispositivo adecuado (un cargador de programa o PC) y éste es almacenado dentro de la memoria de la CPU.

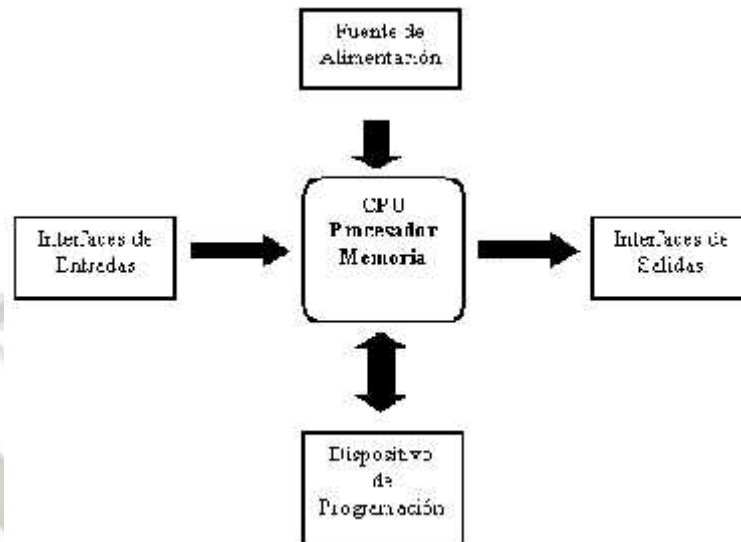


Figura 2.37 Estructura de un Controlador Lógico Programable
Fuente: <http://www.geocities.com>

Basado en la figura 2.37 la CPU, que es el "cerebro" del PLC, procesa la información que recibe del exterior a través de la interfaz de entrada y de acuerdo con el programa, activa una salida a través de la correspondiente interfaz de salida.

Las interfaces de entrada y salida se encargan de adaptar las señales internas a niveles de la CPU. Por ejemplo, cuando la CPU ordena la activación de una salida, la interfaz adapta la señal y acciona un componente (transistor, relé, etc.)

Cuando comienza el ciclo de funcionamiento, la CPU lee el estado de las entradas y luego ejecuta la aplicación empleando el último estado leído. Una vez completado el programa, la CPU ejecuta tareas internas de diagnóstico y comunicación. Al final del ciclo se actualizan las salidas. El tiempo de ciclo depende del tamaño del programa, del número de E/S y de la cantidad de comunicación requerida según la figura 2.38.

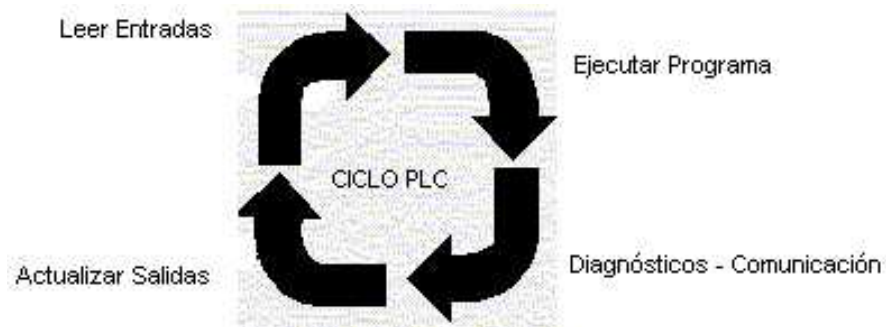


Figura 2.38 Lectura entradas Ejecución de programa
Fuente: <http://www.ab.com>

2.12.1 Clasificación PLC según fabricantes: Allen Bradley

2.12.1.1 PLC Tipo Nano

2.12.1.2 PLC Tipo Compacto

Estos PLC tienen incorporado la Fuente de Alimentación, su CPU y módulos de I/O en un solo módulo principal y permiten manejar desde unas pocas I/O hasta varios cientos (alrededor de 500 I/O), su tamaño es superior a los Nano PLC y soportan una gran variedad de módulos especiales, tales como:

- ✓ Entradas y salidas análogas
- ✓ Módulos contadores rápidos
- ✓ Módulos de comunicaciones
- ✓ Interfaces de operador
- ✓ Extensiones de I/O

El módulo a utilizar es un PLC Micrologix 1200 series B. Los PLC fabricados por Allen Bradley utilizan el programa Rockwell software el cual contiene una serie de programas para su configuración, su software para comunicaciones el RSLinx, que es el que se encarga de regular las comunicaciones entre los diferentes dispositivos utilizando el Microsoft NT de Windows. Proporciona el acceso a otros dispositivos hechos por Allen-Bradley. Para la programación se acuerdo a la gama de PLC se utiliza el RSLogix y para sistemas de supervisión utiliza el RSView32.



Figura 2.39 PLC Micrologix 1200
Fuente: <http://www.nhp.com>

Según la figura 2.39 se tiene gran variedad de tipos distintos de PLC, tanto en sus funciones, en su capacidad, en su aspecto físico y otros, es que es posible clasificar los distintos tipos en varias categorías.

2.12.1.3. PLC Tipo Modular

Estos PLC se componen dentro de un conjunto de elementos que conforman el controlador final los cuales se mencionan a continuación:

- Rack
- Fuente de Alimentación
- CPU
- Módulos de I/O

De estos tipos existen desde los denominados Micro PLC que soportan gran cantidad de I/O, hasta los PLC de grandes prestaciones que permiten manejar miles de I/O.

2.12.2. Módulos De I/O Analógicos

Estos módulos permiten manejar entradas y salidas análogas en nuestro PLC de manera de poder efectuar lecturas y control analógico de variables en nuestros procesos.

2.12.2. 1. Características de Módulos De I/O Analógicos

a) **Resolución:** Es la menor variación de la variable que puede ser detectada dependiendo de la cantidad de bits del conversor utilizado, generalmente se requiere una resolución no inferior a 10 bits.

b) **Tiempo de Conversión:** Se define como el tiempo empleado en convertir el valor analógico en su correspondiente valor discreto. Este es un factor muy importante ya que define el tipo de aplicación para el cual puede emplearse el módulo. Generalmente en control de procesos, la velocidad de variación de las variables es relativamente lenta, sobre 1 segundo, por lo cual las exigencias de velocidad en los módulos analógicos no son muy exigentes. Generalmente razones de conversión del orden de los milisegundos es suficiente para todo tipo de proceso.

c) **Número de Canales:** Es la cantidad de entradas o salidas que puede manejar el módulo, generalmente están agrupadas en 4 o más I/O. También existen agrupaciones de entradas y salidas agrupadas en un solo módulo.

d) **Tipo de Entrada:** Corresponde al tipo de entrada permite manejar el módulo, estas pueden ser de entrada o salida en corriente, 4-20 mA, 0-20 mA, en tensión, 0-10v, -10 ->+10 v, por termocupla, pt100, etc.

Los primeros módulos analógicos que se incorporaron a los PLC solo podían manejar un determinada tipo de entrada, sin embargo hoy en día es posible encontrar módulos de propósitos generales configurables por software que permiten combinar distintos tipos de entrada o de salida.

2.12.2.2. Direccionamiento De Entradas Y Salidas

Debido a que existen una gran cantidad de I/O y estas pueden estar alojadas en diferentes módulos, surge la necesidad de transmitirle e indicarle a la CPU, mediante nuestro programa, la referencia exacta de la entrada o salida con la que queremos interactuar. La acción de identificación de I/O en los PLC se le denomina direccionamiento de entradas y salidas.

El direccionamiento de I/O varía de acuerdo a la marca de fabricante, inclusive de modelo en modelo en los PLC, pero generalmente, la mayoría de los fabricantes adopta una terminología en común que tiene relación con la ubicación física de la I/O. Entendiéndose como:

- ✓ Direccionamiento PLC Nano Telemecanique
- ✓ Direccionamiento PLC TSX-37 Telemecanique
- ✓ Direccionamiento PLC Mitsubishi
- ✓ Direccionamiento PLC A/B SLC-500, Micrologix, CompacLoigx

2.12.3. Módulos De Interface De Comunicación Y Redes

El PLC, se define como un elemento destinado a la automatización y control y teniendo como objetivos principales el aumento de la productividad o abastecimiento y la disminución de los tiempos ciclos, la cual conlleva a una tarea poco simple que es ejecutar datos almacenados en su memoria y luego trasmitir directivas a sus dispositivos que tiene bajo su control.

Entendiéndose entonces es un elemento que en cualquier momento sea capaz de cambiar la tarea que realiza con simples cambios en su programación, ésta tarea sería imposible sin la ayuda de otros dispositivos de por medio tales como la PC, programadoras o paneles de control, dispositivos de campo, etc.

Por lo que finalmente se necesita estar en comunicación con el PLC. Estos conceptos no son los únicos que fundamentan la fabricación flexible y una

comunicación eficiente depende también esencialmente de la red en la que se encuentra operando el PLC. No solamente el PLC sino también los computadores industriales, unidades de programación, etc., la cual una vez conectados todos en la misma red, desde cualquier punto remoto es posible acceder a cada uno de los componentes a su vez para el monitoreo de los sensores, actuadores y seguimiento continuo en tiempo real de las tareas del proceso que se encuentren conectadas a las redes.

Una de las alternativas de comunicación es también la incorporación de módulos de comunicación individuales de punto a punto, multipunto o para la integración enlazado a una red de Computadores.

Las principales interfaces para trabajar en equipo o red son:

- ✓ El P.P.I. (Interface Punto por Punto)
- ✓ El M.P.I. (Interface Multi punto)
- ✓ El Profibus-DP

Actualmente existen además a nivel industrial otras redes tales como la Profibus-FMS, Industrial Ethernet, etc.

2.12.3. 1 Interface Punto Por Punto (P.P.I)

Esta interface permite la comunicación de nuestro dispositivo con otros semejantes tales como módems, scanner, impresoras, etc., situados a una cierta distancia del PLC. En la parte frontal del módulo de la CPU posee conectores DB 9 o DB 25 para la comunicación serial vía RS 232 y RS 485.

La conexión Punto a Punto puede ser establecida económicamente y convenientemente por medio del procesador de comunicaciones CP 340. Hay varios protocolos disponibles por debajo de las tres interfaces de conexión:

- ✓ 20 mA (TTY).
- ✓ RS 232 C/V.24
- ✓ RS 422 / RS485

Dispositivos generalmente conectados:

- ✓ Controladores programables
- ✓ Impresoras
- ✓ Robots controladores
- ✓ Módems
- ✓ Scanner, lectores de códigos de barras, etc.

2.12.3. 2 Interface Multipunto (M.P.I)

Se distinguen dos tipos:

- ✓ RS-422
- ✓ RS-485

La RS-422 es una interfaz multipunto que puede soportar hasta 32 estaciones con una velocidad de transferencia de 1 Mbps, hasta una distancia de aproximadamente de 1 kilómetro en 2 o 4 hilos (half-duplex, full-duplex).

La RS-485 es una mejora de la RS-422 en una versión Half-duplex (2 hilos) que tiene una mejor performance en sus características eléctricas.

Los componentes comprobadores de campo son usados para configurar la comunicación de interface multipunto: cables LAN, conectores LAN y repetidores RS485, desde el PROFIBUS y la línea de productos de entradas/salidas distribuidas. Estos componentes permiten una óptima utilización de la configuración.

Y muchas otras comunicaciones varían de acuerdo al fabricante pero que tratan de mantener los protocolos estándares para poder tener una interoperabilidad con el exterior.

2.12.3.3 Según Protocolos A Medida

Son protocolos que se utilizan en comunicaciones entre PLC y dispositivos de empleo general.

Las instrucciones de E/S para puertos de comunicaciones se pueden utilizar para transferencia sencilla de datos, como por ejemplo puede ser la entrada de datos a un lector de código de barras o salida de datos a una impresora.

Estos protocolos solo se utilizan para el puerto RS-232C integrado en la CPU.

2.12.4. Características De Los Módulos del PLC

Existe gran cantidad de funciones especiales que no son soportadas por los módulos normales en los PLC, para estas situaciones los fabricantes ofrecen una gran variedad de elementos adicionales que permiten incorporar funciones especiales al PLC para nuestros procesos.

2.12.4.1 Ventajas

Las ventajas en el uso del PLC comparado con sistemas cableados basados en relé o sistemas electromecánicos son:

- **Confiabilidad**
- **Espacio**
- **Modularidad**
- **Estandarización**
- **Cambios:** Disponibilidad para realizar cambios durante la operación del sistema.

- **Tiempo:** Ahorro de tiempo de trabajo en las conexiones a realizar, en la puesta en marcha y en el ajuste del sistema.
- **Flexibilidad:** Posibilidad de reemplazar la lógica cableada de un tablero o de un circuito impreso de un sistema electrónico, mediante un programa que corre en un PLC.

2.13 Sistemas SCADA.-

Traducido al español significa, supervisión, control y adquisición de datos que básicamente son aplicaciones de software, diseñadas con el propósito de controlar y supervisar procesos a distancia ya sea manual o automáticamente comunicándose con los dispositivos de campo (controladores autónomos, sensores, etc.) mediante una computadora y dispositivos de control que transmiten la información que se genera en el proceso de producción al usuario ya del mismo nivel u otros entes de supervisión.

La adquisición de los datos en sistemas SCADA puede estar a cargo de un PLC (Controlador Lógico Programable) el cual recibe las señales y las envía a las estaciones remotas usando protocolos determinados, otra manera podría ser a través de una computadora que realice la toma de datos vía hardware especializado y luego transmita la información a un equipo de radio mediante su puerto serial, y así un sinnúmero de alternativas.

Las tareas tanto de supervisión como de control están relacionadas con el software que utilice el sistema SCADA, allí el operador puede visualizar en la pantalla del computador de cada estación remota que conforme el sistema, los estados, las situaciones de alarma y tomar acciones físicas sobre algún equipo lejano, la comunicación se realiza mediante buses especiales o redes LAN. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real. Además estos sistemas actúan sobre dispositivos de la planta, y permiten controlar el proceso desde una estación remota.

2.13.1 Características Principales de un SCADA.-

Existen varios tipos de SCADA's dependiendo del fabricante y del fin con que se va a hacer uso del sistema según queda mencionada en la figura 2.40, por ello antes de decidir cuál es el más indicado hay que tener presente si cumple o no ciertos requerimientos primordiales:

- Debe ser indispensable que tenga arquitectura abierta, es decir, permita su crecimiento y expansión, también debe poder ajustarse a las necesidades futuras de los procesos de producción y de la planta.
- La programación debe ser sencilla y la instalación debe contar con interfaces gráficas que muestren un esquema básico y real del proceso, pero que además, sean amigables para el usuario.
- Es muy importante que se permita la adquisición de datos de todos los equipos que formen parte del sistema SCADA, y su la comunicación debe ser a nivel interno y externo.

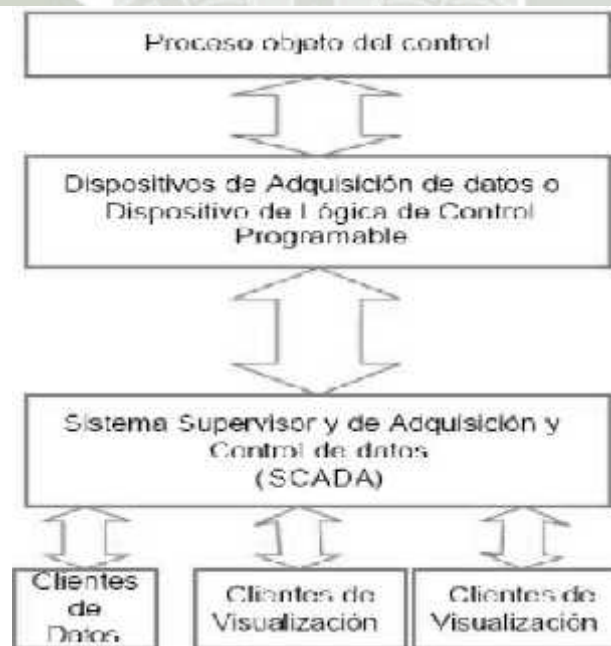


Figura 2.40 Esquema básico de un sistema SCADA
Fuente: <http://www.marcombo.com>

2.13.2 Hardware

Los componentes básicos de hardware para implementar un sistema SCADA son:

✓ ***Unidad terminal maestra (MTU)***

Es el computador principal del sistema que cumple la función de supervisión y recolección de la información de las subestaciones; soporta una interfaz hombre máquina.

✓ ***Unidad remota de telemetría (RTU)***

Es un dispositivo instalado en una localidad remota del sistema que se dedica a recopilar datos para transmitirlos hacia la unidad terminal maestra. Esta unidad posee canales de entrada para la medición de las variables dentro de los procesos y de canales de salida para control, activación de alarmas y puerto de comunicaciones.

✓ ***Red de comunicación***

El sistema de comunicación transmite la información entre la planta y el hardware del sistema SCADA. Las comunicaciones pueden cambiar según las necesidades del sistema y del programa seleccionado, ya que no todos los programas de software así como los instrumentos de campo pueden trabajar con el mismo medio de comunicación.

✓ ***Dispositivos de campo***

Son todos aquellos equipos que permiten realizar la automatización o control del sistema (PLC's, controladores industriales, actuadores, sensores, etc.) y se encargan de la adquisición de datos del sistema.

2.13.3 Software

Un software SCADA debe ser capaz de ofrecer al sistema la posibilidad de crear alarmas, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada del proceso. Permite la generación de datos históricos de las señale de planta, que pueden ser

interpretados en una hoja de cálculo. También ejecuta programas para anular o modificar las tareas asociadas al proceso, bajo ciertas condiciones y tiene la posibilidad de realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador.

Los bloques principales del software que permiten la adquisición, supervisión y control de los datos son:

✓ ***Configuración***

Permite al programador definir el entorno de trabajo del sistema, personalizándolo de acuerdo a sus necesidades.

✓ ***Interfaz gráfico***

Ayuda al operador a observar el estado de los dispositivos de campo presentes en los procesos industriales, permitiendo que exista un buen control y supervisión de la planta.

✓ ***Módulo de proceso***

Ejecuta acciones de mando pre-programadas a partir de valores actuales de las variables de campo leídas en tiempo real.

✓ ***Gestión y archivo de datos***

Permite el almacenamiento y proceso de datos, según códigos de programación que permite comunicarse con el hardware (impresoras, registradores) o el software (bases de datos, hojas de cálculo, gráficas estadísticas)



CAPÍTULO III
**ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y
TEMPERATURA**

3.1 Análisis Metodológico

El análisis metodológico de este trabajo es de tipo descriptivo porque permite presentar los hechos como fenómenos atmosféricos que caracterizan el problema y compila la información necesaria agregando con ello el análisis bibliográfico, luego seguirá con el nivel correlacional porque se relacionan las variables dependientes e independientes estableciendo así un análisis de tipo comparativo de métodos de control, con el objeto de determinar modelos de solución en control automático y dentro de ellos el control cascada que son sustentados posteriormente sobre nuestro prototipo acorde a las exigencias y necesidades que sean mejor alternativa ideal en la actualidad.

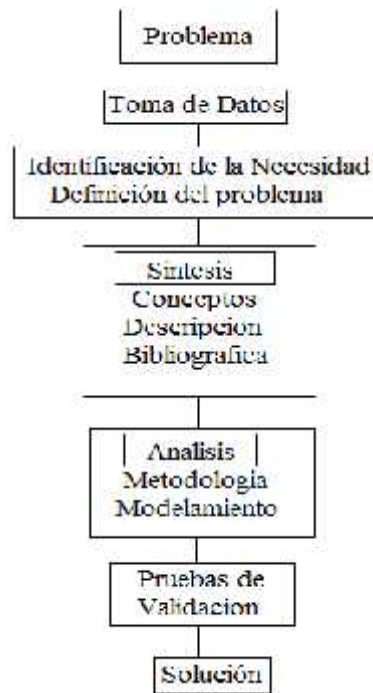


Figura. 3.1 Esquema del Proceso de investigación
Fuente: Elaboración Propia

Según los análisis estadísticos las principales razones de problemas de corrosión en las zonas de máquinas locales se derivan por los factores atmosféricos que rodean la zona marítima causando pérdidas económicas a raíz de factores que poco se toman en cuenta como se observa la figura 3.2.

- ✓ Falta de prevención 75%.
- ✓ Minimización de mantenimiento 40 %.
- ✓ Falta de conocimientos básicos 40 %.

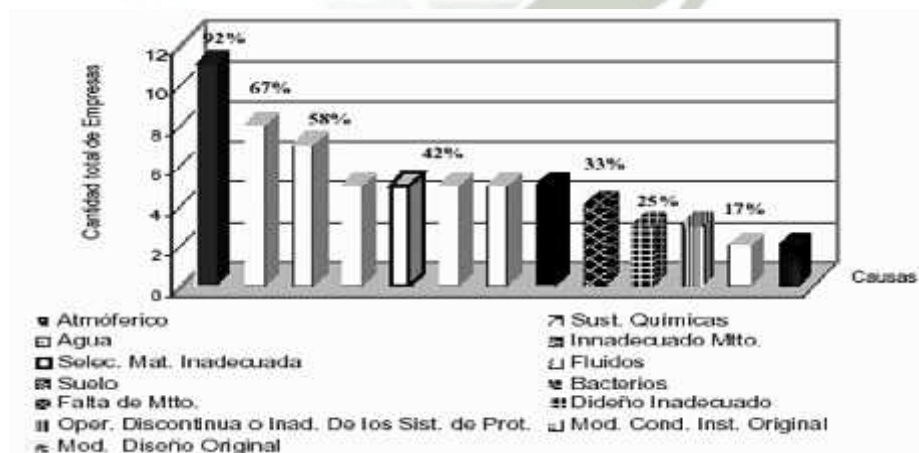


Figura. 3.2 Causas que originan mayores problemas de corrosión
Fuente: Empresa TMT

Se presenta el siguiente caso del mes de noviembre que explica como el problema de corrosión que son causadas por bajas temperatura repercuten en el sistema de equipos de media tensión conllevando perdidas monetarias significativas por no tener un sistema de control eficiente. Particularmente los controles son de tipo on-off que tienen como resultado acciones sucesivas de conexión y desconexión que genera una tendencia temporal que presenta un patrón cíclico del error estacionario que tiene valores máximo y mínimos de temperatura que se conoce comúnmente como histéresis y es propia de la configuración del controlador resultando valores entre 15c y 5c ocasionando un error estacionario de 10c siendo un valor no apto en los equipos.

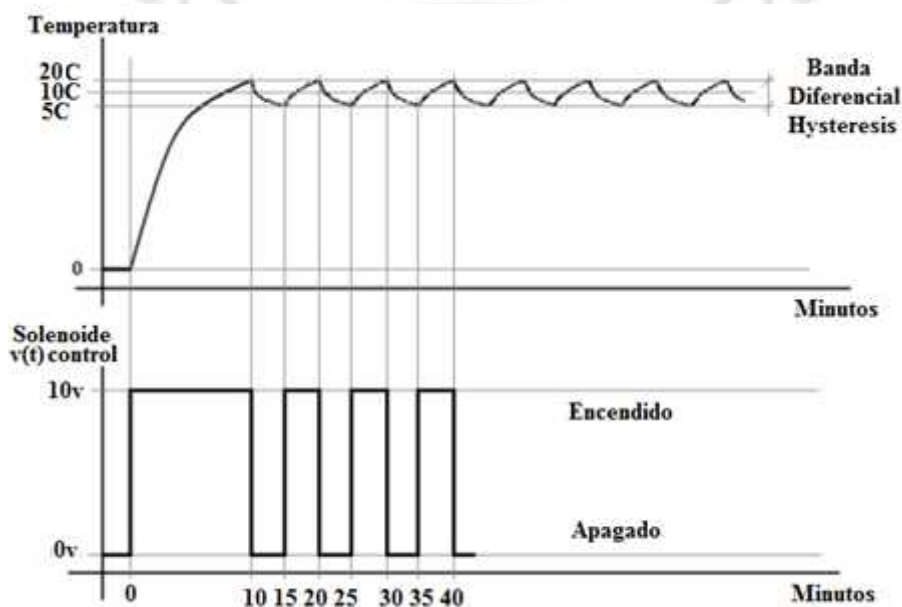


Figura. 3.3 Referencia de valores de la temperatura en control ON - OFF
Fuente: Empresa TMT

Según la figura 3.3 muestra que la gran mayoría de los casos, este patrón periódico es perjudicial, conllevando imperfecciones de calefacción que arrastra consigo innumerables daños por las bajas temperatura y humedad. Este error estacionario se traduce como pérdidas monetarias que según el balance anual como el siguiente ejemplo conlleva por control poco eficiente.

Método de protección	% del costo	Costo S/. x10
Recubrimientos anticorrosivos	89.45	1,194.61
Aleaciones especiales	6.34	84.67
Inhibidores de corrosión	0.91	12.16
Ingeniería de plásticos y polímeros	1.48	19.76
Protección catódica y anódica	0.82	10.95
Servicios de control de la corrosión	1.00	13.36
Total	100.00	1,335.51

Figura 3.4 Balance de costos de corrosión
Fuente: Empresa TMT

Según la figura 3.4 los gastos implica mantenimiento que monetariamente en un periodo de un año suma un 1,335.51 x10 soles un total de 13,335.51 soles anuales se gasta en materiales por un bajo rendimiento de control que implica el control on-off ya que este gasto va en proporción del error estacionario durante el año que ocasiona deterioro de equipos como se ve en la figura 3.5.

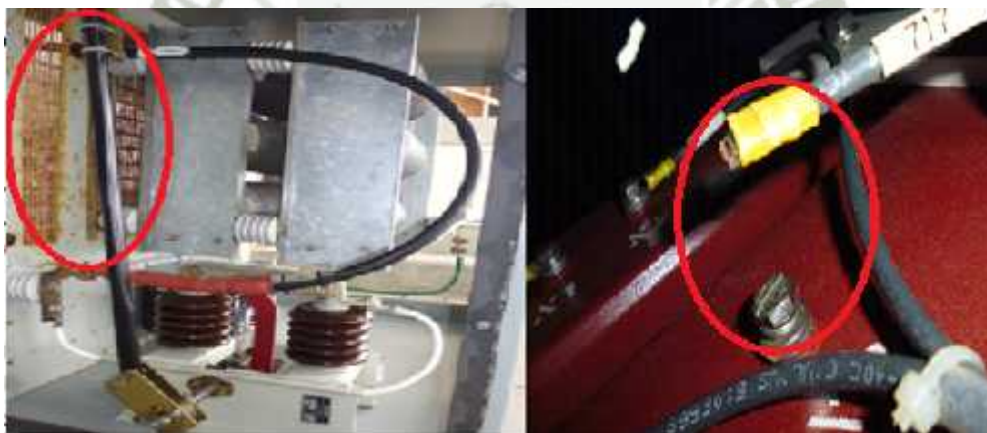


Figura 3.5 Daños de Corrosión
Fuente: Pruebas Fotográficas

Además de los gastos materiales también genera tiempo de mano de obra del personal especializado para la reparación de las fallas de los equipos que genera gasto. En el caso de mes de noviembre se gastó en 9000 soles con 2000 horas hombre. En proporción a las pérdidas será el error estacionario y como solución se propone un control más eficiente que atenúe el error a cero con costos relativamente bajos en comparación con las cuantiosas pérdidas.

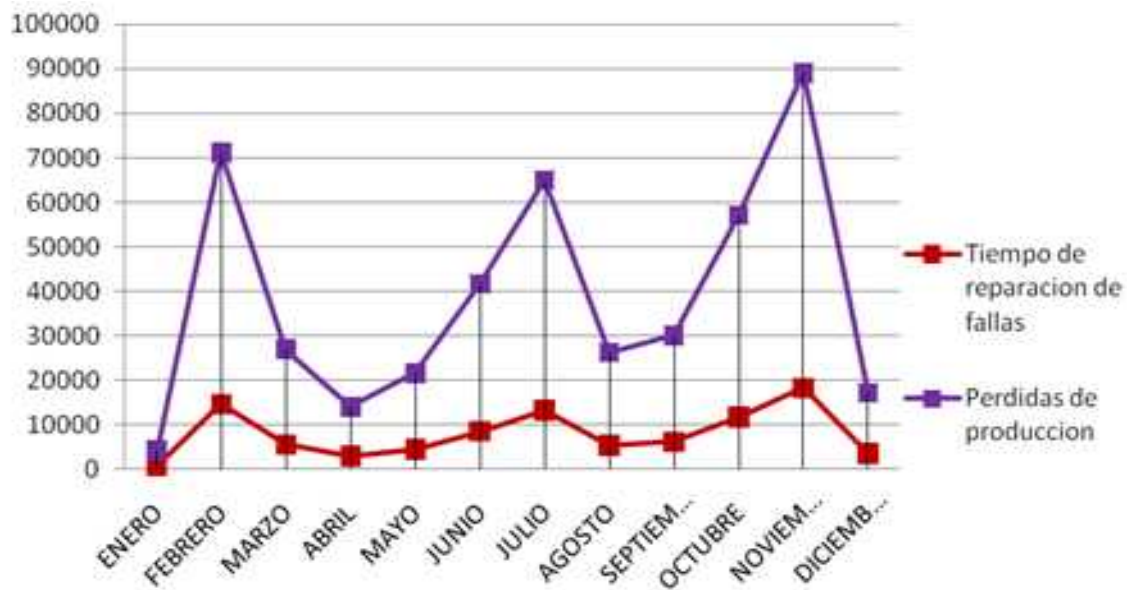


Figura 3.6: Pérdidas monetarias de producción y tiempo
Fuente: Empresa TMT

Como parte de la investigación según la figura 3.6 se tomó muestras que fueron medidas en unidades de temperatura en centígrados por medio de un sensor de temperatura la cual se le consideró como variable de estudio para nuestro control cascada ya que además es la única variable independiente a comparación de la variable de flujo de aire que si depende de la temperatura en el control multivariable siento entonces no necesaria su toma de muestras del fluido del aire.

3.1.1 Selección de la muestra

La muestra enseñó el comportamiento de los fenómenos surgidos dentro de la sala de equipos que demostró que son susceptibles a cambios atmosféricos. Además basado en los conceptos básicos de meteorología se estableció que en condiciones normales de temperatura la humedad relativa (HR) es de 100% hasta 35% o tal caso si en una zona no existe datos exactos la humedad relativa sería del 100% pero si las temperaturas están por debajo de 10 °C es importante entonces reducir la humedad hasta 15% para evitar la condensación que deterioren equipos y demás daños. Después se demostró que la humedad relativa aumenta o disminuye un 25% con cada 11°C de variación de temperatura, aproximadamente.

En otras palabras se explica que la concentración de la humedad por volumen es mayor o menor en función de la energía calorífica que contiene la atmósfera (temperatura), ya que

la cantidad de moléculas de agua en el ambiente se expanden con la energía calorífica. Según el análisis la humedad relativa es inversamente proporcional a la temperatura, como prueba de ello se tomó muestras de ello.

Las dos gráficas corresponden a las muestras de temperatura y HR, entre el 28 de febrero de 2014 y el 1 de marzo en el interior del salón. Se observó que la temperatura bajó de 20,9 °C a 11,6 °C y la HR aumentó sin embargo un 48% entre la mínima y la máxima.



**Figura 3.7: Comparación de Precios
Fuente: Pruebas Fotográficas**

Las gráficas muestran que cada vez que la temperatura (Figura 3.7) sube, la humedad relativa baja y viceversa la cual entonces se apreció que la relación de proporcionalidad es inversa entre ambos parámetros. Según como base de los conceptos teóricos de meteorología y las muestras, se determinó entonces que la temperatura responde a un patrón atmosférico que garantiza el correcto funcionamiento para nuestro sistema siendo entonces la temperatura nuestra variable de proceso principal para nuestro control multivariable.

3.2 Diseño del prototipo de control de flujo y temperatura

Se requirió información técnica detallada e información climática para las condiciones de diseño considerando los siguientes aspectos.

1. Elaboración de planos para especificar el dimensionamiento mecánico, el conexionado eléctrico y la ubicación de equipos de control e instrumentación que lo conforma.
2. Establecer el tipo de sistema a utilizar dependiendo del que brinde mejor versatilidad, inversión, mantenimiento, consumo de energía, etc.
3. Selección de dispositivos y equipos del prototipo.
4. Diseño de componentes complementarios.
5. Montaje e instalación del prototipo.
6. Establecer rangos de temperatura de 25 a 50 C y flujo de aire entre 0 a 100%.
7. Arranque y puesta en marcha del prototipo por medio de pruebas en vacío.
8. Certificación de funcionamiento correcto por medio de las pruebas de validación.
9. Selección del lugar y tiempo donde se seleccionó el laboratorio de ingeniería electrónica como lugar donde se probara el control multivariable durante el tiempo necesario para demostrar su funcionamiento. Se consideró que los valores de temperatura para las pruebas son a temperatura ambiente implicando entonces que lo único que se desea verificar es el correcto funcionamiento del control multivariable.

Se procedió al cálculo, construcción y elección de los recursos, elementos, equipos y dispositivos que conforman el prototipo de acondicionamiento de aire HVAC que es conformado por componentes de origen mecánico, eléctrico y electrotérmico. Basado en la metodología de construcción de plantas industriales se construyó el prototipo debido a que se simula un proceso industrial a escala y que sirvió como plataforma de pruebas para demostrar el funcionamiento del control cascada. Además dentro del análisis se consideró otros factores para el diseño.

Además en la construcción de los circuitos electrónicos se constituyeron diagramas y especificaciones y además los dimensionamientos mecánicos del prototipo del sistema.

- ✓ Factor económico
- ✓ Facilidad de manufactura
- ✓ Disponibilidad en el mercado interno.
- ✓ Tiempo

3.2.1 Dimensionamiento

El rango RPM se escaló a un rango porcentual de todo el volumen de aire del local. Para su cálculo se determina primero el volumen del local, multiplicando el largo por el ancho y por el alto, en caso de que sea cubica se fue descomponiendo en figuras simples el volumen total para el cálculo de una sala de calefacción ideal.

3.2.1.1 Elementos y Estructuras.

Medidas de la estructura del prototipo en base a especificaciones y tamaños de sus componentes que se detallan en sus hojas técnicas y planos anexos y luego sean plasmados en la figura 3.8. y figura 3.9.

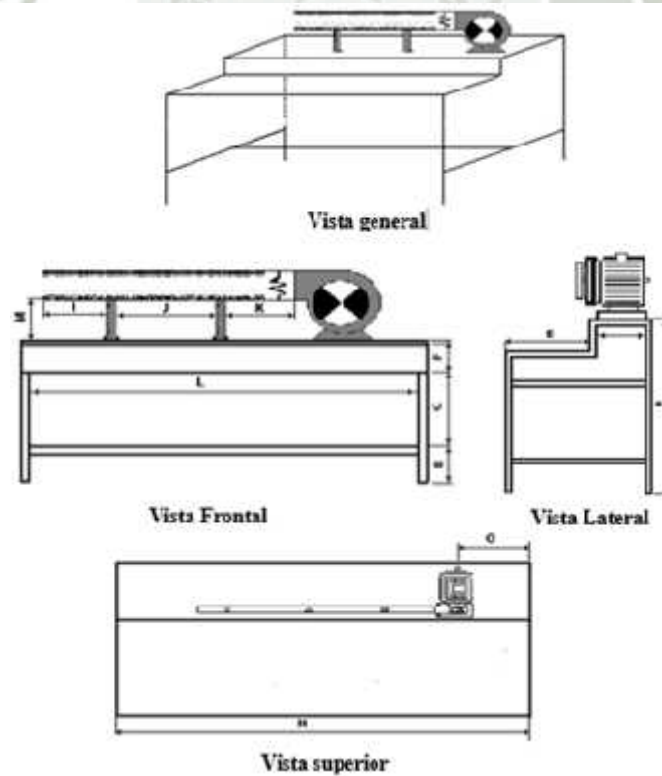


Figura 3.8: Soportes y Estructuras para el prototipo del sistema HVAC
Fuente: Elaboración Propia.

3.2.1.2 Dimensiones del Tablero de Control

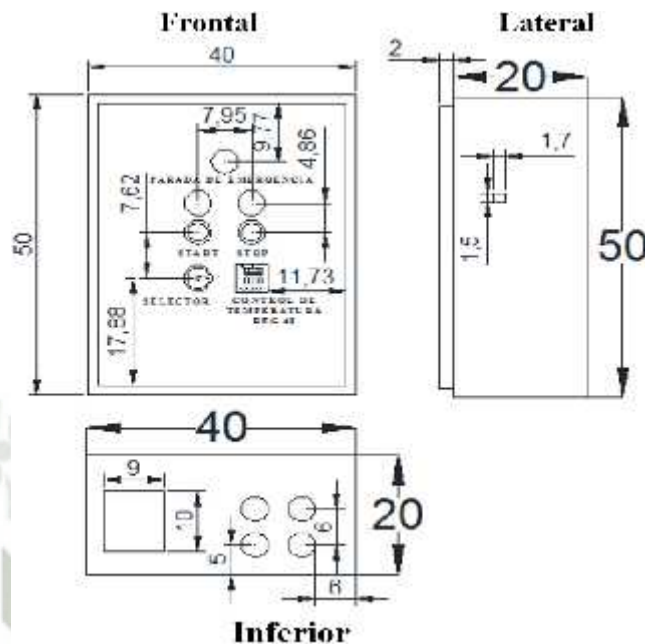


Figura 3.9: Vistas del Tablero de Control
Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Selectividad y cálculo de equipos actuadores

Según el objetivo del prototipo y basándose en las arquitectura de sistemas de aire de calefacción se seleccionaron dos elementos actuadores el primero como generador de calor y el segundo como generador de flujo que transfiere el calor generado hacia un punto de salida donde se tomó datos de temperatura y flujo. Para ello se seleccionó el ventilador centrífugo monofásico de 220V como generador de flujo de aire y segundo se seleccionó la resistencia calefactora eléctrica para generar temperatura y pueda transferirse por medio del flujo de aire a nuestro proceso HVAC y pueda ser controlado por el control multivariable.

3.2.2.1. Selectividad de Ventilador centrífugo

Para la selección del ventilador se consideró un ventilador tipo centrifugo por el hecho de que este tipo a comparación de otros funciona a caudales bajos que están a bajas presiones y generan flujos de aire uniforme y en el aspecto económico son económicos ya que es un equipo monofásico y son menos costos que equipos trifásico y por último fue el único equipo disponible en el mercado interno actual.

Una vez escogido el tipo de ventilador se calculó el caudal de aire necesario en función al dimensionamiento de la sala de calefacción de basándose en el número de renovaciones/minuto que significa las veces que debe renovarse el aire de la sala por minuto. Luego se escoge luego el número N de renovaciones por hora de la sala y se multiplican ambos, la cual es $N = 120$ y después se toma la siguientes medidas $L = 5 \text{ m}$, $A = 9\text{m}$, $H=3$ y luego se calcula para que posteriormente sean plasmadas en la tabla 3.1.

$$\text{Volumen } V \text{ (m}^3\text{)} = L \times A \times H \text{ (m)} = 5 \times 9 \times 3 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\text{Volumen } V \text{ (m}^3\text{)} = 135 \text{ m}^3$$

$$\text{Caudal } Q \text{ (m}^3\text{/h)} = V \times N = 135 \times 120$$

$$\text{Caudal } Q = 16200 \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$\text{Caudal } Q = 162200 \times \frac{1}{60} \text{ (m}^3\text{/min)}$$

$$\text{Caudal } Q = 270 \text{ (m}^3\text{/min)}$$

$$\text{Caudal } Q = 159 \text{ (Pc}^3\text{/min)}$$

%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
V	22v	44v	66v	88v	110v	132v	154v	176v	198v	220v

Tabla 3.1: Tabla de Pruebas de valores del ventilador
Fuente: Elaboración propia

El caudal de aire calculado será de 159 pies cúbicos por minuto PCM. Después de calcular el caudal se tomará este como referencia para seleccionar su equivalente comercial que fue un ventilador centrifugo de 160 PCM ya que es el valor de mayor semejanza a los 159 PCM y además este ventilador proporciona un flujo de aire uniforme con un voltaje proporcional a los RPM del motor y caudal generando un comportamiento lineal en su salida en metros cúbicos y que posee un motor tipo PSC que es un motor de fase partida por condensador para un arranque suave siendo ventajoso a comparación de otros generadores de flujo del mismo tipo y tomándose en cuenta lo económico y fácil de

instalar la cual finalmente se plasman en la ecuación 3.1 su equivalente y la figura 3.10 que muestra la curva característica del ventilador.

$$\frac{dV_{m3}}{dt \text{ tiempo}} = 160 \text{ PCM}$$

Ecuación 3.1 Valor equivalente de porcentajes por Minuto

Fuente: Elaboración Propia

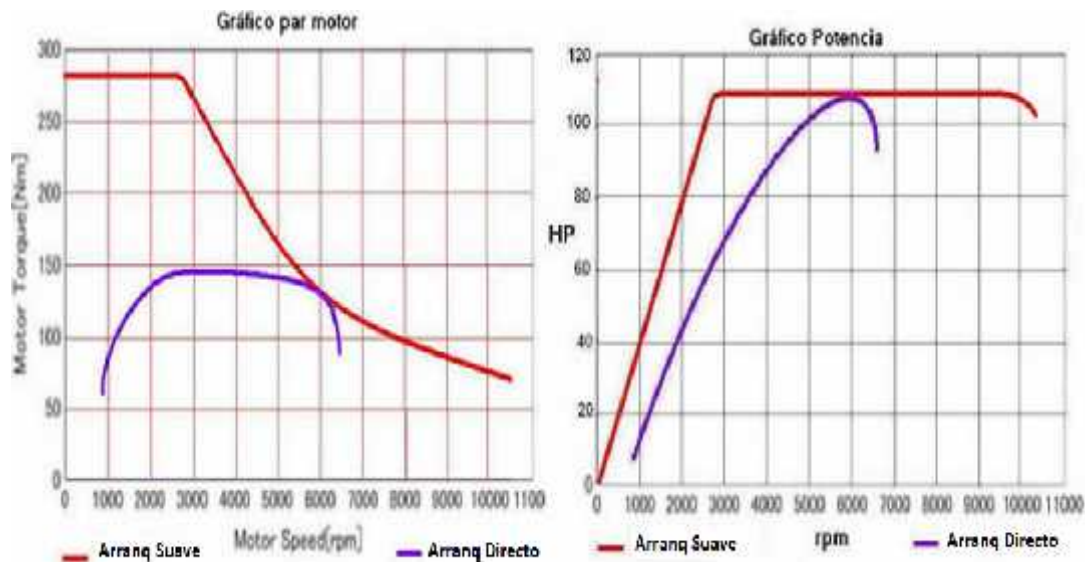


Figura 3.10: curvas de funcionamiento del ventilador

Fuente: <http://www.unet.edu.ve>

En base a los puntos hallados se trazó la curva para disponer de un arranque suave de nuestro actuador. Luego se seleccionó nuestro ventilador centrífugo ya que posee un comportamiento lineal y cuenta con ventajas técnicas adicionales y las características económicas que implican según la figura 3.11.

- ✓ Termostato para protección térmica.
- ✓ Montaje de cualquier posición.
- ✓ Condensador de arranque suave.
- ✓ Peso ligero de 0.8 Kg.

		
Soplador, 549 f³p/ min, 115V, 2.05 A, 1640 rpm	Soplador, 1202 f³p/ min, 115/230 V, 1.30/3.70 A	Soplador, 463 f³p/ min, 115V 1.28 A, 1600 rpm
# de Artículo 1TDT2	# de Artículo 1TDU2	# de Artículo 1TDR9
DAYTON	DAYTON	DAYTON
Precio: \$193.00	Precio: \$171.75	Precio: \$131.65

Figura 3.11: Comparación de Precios
Fuente: Datasheet Ventilador

El ventilador dispone de su impulsor que está directamente acoplada al motor y se ajusta a la entrada de aire por su diámetro exterior de 120 mm compuesto de un material frío hoja de laminado inoxidable que permite una alta resistencia a la humedad haciendo menos abrasivo que otros materiales y sus 36 alabes permiten un peso de 0.8 Kg haciéndolo más ligero a comparación de otros porque permite un torque suave con una rápida velocidad de respuesta de su señal de salida de sus RPM y alta precisión de control sobre sus revoluciones a razones de cambio tanto en bajas y altas velocidades para un funcionamiento óptimo y resistente y de bajo coste. Con los datos de referencia finalmente se seleccionó el ventilador centrífugo cuenta con las siguientes características según figura 3.12 y sus especificaciones (tabla 3.2).



Figura 3.12: Ventilador Centrifugo
Fuente: Fotografía

Marca	Dayton	Modelo:2C916-B	Motor PSC
Capacidad	160 PCM	1.25 HP	IP44
Fases	2 Monofásica	0.38/0.35 Amperios	COS 0.73
Voltaje	220vac	1400/1650 RPM	Rot KL 13

Tabla 3.2: Especificaciones del ventilador
Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2 Selectividad de Resistencia calefactora

Habiendo la necesidad de encontrar un generador calorífico se encontró una resistencia calefactora o mejor dicho un calefactor “Heater” como se muestra en la figura 3.13. Este generador se seleccionó como nuestro actuador de calor debido a que fue el único que se encontró dentro de los alcances ya que en el mercado interno actual no se encuentran disponibles al alcance del público en general. Debido a ello se consideró entonces tomarlo en cuenta ya que su funcionamiento es similar a las secadoras y también generan energía calorífica. Teniendo en cuenta este detalle se comenzó analizar el componente por medio de pruebas.



Figura 3.13: Calefactor
Fuente: Fotografía

Primero se procedió al método experimental donde la prueba se hizo sin presencia de flujo de aire. Segundo el calefactor fue encendido y rápidamente se apagó debido a que

su termostato incorporado detuvo su funcionamiento ocasionando que solo estuviera operativo por 15 segundos. Luego basándose en el principio de equilibrio de temperaturas se concluyó que el actuador llega a su temperatura límite rápidamente porque no existe un flujo que pueda transportar la energía calorífica ocasionando que la transmisión de calor sea por irradiación y no pueda ser aprovechado para el sistema HVAC según la figura 3.14.

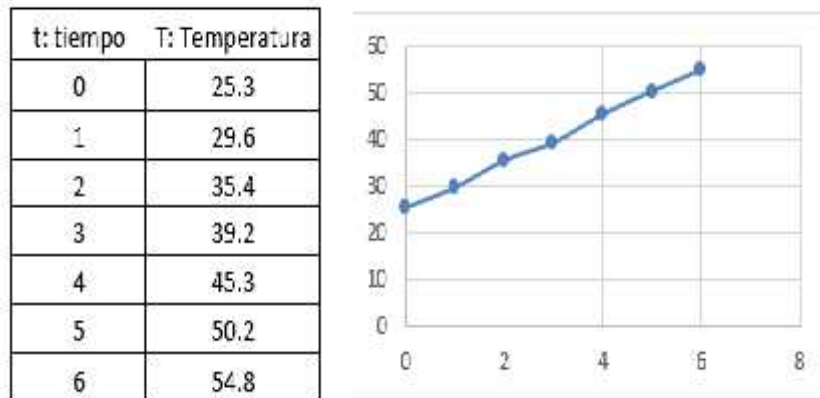


Figura 3.14: Curva del calefactor
Fuente: Elaboración propia

Debido a este fenómeno se vio la necesidad de disponer un generador de flujo de aire que permita que la energía calorífica generada pueda ser transportada desde su punto de generación hasta un punto de salida donde se pueda tomar sus parámetros de flujo y temperatura generada ocasionando que la energía calorífica se convierta en un recurso aprovechable para nuestro sistema HVAC y pueda ser usado para el acondicionamiento del aire de calefacción los cuales se basan en la ecuación 3.2.

$$Q_{calor} = (m * Ce) * \Delta T \text{ temperatura}$$

$$I^2 * R * \Delta t \text{ tiempo} = 1206 * \Delta T \text{ temperatura}$$

$$\Delta T \text{ temperatura} = \frac{I^2 * R * \Delta t \text{ tiempo}}{1206} = \frac{V^2 * \Delta t \text{ tiempo}}{R * 1206} = \frac{V^2 * \Delta t \text{ tiempo}}{R * 1206}$$

$$T t = \frac{V^2 * t}{R * 1206} = \frac{220^2 * t}{8 * 1206}$$

$$T t = 6 * t + 25$$

Ecuación 3.2 Recta del Calefactor
Fuente: Elaboración Propia

Después se tomó muestras de temperatura dentro de un intervalo de 5 minutos a un flujo constante de aire de 160 PCM y luego se registraron sus valores dentro de una tabla para que después se pueda analizar el comportamiento durante el tiempo que estuvo encendido el calefactor. Pudiendo tener registrado los datos recogidos, se procedió a describir el rango de valores en unidades de temperatura la cual se observó un comportamiento del calor en función del tiempo que estuvo encendido el calefactor registrando sus máximos y mínimos valores de temperatura mostrados según el esquema en la figura 3.15.

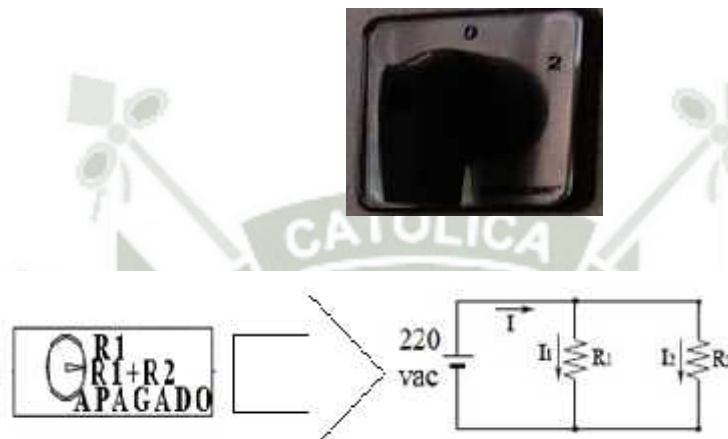


Figura 3.15: Funcionamiento del calefactor
Fuente: Elaboración propia

Además se descubrió mediante pruebas de continuidad en sus terminales que esta resistencia calefactora contiene dos resistencias en paralelo dando a conocer que por su configuración tiene dos tipos de funcionamiento, el primero con una sola resistencia y el segundo con dos resistencias en paralelo ya que entre las resistencias se incorporó un selector que tiene estos dos tipos de funcionamiento y el tercer tipo de funcionamiento es apagado similar a una parada stop manual del calefactor.

Mediante su modelamiento matemático se observó que genera una pendiente demostrando que nuestro calefactor tiene un comportamiento lineal ascendente expresado en una ecuación de la recta con un flujo de aire constante. Posteriormente el cálculo permitió concluir que la resistencia calefactora es apropiada como fuente generadora de calor para nuestro prototipo del cual también se le incluyó para el diseño de control cascada de nuestro proyecto comportándose como un elemento de control final como un componente actuador y observándose también algunos aspectos ventajosos que se consideró para su selección.

- ✓ Termostato para protección térmica a 55 C
- ✓ Posesión de dos resistencias en paralelo.
- ✓ Rápida respuesta al cambio.
- ✓ Peso ligero no mayor a los 50 gramos.

3.2.3. Selección de Equipos de Medición

En la actualidad existen cientos de elementos instalados para la medición y control de cada proceso industrial con su sistema de control. En nuestro caso por el propósito de demostrar nuestro proyecto utilizaremos solo dos sensores y dos elementos de control para nuestros equipos de nuestro proceso de acondicionamiento del aire por calefacción, acorde a eso la instalación de los siguientes componentes está conforme a las especificaciones dadas por fabricante y los valores establecidos por diseño de nuestro proyecto dada la necesidad de cubrir los rangos de medición tanto para la temperatura y como el flujo de aire y sean llevados al control de nuestro lazo la cuales se explican cada una a detalle a continuación.

3.2.3.1 Sensor de temperatura

Para la selectividad del sensor se basó en las características técnicas de sensores de temperatura para instrumentación más comunes. Una de ellas es la resistividad encontrando el platino que tiene una precisión muy grande que puede llegar a la centésima de grado centígrado y por ser exclusivamente altamente resistivo a la humedad ya que originalmente se tomaran las medidas de temperatura en un área marítima altamente húmeda y abrasiva. Para eso se consideró el sensor RTD y dentro su tipo se eligió el muy común sensor PT100 que significa material de platino con $R=100 \Omega$ a 0°C y son altamente económicos, más estables y a comparación de sensores integrados como lm45 estos no necesitan de fuente alimentación y son más resistentes en ambientes industriales. Además esta resistencia está dentro del rango de 100 ohm hasta 138 ohm demostrando que el pt es una resistencia que fluctúa entre 100 hasta 138 como establece según la figura 3.16. y figura 3.17.

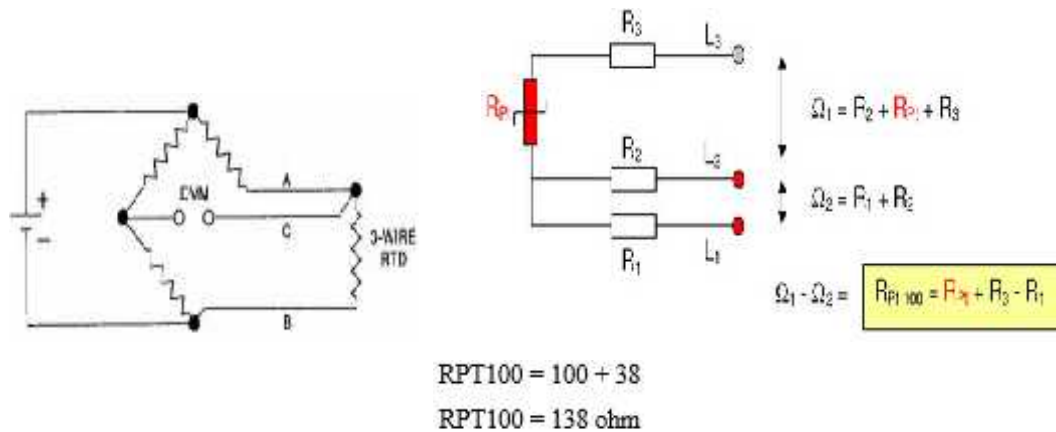


Figura 3.16 Principio del Sensor de Temperatura
Fuente: <http://www.servicetechllc.com>

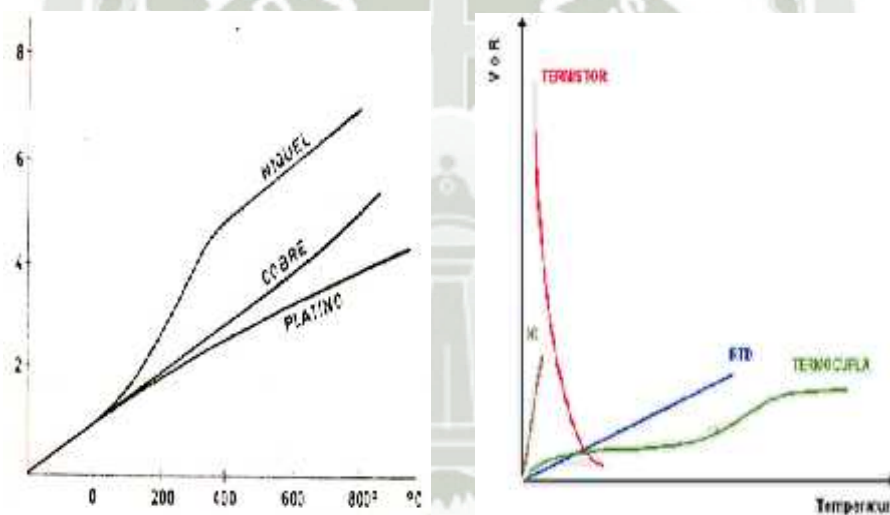


Figura. 3.17 Características del Sensor del sensor de temperatura
Fuente: <http://www.servicetechllc.com>

Además se encontró que es más estable según su tabla 3.3 con una alta precisión, sensibilidad suficiente para hacerlo solido ante alteraciones de ruido y fácil disponibilidad en mercado interno actual y permite soportar las diversas condiciones ambientales a las que queden expuestas cuando se utiliza. Por lo general se trata de un tubo de acero inoxidable con una grasa conductora de calor que también amortigua la vibración con un rango de medición 0°C a +100°C equivalente de 100 a 138ohmios con una sensibilidad de 0.05 siendo precisa y rápida su respuesta por sus 3 hilos y cable apantallado de 1.8 metros que garantiza una mejor respuesta de señal además porque son los más usados que serán conectado hacia el transmisor de temperatura y luego será transferida su respuesta hacia la entrada del PLC según la figura 3.18.

Metal	Resistividad	Coefficiente Temperatura	Resistencia a 0°C	Precisión °C
Platino	9.83	0.003850	25, 100, 130	0.01
Níquel	6.38	0.0063	100	0.50
Cobre	1.56	0.00425	10	0.1

Tabla 3.3: Características de materiales del RTD
Fuente: Elaboración Propia



Pt 100 ohms	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16
40	115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.07	127.46	127.84	128.22	128.60	128.99	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.50	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.77	141.15	141.53	141.91

Figura 3.18: Curvas y Valores de la resistencia del PT100

Fuente: <http://www.servicetechllc.com>

3.2.3.2 Transmisor del sensor de temperatura.

El sensor se enlazó con un dispositivo transmisor de marca Zelio modelo Reg48 que convierte la señal del sensor de temperatura en 4 a 20 ma para dirigirla hacia el PLC como variable de proceso. Este dispositivo se alimenta con 220 VAC y además cuenta con una pantalla indicadora hacia el operador y contara con funciones propias de un controlador PID (que en este caso no se aplicó) dando espacio a tema de estudios posteriores y además contara con interfaces de digitación tipo HMI para modular parámetros de rango, unidades de medición, lectura y selección de configuración de todos los tipos de sensores de temperatura en nuestro caso se configuró para el tipo PT 100 de 3 hilos según se muestra en la figura 3.19.

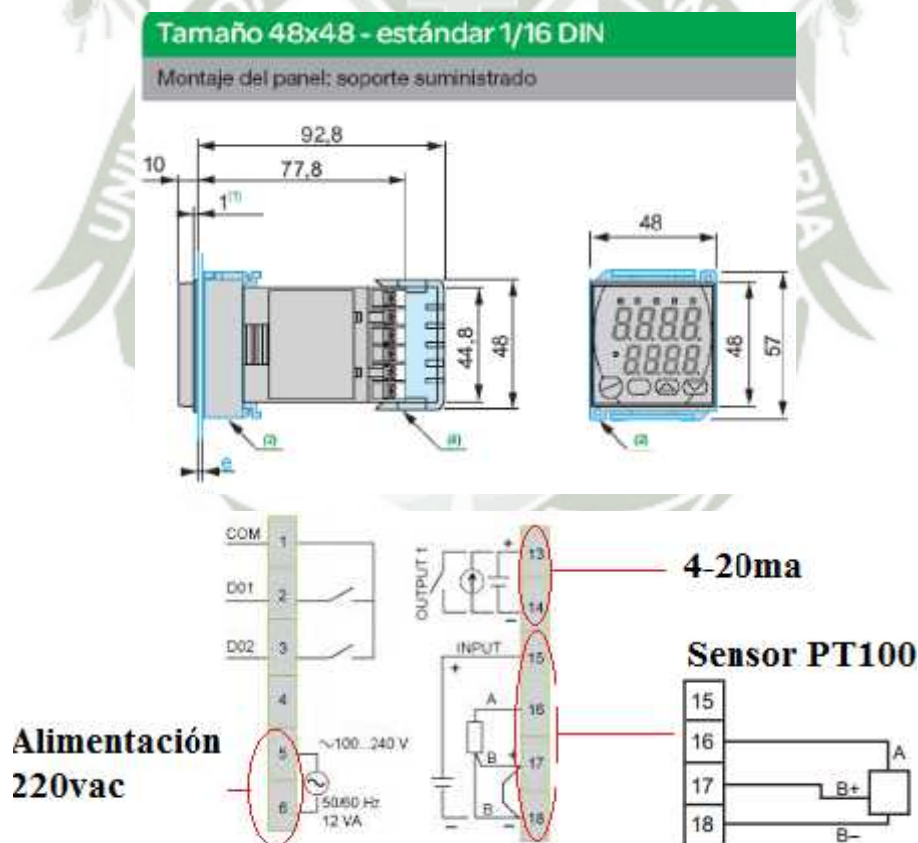


Figura. 3.19 Diagrama Montaje y Conexión del Reg48
Fuente: <http://www.servicetechllc.com>

Este dispositivo lleva fabricados circuitos integrados en su interior que se comportan como una fuente de corriente en función de la temperatura que sirven como generadores lineales en todo su rango de operación que va desde -40°C hasta que se funde en el orden de los 400°C , generando $10\text{V}/^{\circ}\text{K}$. También este dispositivo brinda excelentes posibilidades de utilización, ya que la transmisión de corriente tiene que ver con la independencia de la resistencia eléctrica de los conductores utilizados para su conexión. Además las cualidades de este dispositivo van más allá de convertir señales ya que también puede usarse como un controlador de temperatura con lógica programable PID, autosintonización, alarmas y salidas Modbus, estas aplicaciones se ponen a disposición para futuros temas de estudios dentro del control de temperatura, particularmente este dispositivo será considerado dentro este proyecto únicamente como convertidor de entrada PT100 a salida 4 a 20 ma y su montaje y conexionado que se muestra en la figura 3.20.



Figura. 3.20 montaje y conexionado del Reg48
Fuente: Fotografía

En la selección se consideró su facilidad de alimentar al dispositivo por medio de una alimentación directa monofásica de 220 VAC sin diferenciar la línea con el neutro y tener la opción de configurar cualquier tipo de sensor de temperatura de entrada y con protección de índice de protección ante el polvo que no permite entrar el agua arrojada a chorros (desde cualquier ángulo) por medio de una boquilla de 12,5 mm de diámetro, a un promedio de 100 litros por minuto y a una presión de $100\text{ kN}/\text{m}^2$ durante no menos de 3 minutos y a una distancia que no sea menor de 3 metros y con una velocidad de tiempo de muestro de 200 milisegundos y cuenta con indicadores de operación y lógica de programación difusa y PID con histéresis configurable y salida Modbus siendo enorme ventajas a comparación de sus similares y precio amigable con valores según la tabla 3.4.

OUT	4	5.5	7.2	8.8	10.4	12	13.5	15.2	16.8	18.4	20
IN	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Tabla. 3.4 Valores de Entrada y salida
Fuente: Elaboración Propia

	REG24	REG18	REG08
Fuente de alimentación	~ 100...240 V	~ 100...240 V	~ 100...240 V
Entrada	Termopila/PT 100 - Voltaje/corriente	Universal PT	Universal PT
Tiempo de muestreo	500ms	200ms	200ms
Protección frontal IP65	Si	Si	Si
Funciones			
Filtros anti-ruido	Si	Si	Si
PID	Si	Si	Si
Autosintonización	Si	Si	Si
Rampas	8 pasos	18 pasos	18 pasos
Arranque controlado	No	Si	Si
Modos de operación	Automático	Automático y manual	Automático y manual
Lógica difusa	Si	Si	Si
Salidas de alarma	solo en REG 24PT1A1HU	2	3
Display			
Línea de 7 segmentos, 4 dígitos	1 línea	2 líneas, configurable	2 líneas, configurable
Indicadores de operación	4	6	6
Salidas de proceso			
1 Relé + Modbus	REG24PT1A1HU	REG48PUN1A1HU	REG08PUN1A1HU
1 Relé	REG24PT1A1HU	REG48PUN1A1HU	REG08PUN1A1HU
2 Relés + Modbus		REG48PUN2A1HU	REG08PUN2A1HU
1 SSR + Modbus	REG24PT1A1HU	REG48PUN1A1HU	REG08PUN1A1HU
1 SSR	REG24PT1A1HU	REG48PUN1A1HU	REG08PUN1A1HU
1 Relé + 1 SSR + Modbus		REG48PUN2A1HU	REG08PUN2A1HU
1 (4-20 mA) + Modbus	REG24PT1A1HU	REG48PUN1A1HU	REG08PUN1A1HU
1 SSR + 1 (4-20 mA) + Modbus		REG48PUN2A1HU	REG08PUN2A1HU

Figura. 3.21 Comparación de dispositivos de la misma marca
Fuente: <http://www.servicetechllc.com>

A. Configuración de entrada y salida

Basándose en la figura 3.21 se configuró las terminales para su respectivo procesamiento y de las señales de entrada del sensor de temperatura PT100 y salida a una escala de 4 a 20 ma que posteriormente será la entrada del módulo analógico del PLC

Primero para la configuración de la entrada se seleccionó el Modo operacional (sel) botón derecho, luego Modo monitorización (sel) botón derecho, luego modo setup y después se dirige al CH6 (sel) y luego a la opción PvT (sel) dentro de él se configuró el valor de 1 para el PT100 que indica el tipo de entrada basándose en la tabla 3.22.



Display	Parameter Name	Function	Setting Range
	PV input type	Sets the type of input sensor	<ul style="list-style-type: none"> ● 0 (JPT 100Ω) ● 1 (PT 100Ω) ● 2 (J) ● 3 (K) ● 4 (R) ● 5 (B) ● 6 (S) ● 7 (T) ● 8 (E) ● 9 (no function) ● 10 (no function) ● 11 (no function) ● 12 (N) ● 13 (PL-2) ● 14 (no function) ● 15 (0V to 5V/0mA to 20mA) ● 16 (1V to 5V/4mA to 20mA) ● 17 (0mV to 10V) ● 18 (2V to 10V) ● 19 (0mV to 100mV)
	OUT1 range		<ul style="list-style-type: none"> ● 0-5 (0mA to 5V) ● 1-5 (1V to 5V) ● 0-10 (0mA to 10V) ● 2-10 (2V to 10V) ● 0-20 (0mA to 20mA) ● 4-20 (4mA to 20mA)

Figura. 3.22 Configuración de Entrada y Salida
Fuente: Datasheet Reg48

Para su salida se configuró para un tipo de salida analógica. Primero se configuró en modo operacional con botón derecha y luego modo monitorización con botón derecha y después modo setup con botón derecha y luego se seleccionó el canal CH6 y después a la opción Clr que dentro de él se ingresó el tipo de salida de 4 a 20ma.

3.2.3.3 Sensor de flujo de aire

Se selecciona el sensor de aire que tiene una capacidad de medida hasta 200 PCM donde el flujómetro tipo turbina de marca Sleeve Bearing modelo S0825M de dimensiones de 80mm x 25mm está acorde a las medidas del ducto y del flujo de aire a teniendo una sensibilidad de 2milímetros/minuto a 50 milímetros/minuto y que envía una señal de 0V a 3.5 VDC por medio de un mecanismo de generación eléctrica que está compuesto por un pequeño motor DC de baja tensión que esta acoplado al eje de la turbina presentando entonces un comportamiento lineal al momento de medir los datos el sensor y la cual también presenta las siguientes características técnicas del motor enlazado al eje de la turbina según sus valores mostrados en la tabla 3.5.

Fan/No System	Rated Voltage	Startup Voltage	Rated Current	Speed	Air Flow	Static Pressure	Noise Level
	VDC	VDC	A	RPM	cmm	mm H ₂ O	dBA
Fan/No	12	6.0	0.28	3000	1.151	3.32	29.77
		6.0	0.15	2500	0.846	2.28	25.10
		6.0	0.13	2000	0.763	1.64	21.21
Fan/In	12	6.0	0.20	3000	1.161	3.32	29.77
		6.0	0.10	2000	0.558	2.25	25.10
		6.0	0.18	2000	0.752	1.54	21.21

Medido	1.08v	2.16v	3.24v	4.32v	5.4v	6.48v	7.56v	8.64v	9.72v
Teórico	1v	2v	3v	4v	5v	6v	7v	8v	9v
In	0.4v	0.8v	1.2v	1.6v	2v	2.4v	2.8v	3.2v	3.6v

Tabla. 3.5 Valores del Flujo de Aire
Fuente: Elaboración Propia

Luego la construcción del circuito acondicionador de señal teniendo los siguientes valores de los elementos voltaje: 0V a10V, frágil, autoacoplable. Con dimensión de 80mm x 25mm y alabes con diámetro de 80 milímetros según las figuras 3.23 y 3.24.

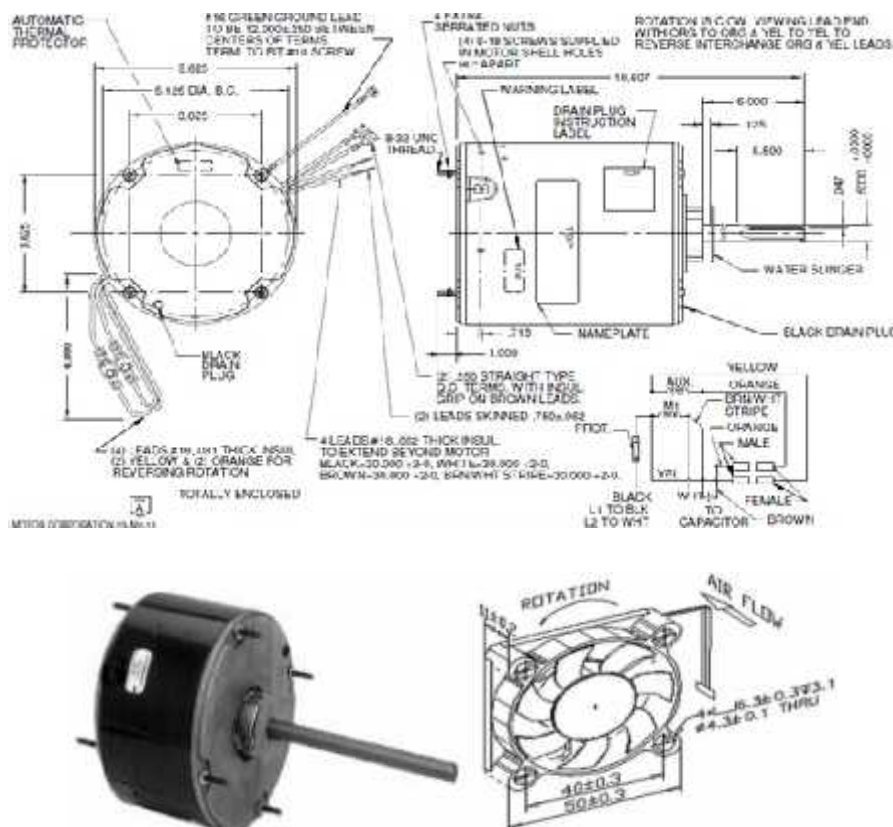


Figura. 3.23 Características del Motor DC y Alabe de 8 aletas
Fuente: Datasheet Sleeve Bearing



Figura. 3.24 Sensor de Flujo
Fuente: <http://www.servicetechllc.com>

3.2.3.4. Diseño del Acondicionador del Sensor de Flujo

Este sensor necesita ser acondicionado mediante un circuito electrónico siendo su salida conectada directamente a una placa de baquelita 4,5cm x 7cm con una alimentación de 24 voltios, rangos de lectura porcentual de 0 a 100% y una función de amplificación por medio de un Opam para una salida analógica de 0 a 10 voltios que van dirigidas al PLC constituida como variable de proceso de la señal de flujo. En la siguiente figura se muestra el circuito que conforma en sensor de flujo con su etapa de amplificación, en donde el sensor de flujo posee una precisión aceptable para la función que va a realizar, pero a su salida su valor de voltaje es relativamente bajo, por lo que se adicionó un amplificador LM358, el mismo que en su estructura interna consta de dos amplificadores (figura 3.25).

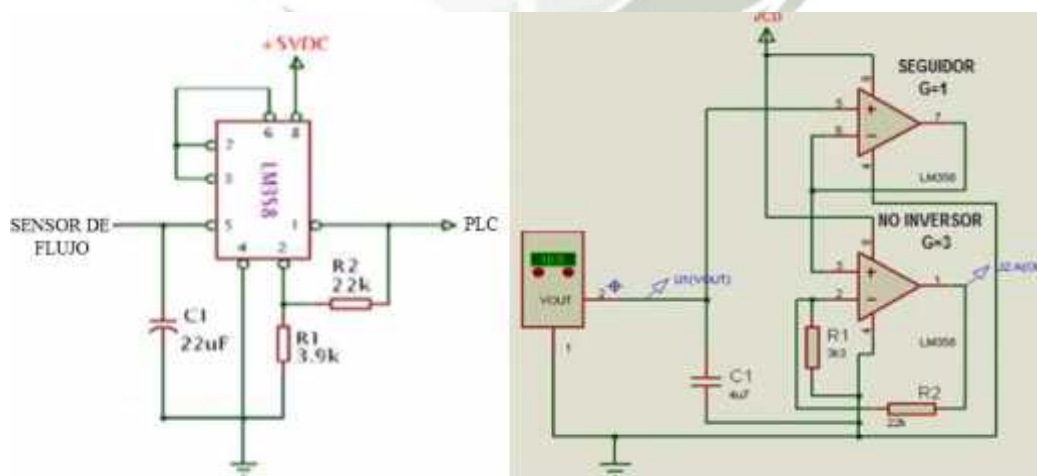


Figura. 3.25 Diseño del Amplificador de señal de Flujo
Fuente: Programa Proteus

El primer amplificador está conectado de tal manera que funciona con un “seguidor” de voltaje, cuya función es acoplar la señal y se coloca un capacitor en su terminal positivo con el objetivo de evitar señales de ruido. El segundo amplificador cumple la función de un “no inversor”, el cual evita que esta señal proveniente del sensor de flujo se confunda con señales de ruido, cuyos valores fluctúan en el orden de los 0 a 4 voltios y a su salida los amplifica por medio de las resistencias de 100 ohm y 270 K ohm que lleva su configuración para una ganancia de 2.5 para una salida de 0 a 11 voltios (tabla 3.6).

Medido	1.08v	2.16v	3.24v	4.32v	5.4v	6.48v	7.56v	8.64v	9.72v	10.8v
Teórico	1v	2v	3v	4v	5v	6v	7v	8v	9v	10v
In	0.4v	0.8v	1.2v	1.6v	2v	2.4v	2.8v	3.2v	3.6v	4v

Tabla. 3.6 Valores del Voltage del Flujo de Aire
Fuente: Elaboración Propia



Figura 3.26. Placas del Amplificador de señal de Flujo
Fuente: Programa Proteus

Después estas señales de voltaje de las placas de la figura 3.26 son dirigidas al PIC 16F877A que está programado para funcionar como un conversor A/D (Análogo/Digital) con salida serial de 8 bits, es decir; cada grado centígrado censado es representado por un código binario de 8 bits para que pueda ser leído por la LCD constituida por el PIC 16F628A. Como parámetros para la protección del PIC 16F877A, se ha colocado un

diodo zener de 5.1V, el mismo que evita que valores de voltajes mayores al valor indicado puedan ingresar al microcontrolador y se quemé. Y finalmente se han colocado en las entradas de alimentación dos capacitores de 100uF, los mismos que trabajan como filtros para evitar que señales parasitas o ruido afecten a las entradas y salidas del mismo.

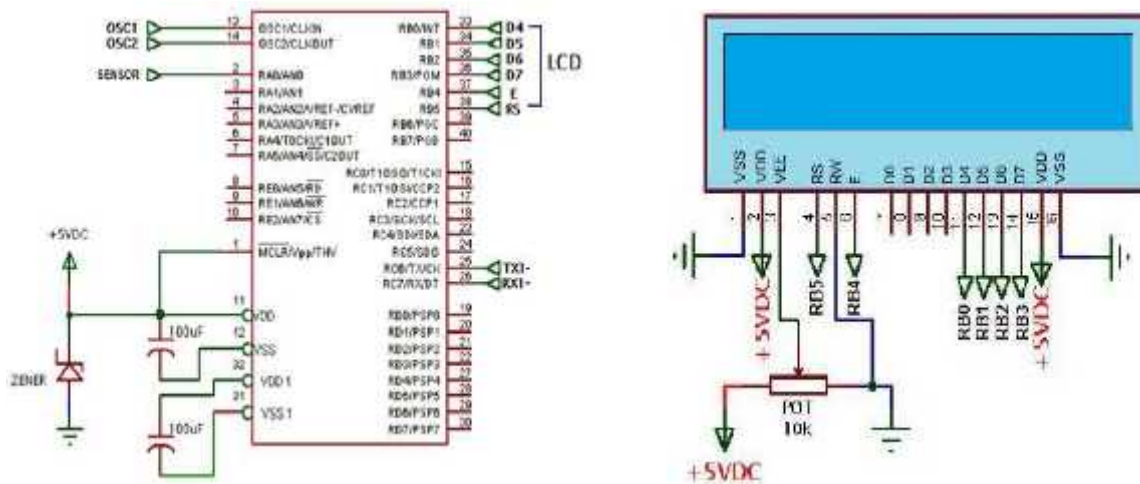


Figura. 3.27 Conexión entre el PIC 16F877A y el LCD
Fuente: Programa Proteus

Como se puede observar en la figura 3.27 este LCD es un dispositivo utilizado para la visualización de la información que se obtiene del sensor de flujo. En este esquema se puede apreciar un potenciómetro de 10k que permite controlar el brillo de la pantalla. La configuración ha sido conectada de acuerdo a la hoja de datos del fabricante para el envío de los datos.

3.2.4 Pruebas de instrumentos

Basándose en la ley de Ohm se tomó pruebas de continuidad de los cables del instrumento que garantizó un buen funcionamiento en el momento de tomar muestras. De la misma forma se procedió con la toma de muestras de nuestro sensor de flujo aplicando el mismo procedimiento de prueba de calidad de ambos instrumentos ya que la calibración se dará directamente de fábrica como en los casos expuestos anteriormente como la figura 3.28 y las pruebas según la tabla 3.7.



Figura.3.28 Pruebas de Continuidad
Fuente: Fotografía

P. Continuidad	Alimentación		Señal Entrada de Sensor			Señal Salida al PLC	
Sensor Flujo	OK	OK	OK		OK	OK	OK
Sensor Temperatura	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tabla 3.7 Continuidad de terminales de sensores de temperatura y flujo
Fuente Elaboración Propia

3.2.5. Selectividad de dispositivos y componentes de Control

Para lograr una automatización en el prototipo (planta) es necesario contar con dispositivos electrónicos que en conjunto con otros elementos permitan tener un control sobre el proceso, es por esta razón que en el prototipo del sistema HVAC existe un motor, un calefactor y sensores de temperatura y flujo de aire siendo estos elementos fundamentales del sistema de automatización. Posteriormente el ducto donde fluye el flujo de aire será vía de trayectoria del mismo, por lo cual se ha diseñado dicha estructura sobrepuesta en un módulo de prueba con un tablero de control conteniendo circuitos eléctricos, electrónicos, placas, equipos de Protección, Autómata PLC, comunicador Ethernet y sensores, transmisores e indicadores HMI para que se enlacen por medio del PLC con los elementos de control regulables en forma de Placas electrónicas PWM que contienen circuito de control por ancho de pulso que por medio de la lógica del programa

de control del PLC que tendrá un control sobre la tensión de alimentación monofásica de 220 VAC al ventilador y calefactor, teniendo como ventaja tamaño, espacio, resistente contra ruidos y perturbaciones y facilidad de instalación a precio cómodo y reduciendo costos de mantenimiento.

Los elementos de control considerados son el SSR y el controlador programable que controlaran al ventilador y calefactor y después estos regularán la temperatura y el flujo del aire ya sea por un control automático o manual por medio de pulsadores de inicio, parada o selector electromecánico que es controlada únicamente por el operador manualmente las cuales todos estos se mencionan en las siguientes etapas para el control sobre el local que particularmente presentamos al ducto como estructura del mismo siendo también un medio de transportes de aire y distribución ya que el presente proyecto es de carácter demostrativo por medio de prototipo.

3.2.5.1. Modulador Por Ancho de Pulso “PWM” por SSR

El diseño del Modulador PWM se dará por medio de software mediante la lógica de programación ladder del programa RSLogix y transmitirá las órdenes de control por medio del componente llamado SSR que viene a ser un relé de estado sólido que vendrá a ser la etapa de optoplamiento entre el control y el circuito de potencia.

3.2.5.2 Acoplamiento entre señal de control y potencia

Se procederá a dar una aplicación de conmutación por medio de un relé semiconductor SSR que gobernara el energizado de la carga (ventilador, calefactor) por medio de un voltaje de conmutación que provendrá del voltaje de salida del PLC que por criterio propio mediante la lógica ladder se fijará el periodo de conmutación de 2 segundos y los tiempos de encendido y apagado gobernados por la señal de control del bloque PID de manera porcentual respecto a su periodo. Una vez procesada por la lógica programable del PLC tendrá el control sobre nuestra compuerta que habilitará el flujo de voltaje a través del semiconductor para controlar el paso de semiciclos positivos y negativos del voltaje de alimentación a partir de que la señal cruza del semiciclo negativo al positivo y viceversa según mostrados en la figura 3.29.

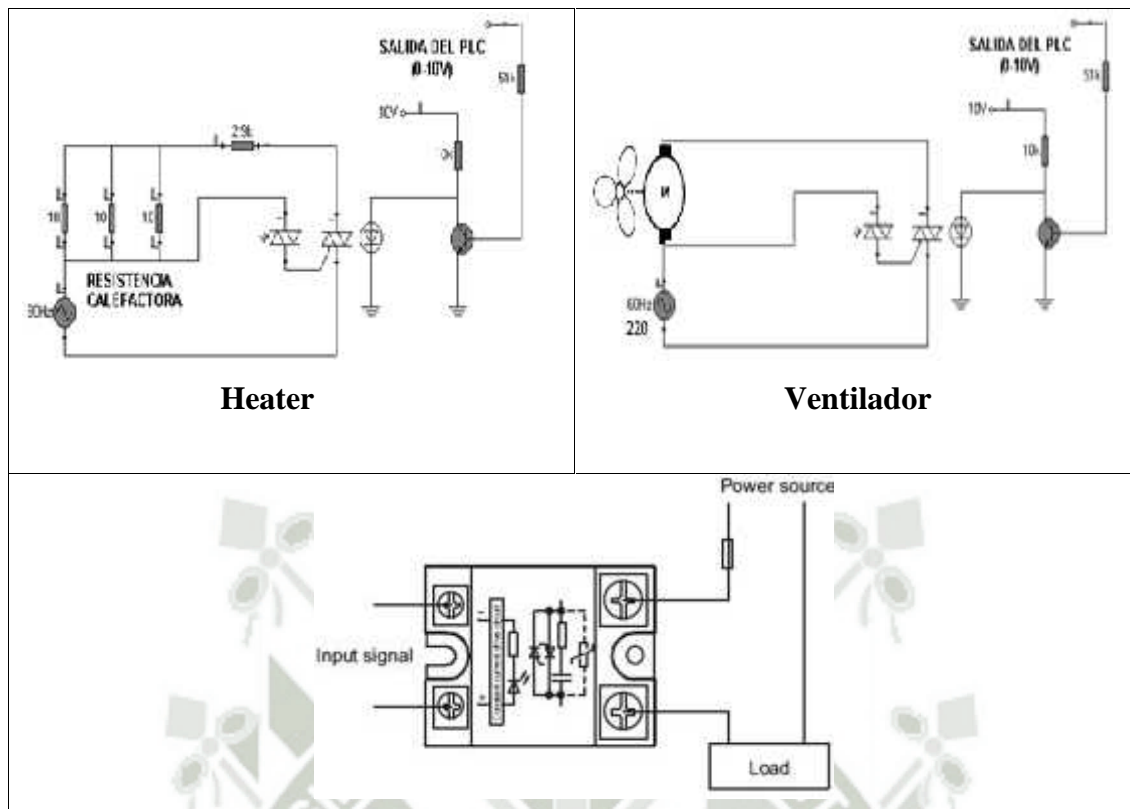


Figura 3.29 Esquemas de Configuración y conexionado
Fuente: Elaboración Propia

La función senoidal de la señal alterna de 220 AC es analizada por cada fragmento de tiempo la cual estableceremos un periodo de tiempo por medio de la programación PWM y sus tiempos t_1 y t_2 que expresados porcentualmente respecto al periodo de 2 segundos y gobernara el temporizado de encendido y apagado dando así nuestro voltaje promedio según la ecuación 3.3.

$$V_{in} = V_p * \sin \omega t = V_p * \sin(2 * \pi * f * t)$$

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_{t_2}^{t_1} V_{in} t * dt = \frac{1}{2} \int_0^{0.5} V_p * \sin \omega t * dt$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2} * v_p(\cos 0 - \cos 0.5\omega) = 154 \text{ v}$$

Ecuación 3.3 Función de la señal de potencia de un semiciclo
Fuente: Elaboración Propia

Dentro del punto de trabajo se fijará un rango de valores que gradualmente basada en mediciones ira en aumento en proporciones de 3 segundos por cada 3 grados centígrados y 10 milisegundos por cada 1% de la RPM del ventilador. Con este tipo de información

recopilada se trazó la recta de cada con una exactitud de 0.01% para una mejor precisión de la respuesta del sistema la cual se muestra en tablas. Las tablas se hallaron porque se tomó muestras de los equipos actuadores en funcionamiento en un intervalo de 5 minutos. Tomándose valores de temperatura para que después poder calcular los periodos máximos y mínimos de funcionamiento escalados desde 1% en intervalos de 10% hasta llegar a los 100% del total de su funcionamiento. Una vez determinamos nuestros periodos se consideró un parámetro para la selección del ssr que funciona a escalas de respuesta de 20 milisegundos y pueda garantizar un funcionamiento optima a mayores escalas de frecuencia y capacidad de potencia que trabaja el motor del ventilador y el calefactor que se muestran en sus características en la tabla 3.8 y la figura 3.30 y la figura 3.31.

Type	Terminal Type				
Model	SSR-10AA	SSR-25AA	SSR-40AA	SSR-25AA-H	SSR-40AA-H
Rated Load Current	10A	25A	40A	25A	40A
Input Data					
Operating Voltage	80-250VAC 50 / 60Hz				
Min. ON / OFF Voltage	ON > 45V , OFF < 35V				
Trigger Current	5.0mA / 110VAC max.				
Control Method	Zero Cross Trigger				
Output Data					
Operating Voltage	24~380VAC		90~480VAC		
Min. Block Voltage	600 VAC < Repelive >				
Voltage Drop	1.8 V / 25 C				
Response Time	ON < 20ms , OFF < 20ms				
Max. Durated Current	135A	275A	410A	275A	410A
Leakage Current	3.0mA	5.0mA	3.0mA	5.0mA	5.0mA
General Data					
Dielectric Strength	Over 2.5KVAC / 1min.				
Isolation Strength	Over 50MEI / 500VDC				
Operating Temperature	-20 C ~ +80 C				
Housing Material	Intensive ABS				
Weight	Appr. 110g				
Connection Diagram					

%	1%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
P1	2,2v	22v	44v	66v	88v	110v	132v	154v	176v	198v	220v
P2	27c	30c	33c	36c	39c	42c	45c	48c	51c	54c	57c
T1	10ms	100ms	200ms	300ms	400ms	500ms	600ms	700ms	800ms	900ms	1seg
T2	3s	30s	60s	90s	120s	150s	180s	210s	240s	270s	5min

Tabla 3.8: Tabla de Características del ventilador
Fuente: Elaboración propia



Figura. 3.30 Montaje del SSR con el HEATER Y BLOWER
Fuente: Elaboración Propia

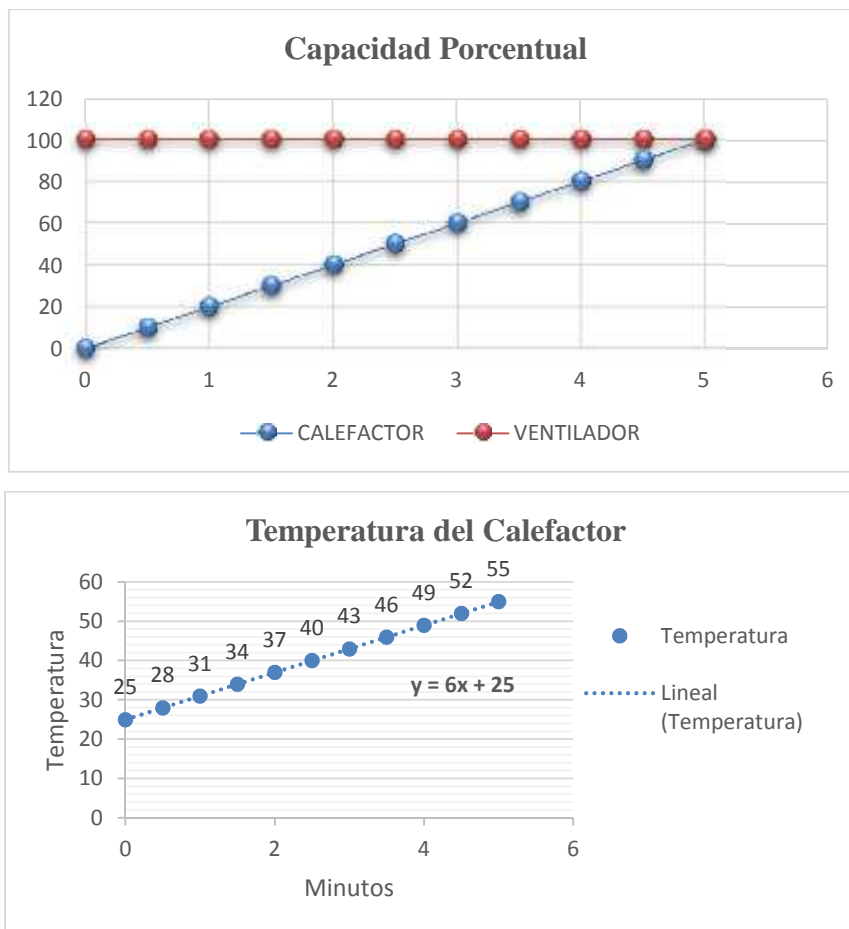


Figura. 3.31 Características del Heater y Blower
Fuente: Elaboración Propia

Cap.	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Temp.	25	28	31	34	37	40	43	46	49	52	55
Min.	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Tabla 3.9: Mediciones del Ventilador

Fuente: Elaboración propia

$$m \Delta T = \frac{55-25}{5-0} = 6 ; b = 25 ; T_{\min} = m \Delta T * t + 25$$

Ecuación 3.4. Recta de la Temperatura

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 3.9 contiene valores de la temperatura que se registran en un intervalo de medio minuto ósea 30 segundos y después se modelada matemáticamente mostrando que es una recta con un valor inicial de 25 centígrados ya que es el equivalente de la temperatura de ambiente. El valor del flujo de aire inicialmente se consigna su 100% de su capacidad ya que por su hoja de fabricante muestra que el tiempo de respuesta del equipo es 1 segundo. Posteriormente estos valores servirán más adelante para el modelamiento del control ya que son gobernados directamente por el bloque virtual PWM del controlador la cual basándose en las mediciones y cálculos se desarrollará el control PID y con ello también el tiempo de conmutación del SSR para así poner en marcha el ventilador y el calefactor con tiempos TON en escala de milisegundos con valores de 10 y 300 milisegundos y posteriormente alcanzar una respuesta optima del sistema cercana al Set Point según muestra la ecuación 3.4.

3.2.6. Alimentación de voltaje y elementos de protección

Dentro del proyecto se establece que la alimentación principal será por medio de una conexión de 220VAC monofásica para la alimentación de los equipos eléctricos y los elementos de instrumentación deben recibir una alimentación de 24VDC.

Se agregó también una fuente de alimentación de 24VDC marca Cisco de 2.5A, corriente suficiente para alimentar sin problemas a los equipos de instrumentación perteneciente al programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica Santa María.

3.2.7 Cableado y conductores Eléctricos

La ruta y el tendido de cable se especifican en los planos proporcionados que basan en sus hojas técnicas. La distancia promedio de los cables es no menor a los 5 metros que se acondicionan a la arquitectura del prototipo y la dimensión de sus componentes. Los cables contemplan las siguientes características según la tabla 3.10.

AWG 18	Material PVC
Diámetro	1.02362
Resistencia eléctrica en Cobre	6.385 (Ω/1 km) , (90 °C)
Área	20.948 (mm ²)
Corriente admisible en cobre a 60 °C aislado	>24/0.2 (A)

Tabla 3.10: Características del Conductor Eléctrico
Fuente: Elaboración propia

3.2.8. Conducto de Aire

El conducto acrílico tiene un diámetro exterior de 80mm, su diámetro interior de 74mm, su espesor de 3mm y su longitud es de 70mm que posteriormente está acorde a las características del caudal especificado ya que ha de ser ventiladores de baja presión con la suficiente capacidad de soportar las mismas. Según figura 3.32 las características que presenta este material son:

- ✓ Máxima temperatura recomendada para el servicio continuo, 82°C
- ✓ Coeficiente de expansión térmica
- ✓ Por cada 30cm. de acrílico, éste se expande y contrae un milímetro y medio
- ✓ Aumenta su resistencia con el aumento del calibre
- ✓ Su peso es muy considerado por lo que es 50% más liviano que el vidrio;
- ✓ 43% más liviano que el aluminio
- ✓ Puede ser cortado
- ✓ Puede ser perforado
- ✓ Maquinado tal como se hace con la mayoría de los metales blandos, tales como aluminio y latón.

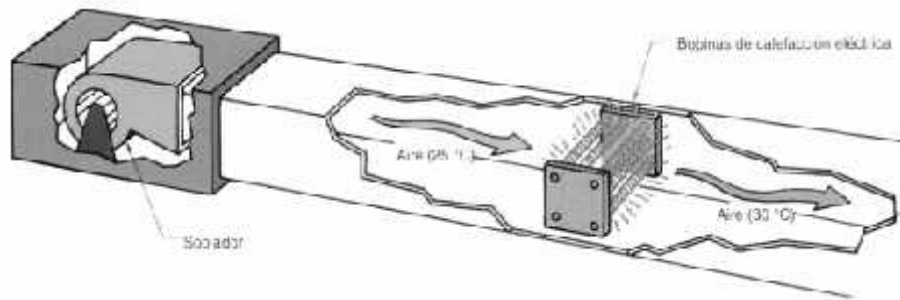


Figura 3.32: Montaje de Equipos sobre Prototipo de Sistema HVAC
Fuente: <http://www.bae.uky.edu/>

3.2.9. Manufactura

Dentro de la manufactura se procedió a la construcción del prototipo de calefacción que nos servirá desarrollar el control cascada por medio de equipos actuadores, sensores, equipos de control como el PLC y dispositivos electrónicos donde se demostrará su funcionamiento según las figuras 3.33, 3.34, 3.35 y 3.36.

La construcción consiste en un montaje mecánico, canalización eléctrica, instalación de equipos con sus dispositivos y el conexionado en sus respectivos terminales, se tomaron referencias de sus medidas basados en sus hojas de fabricante y se plasmaron en planos tipo mecánico, eléctrico y plano PI&D de instrumentos y equipos de control.



Figura 3.33: Montaje de estructuras
Fuente: Fotografía



Figura 3.34: Montaje de componentes y accesorios.
Fuente: Fotografía



Fig.3.35: Canalización Eléctrica, cableado y conexionado.
Fuente: Fotografía



Figura. 3.36: Prototipo de Control Multivariable
Fuente: Fotografía

3.3 Configuración del Sistema de Control Multivariable

Este prototipo fue implementado con el propósito de mostrar el proceso de diseño para la selección de instrumentos, equipos eléctricos, hardware de control automático y el cálculo y programación del software para realizar el control cascada de dos lazos la cual se calculó para el diseño de planos mecánicos que sirven para el dimensionamiento físico del prototipo, planos eléctricos para el conexionado entre los equipos eléctricos e instrumentos y por último el plano PI&D que sirve para la contabilidad, ubicación y enlaces de comunicación electrónica de nuestro sistema de control entre los instrumentos

y equipos de control. Basado en el método básico para implementar un controlador se tomó los siguientes aspectos para el diseño de control cascada.

- Descripción del sistema
- Requerimientos.
- Identificación de lazos de control.
- Diagrama de Bloques.
- Modelamiento matemático.
- Calculo de parámetros de control multivariable.
- Selección del autómatas programable
- Diagrama de Flujo para organización de decisiones.
- Programación del PLC
- SCADA.

3.3.1 Elementos del Sistema

Basándose en la metodología de procesos industriales se organiza el sistema HVAC por medio de diagrama de bloques. El control multivariable cascada se diseña guiándose del diagrama de bloques, lo cual aplica dos controles PID por cada lazo de control, siendo uno para el control de temperatura (set Point) con su respectivo sensor de temperatura como variable del proceso y la resistencia calefactora como su actuador maestro, el segundo lazo de control es para el control de flujo del conducto (set Point) teniendo al sensor de flujo como variable del proceso y el ventilador centrífugo controlado por medio de un modulador por ancho de pulso según mostrando la figura 3.37.

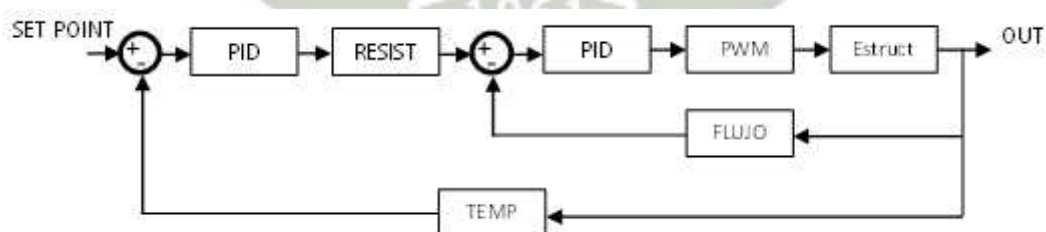


Figura. 3.37: Diagrama de Bloques del Prototipo de Control Cascada
Fuente: Elaboración Propia

Una vez representado el lazo del sistema, se analizó la arquitectura empezando con el Set point de consigna de la temperatura que ingresará a un control proporcional integrativo cuya salida controlará el tiempo de conmutación de la resistencia calefactora, esta misma

salida será el set point de un control proporcional integrativo derivativo cuya salida controlará la velocidad con la cual el ventilador regula el flujo del conducto (Conducto Acrílico), el lazo de control PID se cerrará por medio del sensor de Flujo que en este módulo estará midiendo el flujo del conducto y el lazo de control PID se cerrará por medio de un sensor de temperatura.

La necesidad de tener dos lazos de control es que el lazo de control maestro no proporciona un control satisfactorio. Debido a esto, se debe disponer de un lazo de control secundario que detecte la ocurrencia de una perturbación importante en un instante de tiempo y mejore la respuesta del lazo primario ya que según este tipo de método de control involucra sistemas de control de retroalimentación que estén ordenados uno dentro de otro, ósea el lazo secundario se diseña para mejorar la respuesta de la temperatura del primer lazo maestro diseñado también.

Este control hace la respuesta de la temperatura más estable y más rápida eliminando los efectos de las perturbaciones a una mínima escala y mejora la dinámica del lazo de control maestro debido a que su control retroalimentado simple no provee un desempeño satisfactorio a lazo cerrado. Para ello se analizó el sistema mediante su comportamiento dinámico y se modeló matemáticamente para definir los lazos de temperatura y flujo que serán las variables de proceso que se estudiaron. Posteriormente cada lazo será integrado uno dentro de otro definiéndolos como al primero lazo de control maestro que lleva la variable de temperatura ya que según el método de control cascada debe ser la variable de menor rapidez la cual consignaremos como set point maestro. Luego se continuó por identificar el segundo lazo de flujo como secundario esclavo ya que este es más veloz su rapidez de cambio. Una vez identificados los dos lazos de control se comenzó la tarea de unirlos.

- ✓ Lazo de control de temperatura.
 - Controlador PID maestro.
 - Resistencia calefactora.
 - Sensor de temperatura.

- ✓ Lazo de control de flujo.
 - Controlador PID esclavo.
 - Ventilador.
 - Sensor de flujo.
 - Conducto de aire.

3.3.2 Modelamiento e implementación de control

El comportamiento se caracteriza por mostrar la dependencia de la temperatura y el flujo de aire respecto al tiempo siendo característica para el diseño de control cascada. Basándose en la teoría del equilibrio térmico de la primera ley de la termodinámica se analizó el comportamiento que relaciona la temperatura del calefactor, el flujo de aire que transporta el calor y la transferencia de temperatura del calefactor y la temperatura del medio ambiente que hace posible el balance térmico entre ambas temperaturas y darnos una temperatura resultante, la cual es la temperatura que se consigna en el controlador. Se tabula los valores de la temperatura y se genera su gráfica, después se calcula su pendiente y luego se aproxima a una recta y se halla su ecuación. De igual forma se procede con el lazo de flujo.

$$m \Delta T = \frac{55-25}{5-0} = 6 \quad ; \quad b = 25 \quad ; \quad T \text{ min} = m \Delta T * t + 25$$

La implementación del sistema de control multivariable cascada consistió en el diseño de control de dos lazos de temperatura y de flujo efectuándose igual que en los controladores de regulación realimentados de lazo cerrado simple pero en este caso dividido en dos etapas primero el diseño del lazo de flujo y segundo, el diseño del lazo de temperatura plasmados en la tabla 3.11 y la figura 3.38.

PCM	0	40	80	120	160
Segundos	0	0.27	0.48	0.71	0.99
Flujo %	0%	25%	50%	75%	100%

Cap.	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Temp.	25	28.2	31.6	34.3	35.8	40.1	42.8	45.7	49.2	52.1	54.7
Min.	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5

Tabla 3.11: Valores referenciales de los Lazos
Fuente: Elaboración Propia

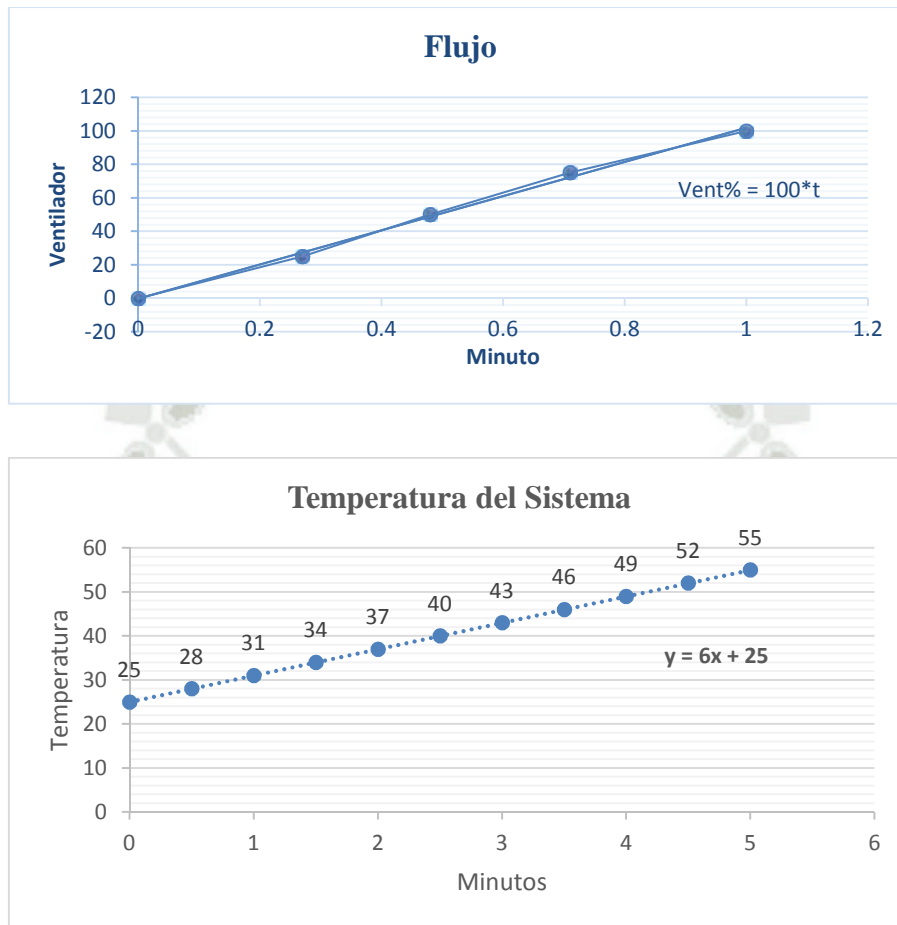


Figura 3.38: Graficas Referenciales de Temperatura y Flujo
Fuente: Elaboración Propia

Se analizó en el dominio transitorio donde la temperatura en el con un flujo constante de aire que transporta el calor luego se tomó valores de temperatura. Luego se analiza el flujo de aire será que proporcionado por el ventilador que gradualmente ira en aumento en el rango de 0 a 100% la cual se tabula para que pueda escalar por cada porcentaje el valor de salida que tendrá el ventilador para generar flujo de aire que se analiza en el comportamiento de los actuadores.

Las condiciones requeridas del sistema de calefacción será mantener el valor de la temperatura en un punto estable y atenuar errores. La variable de flujo permitirá tener el control sobre la RPM del ventilador y principalmente permitir el flujo de calor.

3.3.3 Diseño del Control Multivariable CASCADA

Debido a la necesidad de mantener consignada la temperatura y el flujo sin errores se empleó una estrategia de control, que basado en la teoría de automatización, se seleccionará el control proporcional para estabilizar las frecuencias medias, control derivativo para frecuencias bajas y control integrativo para frecuencias altas, que resumido se trata del control PID por ser más eficiente. Para el diseño del control se halló sus parámetros por medio del método de sintonización empleando técnicas heurísticas, con las cuales se determina valores adecuados para los parámetros del PID.

Variables	Kp	Ti [min]	Td [min]
Nivel	<1.0	10	-
Temperatura	0.2 - 0.6	2 - 15.0	0.25
Flujo	1.5	0.1	-
Presión Líquido	0.5 - 5.0	0.0005 - 0.5	-
Presión Gas	0.01 - 0.5	0.1 - 50	0.02 - 0.1
Cromatógrafo	1.0 - 20.0	10 - 120	0.1 - 20

Tabla 3.12: Valores referenciales de parámetros del algoritmo PID
Fuente: Elaboración Propia

Se notó que cada proceso tiene un comportamiento distinto por lo que no existen valores universales para los parámetros, siendo valores diferentes para cada proceso. Se utilizará referencialmente una tabla que contiene rangos de distintos valores de diferentes procesos. Para el cálculo de los parámetros, primero se registró los valores mediante la respuesta de la curva de cada lazo (de temperatura y flujo) que reaccionan frente a sus respectivas entradas de flujo con 100% y temperatura con 55C que se muestran en la figura 3.39.

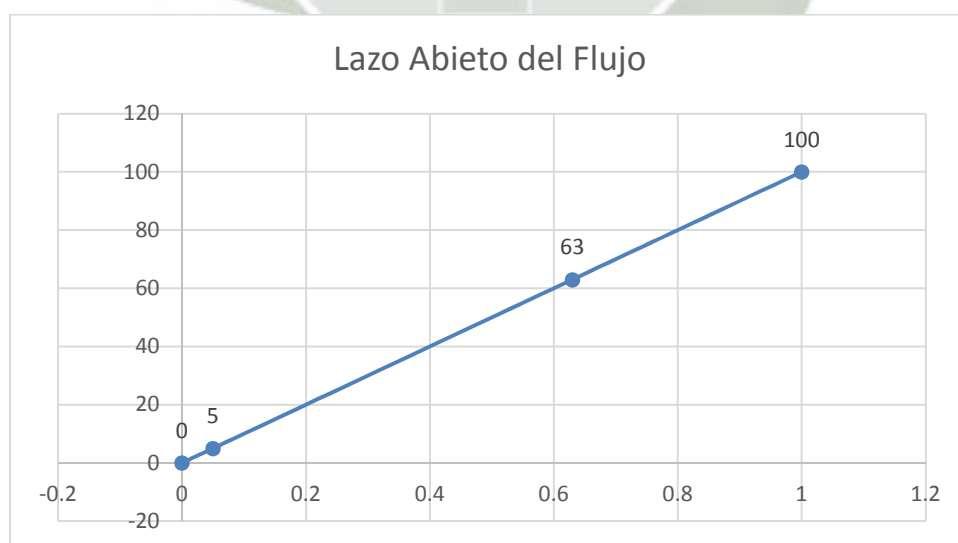
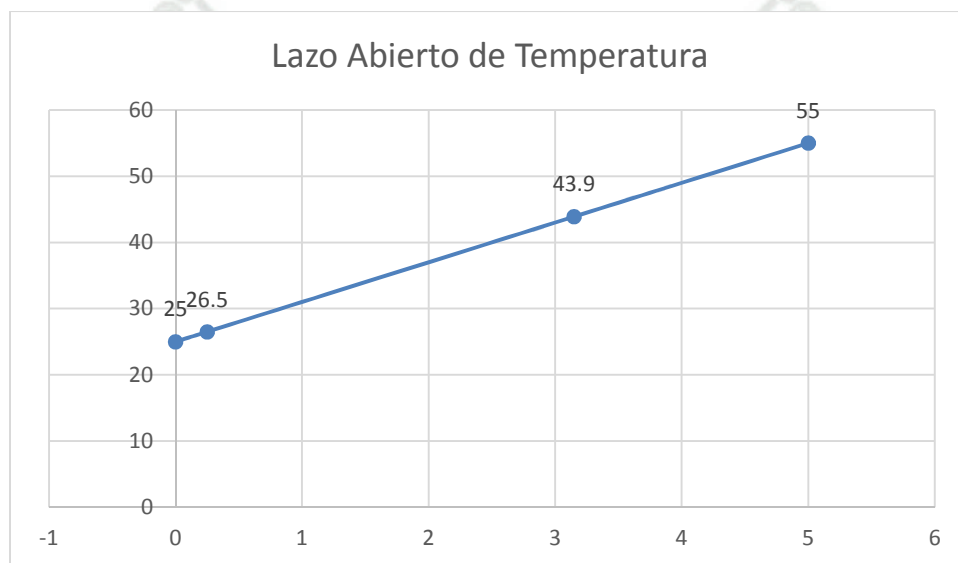
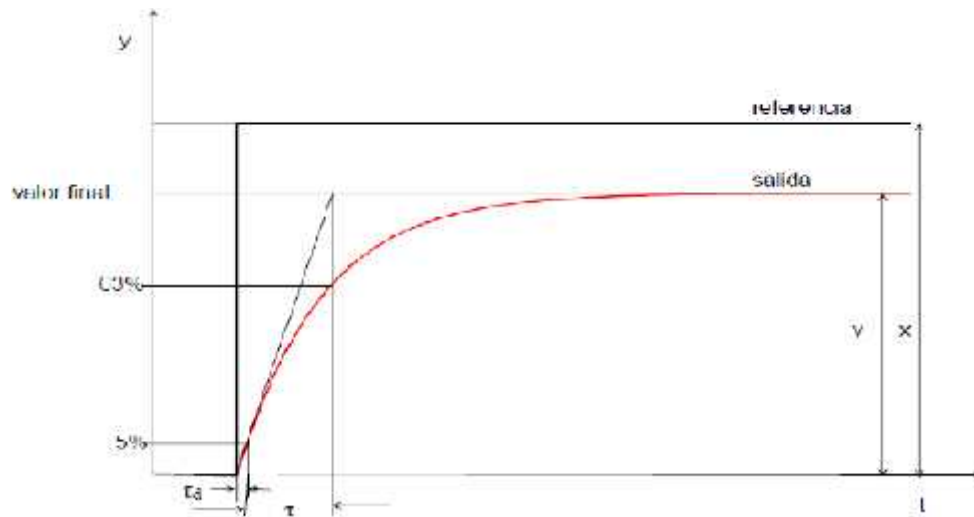


Figura. 3.39: Graficas de Lazos de Control
Fuente: Elaboración Propia

%	0%	5%	63%	100%
Minutos	0	0.25	3.15	5
Temperatura	25	26.5	43.9	55

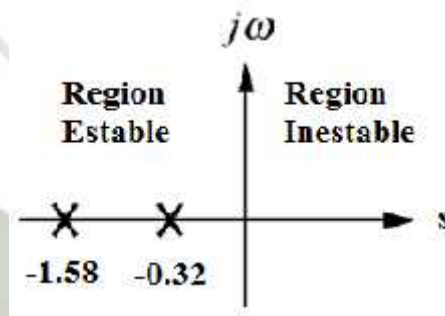
$$0.25 \times 60 = 15 \text{ segundos}$$

$$3.15 \times 60 = 189 \text{ segundos}$$

Segundos	0	0.05	0.63	1
Flujo%	0%	5%	63%	100%

Tabla 3.13: Valores de Lazos de Temperatura y Flujo
Fuente: Elaboración Propia

Basado en la tabla 3.13 se analizó la estabilidad de los lazos de temperatura y flujo en el dominio de Laplace la cual hace referencia al campo frecuencial donde se muestra por medio del diagrama de Nyquist los polos de cada lazo que se encuentran ambos en la región estable mostrando la ecuación 3.5.



$$G1(t) = 6t$$

$$G2(t) = 100t$$

$$\mathcal{L}\{G1(t)\} = \mathcal{L}\{6t\}$$

$$\mathcal{L}\{G2(t)\} = \mathcal{L}\{100t\}$$

$$G1(s) = \frac{1}{2.15s + 1} * e^{-0.5*s}$$

$$G2(s) = \frac{1}{0.63s + 1} * e^{-0.05*s}$$

$$2.15s + 1 = 0$$

$$0.63s + 1 = 0$$

$$s1 = -\frac{1}{2.15}$$

$$s2 = -\frac{1}{0.63}$$

$$s1 = -0.32$$

$$s2 = -1.58$$

Ecuación 3.5. Lazos de Control
Fuente: Elaboración Propia

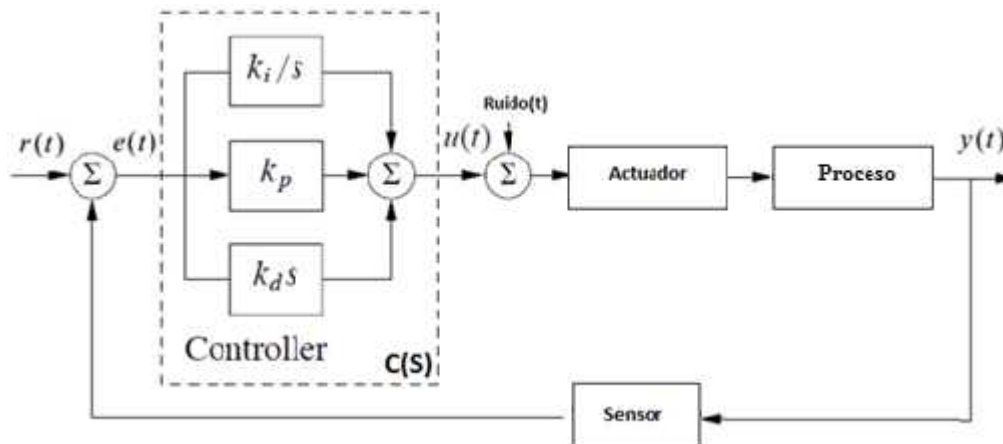
Una vez identificada la dinámica de cada lazo se procede a la técnica de sintonización la cual es utilizada para hallar los parámetros de control del proceso HVAC que permiten la configuración de los controladores PID para la cual entonces primero se analizó la curva característica por medio del lazo abierto, lo cual se aplicó la técnica de sintonización donde se aproximó las rectas a valores de 63% para la constante de tiempo T y 5% para el retardo td del sistema, que fue calculado en cada lazo de control. Teniendo estos valores de los lazos abiertos se procedió con la implementación de los parámetros del controlador empleando el método de sintonización de Ziegler-Nichols ya que permite obtener los valores de ajuste del control PID conforme a la tabla 3.14 de parámetros del controlador.

Control	K_c	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K} * \frac{T}{td}$	-	-
PI	$\frac{0.9}{K} * \frac{T}{td}$	$3.33 * td$	-
PID	$\frac{1.2}{K} * \frac{T}{td}$	$2 * td$	$0.5 * td$

PID 1	$K_c = \frac{1.2}{3} * \frac{2}{0.5}$ $K_c = 0.25$	$T_i = 2 * 0.5$ $T_i = 1$	$T_d = 0.5 * 0.5$ $T_d = 0.025$
PID 2	$K_c = \frac{3.6}{100} * \frac{1}{0.05}$ $K_c = 0.72$	$T_i = 2 * 0.05$ $T_i = 0.1$	$T_d = 0.5 * 0.05$ $T_d = 0.025$

Tabla 3.14: Parámetros de control de Temperatura y Flujo
Fuente: Elaboración Propia

Hallados los parámetros, se implementa la estructura del controlador PID basado en la ecuación 3.6 en la que la señal de control se expresa en función del error basándose en la expresión estándar, donde se implementó la ecuación de transferencia del controlador basado en los parámetros de K_c ganancia proporcional, T_i tiempo integrativo y T_d tiempo derivativo.



$$U e = P e + I e + D(e)$$

$$u = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} = k_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right)$$

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$$L\{u(t)\} = L\left\{ K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \right\}$$

$$U(s) = K_c \left[E(s) + \frac{1}{\tau_i s} E(s) + \tau_d s E(s) \right]$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left[1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right]$$

$$G_{c1}(S) = 2.52 \left[1 + \frac{1}{0.5s} + 0.125s \right]$$

$$G_{c2}(S) = 0.15 \left[1 + \frac{1}{0.1s} + 0.025s \right]$$

Ecuación 3.6. Ecuaciones de Control
Fuente: Elaboración Propia

Plasmando los métodos de control por medio del desarrollo de la ecuación 3.7, se calculó la los parámetros que caracteriza la función del control basado en el dominio de Laplace haciendo referencia al campo frecuencial ya que se considera su representación de mayor fidelidad comparado con el dominio del tiempo porque permite visualizar claramente los parámetros que se necesitan para la configuración de los lazos PID y resume con mayor precisión y facilidad el modelo matemático.

$$G_2 = \frac{G_{P2} G_{CS}}{1 + G_{P2} G_{CS} H_1}$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G(s) * G_{C2}}{1 + G(s) * G_{C2} * H(s)} = \frac{\frac{1}{s+0.63} * \frac{1}{0.1s}}{\frac{1}{s+0.63} * \frac{1}{0.1s} + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2 + 0.63s + 1.6} * 1.2$$

Ecuación 3.7: Lazo de Control Secundario

Fuente: Elaboración Propia

Una vez implementados los controles PID, se identificó cada elemento para ordenarlos grupalmente en una ecuación y luego se insertó el lazo de control secundario en el interior del lazo primario como la figura 3.40.

- G_{CM} : Control PID (Control Maestro)
- G_{P1} : Resistencia Calefactora (Proceso 1)
- G_{CS} : Control PID (Control Esclavo o Slave)
- G_{P2} : PWM Ventilador + Estructura Conducto (Proceso 2)
- H_1 : Sensor de Flujo (Medición 1)
- H_2 : Sensor de Temperatura (Medición 2)
- R: Set Point
- C: Control
- G_2 : Lazo de Control Secundario

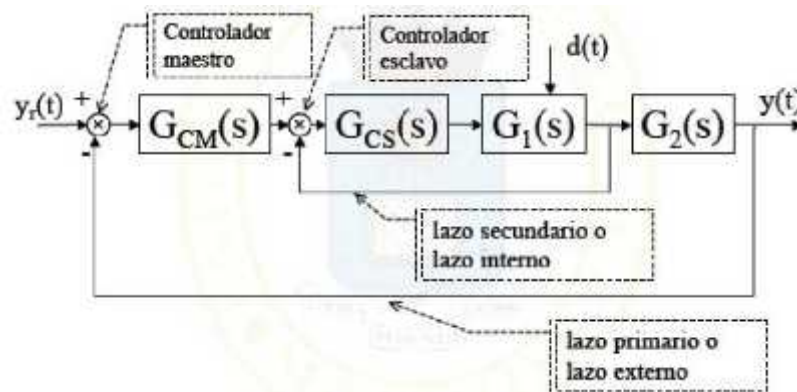


Figura. 3.40: Diagrama de Bloques de Control Multivariable CASCADA

Fuente: <http://www.continental.edu.pe/>

Luego se configuró la salida del controlador del primer lazo de temperatura como punto de ajuste para el segundo lazo de flujo de aire para que la salida del lazo secundario sea la que actúe sobre el proceso de calefacción y elimina también perturbaciones de su propio lazo de flujo y pueda aumentar en la capacidad de producción, finalmente se procede a obtener la fórmula matemática del lazo de control cascada según las ecuaciones 3.8 y 3.9 respectivamente.

$$C = \frac{G_{P1} G_2 G_{CM}}{R = 1 + G_{P1} G_2 G_{CM} H_2}$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G_1(s) * G_2(s) * G_{c1}}{1 + G_1(s) * G_2(s) * G_{c1} * H(s)} = \frac{\frac{1}{s^2+0.63s+1.6} * 1.2 * \frac{1}{3.15s}}{\frac{1}{s^2+0.63s+1.6} * 1.2 * \frac{1}{3.15s} + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2 + 0.63s + 2.07} * 1.5$$

Ecuación 3.8: Lazo de Control Cascada

Fuente: Elaboración Propia

La cual comparando su equivalente estándar obtendremos los siguientes parámetros:

$$Y(s) = \frac{K * Wn^2}{s^2 + 2\zeta Wn + Wn^2} * \frac{Ke}{s}$$

Comparando:

$$\omega_n^2 = 2.07 \quad ; \quad 2 * \zeta * \omega_n = T1$$

$$\omega_n = 1.44 \quad ; \quad \zeta = \frac{1}{2 * \sqrt{2.07}} = 0.5$$

Ecuación 3.9: Parámetros de la respuesta al escalón

Fuente: Elaboración Propia

Dónde:

- ✓ n es la frecuencia natural no amortiguada y
- ✓ δ es el coeficiente de amortiguamiento.

Del cual entonces procedemos a hallar la respuesta del sistema en el dominio del tiempo por medio de la transformada invertida de Laplace sobre la función de transferencia en el dominio de frecuencial S según es mostrada en la ecuación 3.10.

$$\mathcal{L}^{-1}\{r(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\left(\frac{K_s}{s}\right) * \frac{k * \omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2}\right\}$$

$$y(t) = \frac{1.5 * 1.2}{\sqrt{1 - 0.5^2}} * \text{Sen}(0.5 * 0.87 * t + \phi)$$

$$y(t) = 2 * \text{Sen}(0.4 * t + \phi)$$

Obteniéndose:

$$\text{tg}(\phi) = \frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{\delta} \quad \phi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{\delta}\right)$$

$$\text{tg}\phi = \frac{0.87}{0.5} = 1.74 \quad \phi = \text{atg}0.03 = 60$$

Ecuación 3.10: Parámetros de Función de Transferencia
Fuente: Elaboración Propia

Dónde se obtiene parámetros como en la ecuación 3.11

- ✓ t_d : tiempo retardo el cual tarda en llegar al 50% del valor final.
- ✓ t_r : tiempo de crecimiento.
- ✓ t_p : tiempo de pico, tomando sobre el primer pico de sobre impulso
- ✓ SP : Sobre impulso máxima, medido desde la unidad.
- ✓ t_s : tiempo establecimiento de la señal con un rango de error de 2-5%.

Calculándonos:

$$t_r = \frac{\pi - \phi}{1 - \delta^2} = \frac{3.14 * 0.66}{0.87} = 2.38 \text{ Seg} \quad t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{3.14}{1.44 * 0.87} = 2.5 \text{ min}$$

$$t_s \ 5\% = \frac{3}{\omega_n \zeta} = \frac{3}{0.5 * 1.44} = 4.17 \text{ min} \quad t_s \ 2\% = \frac{4}{\omega_n \zeta} = \frac{4}{0.5 * 1.44} = 5.5 \text{ min}$$

Ecuación 3.11 Parámetros de la respuesta gráfica del sistema
Fuente: Elaboración Propia

Y Graficando $y(t)$ obtendremos finalmente los últimos parámetros a considerar según la figura 3.41 y su equivalencia en la ecuación 3.12.

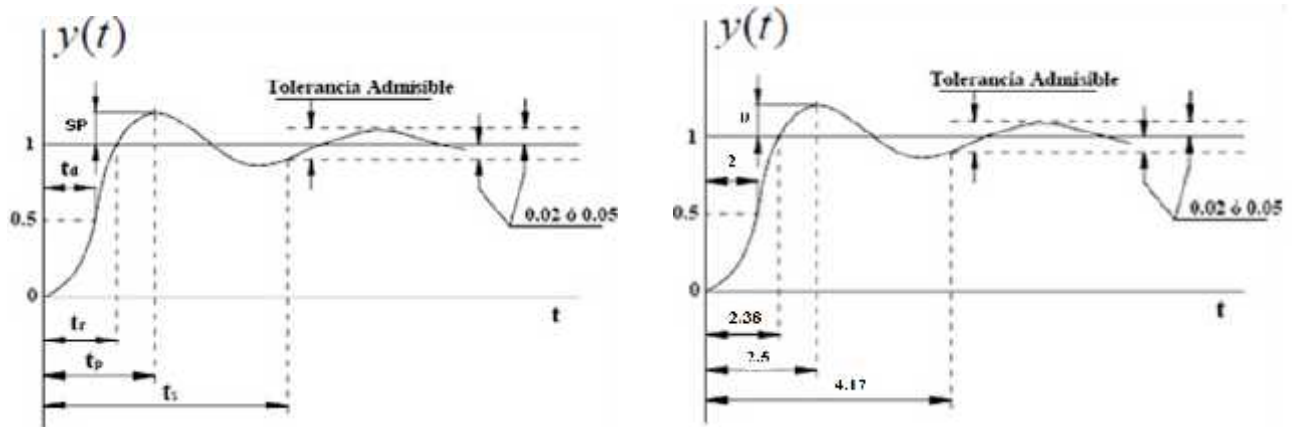


Figura. 3.41 Grafica Estándar de la respuesta del sistema
Fuente: Elaboración Propia

La cual comparando su equivalente estándar obtendremos los siguientes parámetros:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2 + 0.63s + 1.6} * 1.2$$

Comparando:

$$\omega_n^2 = 1.6 \quad ; \quad 2 * \zeta * \omega_n = T1$$

$$\omega_n = 1.26 \quad ; \quad \zeta = \frac{1}{2 * 1.26} = 0.39$$

Calculádonos:

$$\operatorname{tg}(\phi) = \frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{\delta} \quad \phi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{\delta} \right)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{0.91}{0.39} = 2.35 \quad \phi = \operatorname{atg} 2.35 = 67$$

Obteniéndose:

$$tr = \frac{3.14 * 0.62}{0.91} = 2.16 \text{ Seg}$$

$$tp = \frac{3.14}{1.26 * 0.91} = 2.73 \text{ seg}$$

$$SP = 0$$

$$ts(5\%) = \frac{3}{0.39 * 1.26} = 6 \text{ min}$$

$$ts(2\%) = \frac{4}{0.39 * 1.26} = 8.14 \text{ min}$$

Ecuación 3.12: Parámetros de Respuesta del Sistema
Fuente: Elaboración Propia

Comparando valores del lazo simple y con el lazo de control cascada sus cambios se verán en la tabla 3.15 donde se demuestra las mejoras, unas de ellas son los tiempos de estabilización que considerablemente mejora de 6.1 a 4.17 siendo de interés para tema de análisis del control propuesto que permita que el control mejore la calidad de producción del sistema HVAC.

Laos de control	Tr	Tp	Ts5%	Ts2%
Lazo Simple	2.16	2.73	6.1	8.14
Lazo Cascada	2.38	2.5	4.17	5.5

Tabla 3.15: Parámetros Calculados de Lazos de Control
Fuente: Elaboración Propia

Una vez calculados nuestros parámetros teóricos se prosiguió al diseño por computador del control cascada por medio de la programación del PLC vía software en programa ladder. Posteriormente se muestra la conversión de la salida del control cascada a señales digitales por PWM con el fin de insertar la lógica de control en los actuadores convirtiendo nuestro control cascada en más eficiente con ayuda de un control on-off complejo, que a diferencia de un simple (figura 3.42), posee un control multivariable de dos lazos modulado por PWM.



Figura.3.42: Ilustración de control on-off manual
Fuente: Elaboración Propia

3.3.4. Configuración del Modulador por ancho de pulso PWM

El control cascada produce una señal de control analógica la cual nace la necesidad de convertirla a una señal digital que sea en proporción de la salida de control multivariable cascada ya que el tipo de accionamiento de los dos actuadores (ventilador y calefactor) son únicamente del tipo digital on-off del cual solo responde a su funcionamiento únicamente cuando están energizados siendo característica de estos equipos modulación

por ancho de pulso PWM. Para ello se implementó un elemento adicional conformado de un modulador por ancho de pulso PWM por medio de software, del cual se moduló la señal de salida analógica de 0 a 10 voltios del control cascada a una señal on-off controlando su tiempo de encendido “TON” la cual se programó en proporciones de la salida del control cascada por medio de la técnica de escalamiento aplicada para las dos salidas, el ventilador y el calefactor por medio de un relé de estado sólido SSR mostrado su conexión en la figura 3.43

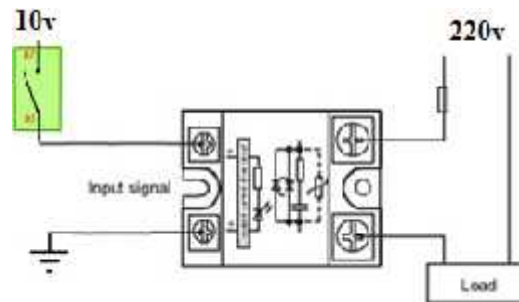


Figura. 3.43: Conexión de la Salida del PLC al SSR
Fuente: Elaboración Propia

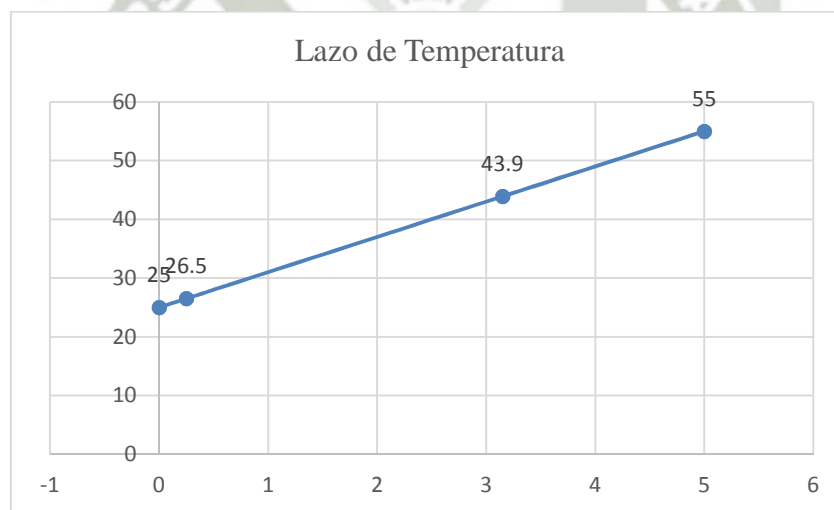


Figura. 3.44: Gráfica de Periodo de Lazo Principal.
Fuente: Elaboración Propia

Luego basado en la figura 3.44, el escalamiento está en función del periodo de tiempo la cual será determinada por la constante de tiempo “ τ ” la cual es determinada por el comportamiento del primer lazo de temperatura que anteriormente se analizó dando valor de 1.15 segundos dado que este es el instante de tiempo donde el la respuesta del lazo

alcanza un 63% del valor final. Sabiendo estos se calculó la ecuación 3.13 y su respuesta con la figura 3.45.

$$\begin{aligned} 55 - 25 &= 30 \\ 30 * 0.63 &= 18.9 \\ 18.9 + 25 &= 43.9 \end{aligned}$$

$$\frac{\zeta}{20} < T < \frac{\zeta}{10} = \frac{1.15}{20} < T < \frac{1.15}{10}$$

$$0.06 < T < 0.12$$

$$\begin{aligned} T &= 10 \\ T_{on} &= CV \end{aligned}$$

$$T_{on} = \frac{T * CV}{10} = \frac{T * CV}{10} = \frac{10 * CV}{10}$$

$$T_{on} = 1 * cv$$

Ecuación 3.13: Cálculo del Periodo del Lazo Principal.

Fuente: Elaboración Propia

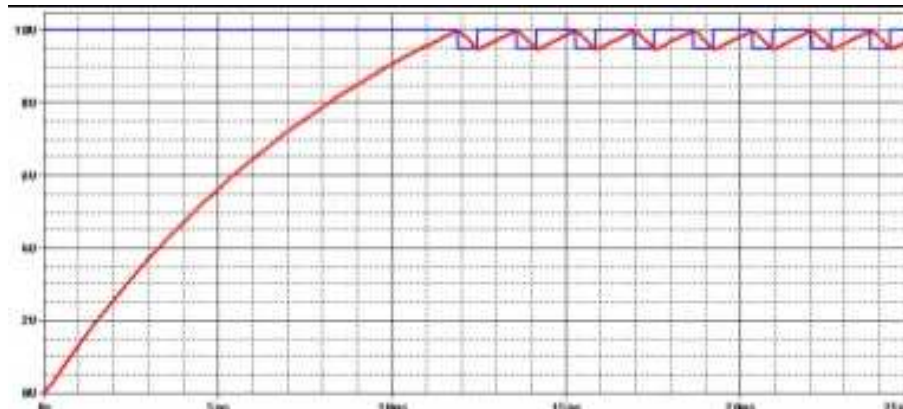
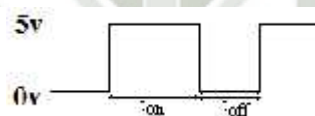


Figura. 3.45: Respuesta del Sistema controlador por PWM

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Programación del Controlador Rockwell Software

El controlador lógico programable de este proyecto es del fabricante Allen Bradley del modelo Micrologix 1200, este controlador pertenece a la escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica Santa María. La comunicación SCADA está establecida entre este controlador industrial y una estación de supervisión basada en PC

por medio de un cable de comunicación RS232. Los dispositivos de comunicación SCADA pertenecen también a la escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica Santa María.

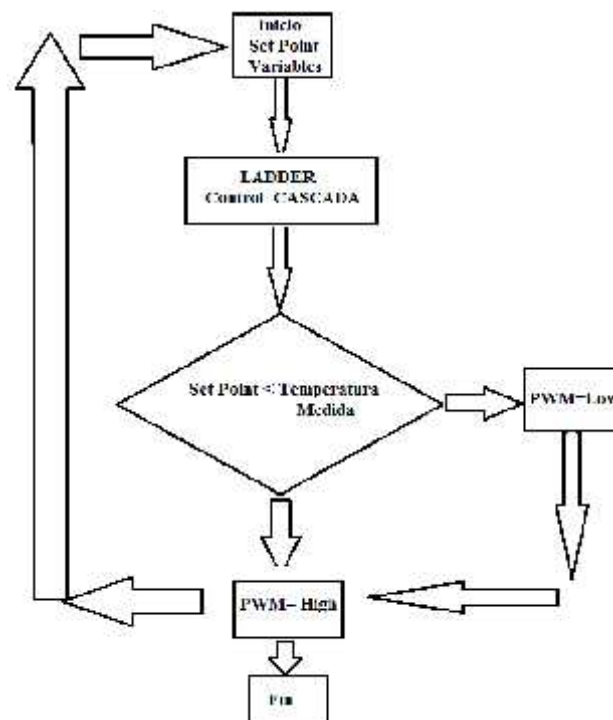


Figura. 3.46: Diagrama de Flujo
Fuente: Elaboración Propia

Basado en la figura 3.46 se fija ideas para la lectura de señales de sensores y envío de señales de control a los actuadores las cuales se les agregó una extensión modular de entradas y salidas analógicas de serie 1762-IF2OF2 que tiene dos entradas analógicas y cuatro salidas analógicas. Esta extensión modular pertenece a la escuela profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica Santa María.

3.4.1 Configuración de Módulos Analógicos I/O

Las variables medidas de campo de los sensores se representan por medio de la señal analógica de 0-10 voltios y 4 a 20 miliamperios las cuales la emisión de cada señal que ingresa a la entrada de los módulos serán ingresadas por un convertidor A/D interno del módulo que permita convertirlas a señales digitales de 16 bits al CPU y luego sean almacenadas en una zona de memoria para que puedan ser procesadas en el programa usuario y posteriormente puedan ser medios de transmisión de señales de salida que serán

dirigidas al campo por medio de un proceso inverso de conversión D/A como se muestra la figura 3.47.

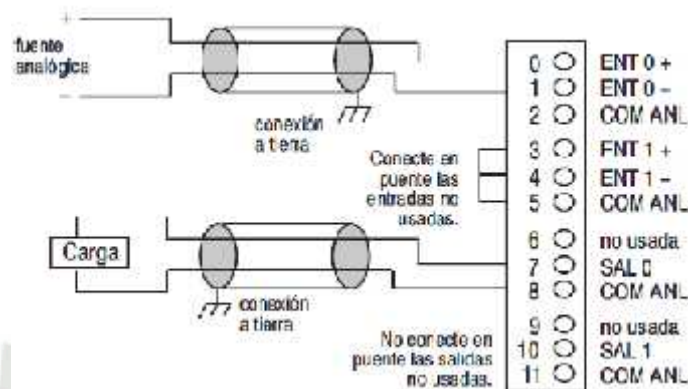


Fig. 3.47: Esquema de conexión del módulo analógico.
Fuente: Elaboración Propia

3.4.2 Configuración del sensor al PLC.

Después de la etapa de conversión la siguiente etapa es la etapa de escalamiento donde hace referencia al proceso de adecuar las variables análogas medidas a valores de lectura, estos valores se transforman a valores fluctuantes entre 0 y 32767 desde sus valores de voltaje de 0 a 10 voltios que provienen del sensor con el propósito de poder procesarlas dentro del programa de control del PLC en valores de 16 bits que serán ubicadas por medio de la tabla 3.16 y su figura 3.48.

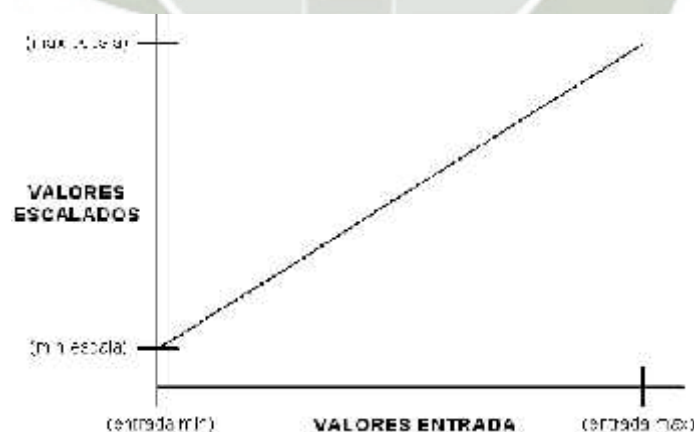


Figura. 3.48: Aproximación entre valores de entrada y valores escalados
Fuente: Elaboración Propia

Posición de Bit "1"	Valor		Posición de Bit "1"	Valor	
1	2 ⁰	1	10	2 ¹⁰	1096
2	2 ¹	2	14	2 ¹²	8192
3	2 ²	4	15	2 ¹³	16384
4	2 ³	8	16	2 ¹⁴	32768
5	2 ⁴	16	17	2 ¹⁵	65536
6	2 ⁵	32	18	2 ¹⁷	131072
7	2 ⁶	64	19	2 ¹⁸	262144
8	2 ⁷	128	20	2 ¹⁹	524288
9	2 ⁸	256	21	2 ²⁰	1048576
10	2 ⁹	512	22	2 ²¹	2097152
11	2 ¹⁰	1024	23	2 ²²	4194304
12	2 ¹¹	2048	24	2 ²³	8388608

Tabla 3.16: Valores de Bits
Fuente: Fuente: <http://www.rockwellautomation.com>

El valor equivalente se convierte a un valor de 16 bits donde se obtiene el rango de valores a una equivalencia de 10 a 32767 durante la conversión de datos, la cual es acorde a la entrada de voltaje de 0 a 10 voltios que son identificados en la tabla 3.17.

Representación Decimal	Corriente/Voltaje
0 a +32 767	0 a 21 mA
0 a 31 208	0 a +20 mA
6 242 a 31 208	4 a +20 mA
-32 768 a 32 764	-10 a +10 V dc
0 a 32 764	0 a +10 V dc
0 a 16 384	0 a +5 V dc
3 277 a 16 384	1 a 5 V dc

Tabla 3.17 rangos de Conversión A/D
Fuente: Fuente: <http://www.rockwellautomation.com>

Luego según la figura 3.51 el escalamiento se da por medio de la instrucción de escalamiento que puede crear una relación lineal entre el rango de valores escalados de entrada y el rango de valores escalados de salida ya sean del tipo entero o flotante y finalmente los resultados se transmiten a la dirección de salida para que posteriormente sean convertidor desde valores digitales a análogos por el convertor D/A.

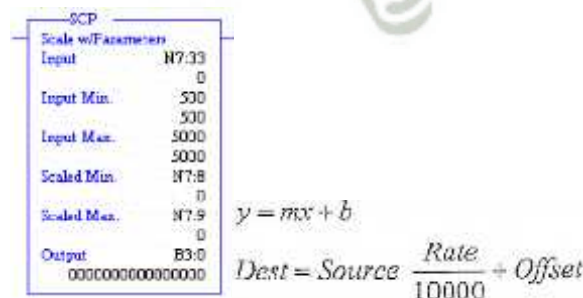


Figura. 3.51: Bloque de escalamiento proporcional
Fuente: Fuente: <http://www.rockwellautomation.com>

3.4.3. Condiciones del Programa

1. El único set point será el de temperatura.
2. Se aplicará control cascada para una respuesta óptima empezando por el lazo maestro PID que está entre el sensor de temperatura y la resistencia calefactora, teniendo como entrada el Set Point ingresado por el usuario y el esclavo será también un lazo PID entre el sensor de flujo y el variador de velocidad del ventilador, teniendo como set point la salida controlada por el PID maestro.
3. En la vista frontal del tablero se ubican dos indicadores, uno color rojo, uno color verde. El indicador rojo se prenderá cuando la planta se encuentre totalmente detenida o cuando la temperatura del calefactor este fuera de sus niveles y se tenga que estabilizar. El indicador verde se prenderá cuando la planta esté funcionando sin ningún percance.
4. En el tablero se ubican también pulsadores normalmente cerrado el cual es utilizado como parada de emergencia ya sea por motivos que el usuario se encuentre en el área local y encuentre algún desperfecto y tome decisión de parar la planta y lo ponga 0 al set point
5. Después estaba ubicado un selector para el control local/manual del calefactor que en este caso será nuestra prioridad dando facilidad al operador de campo pueda seleccionar un valor de trabajo al calefactor las cuales son primero un valor promedio de funcionamiento del calefactor, segundo un valor bajo del calefactor y tercero un valor de 0 del calefactor dando que este se pueda estabilizar su temperatura por medio del flujo de aire del ventilador. Después se toma en cuenta que el programa de comunicación SCADA se debe colocar también una parada de emergencia virtual, la cual únicamente podrá ser accionada por el usuario u operador de control desde la PC de la estación de control agregándole también un HMI para el control automático que adicionalmente se propuso para una mejora futura. Después según las condiciones se deberán definir cuáles serán las entradas, salidas y Tags a utilizar en el programa, para esto nos basamos en la tabla 3.18

ÍTEM	EQUIPO	TAG	Señal de Control	Rango de Control	Tipo de Señal	Dirección en PLC	Ubicación
1.	Pulsador normalmente cerrado	Parada Emergencia (PE)	Discreto	110	VAC	I:0.0/0	Exterior del panel
2.	Pulsador normalmente abierto	Inicio	Discreto	110	VAC	I:0.0/1	Exterior de Panel
3.	Indicador Rojo	IND1	Discreto	220	VAC	O:0.0/0	Exterior del panel
4.	Indicador Verde	IND2	Discreto	220	VAC	O:0.0/1	Exterior del panel
5.	Selector	Select	Discreto	220	VAC	None	Exterior del panel
6.	Transmisor de Temperatura	TIT	Analógico	0 a 10	VDC	I:1.0	Interior de Panel
7.	Transmisor de Flujo	FIT	Analógico	0 a 10	VDC	I:1.1	Interior de Panel
8.	Flujómetro	FIT	Analógico	4 a 20	mA	I:1.0	Salida de Conducto
9.	Sensor de Temperatura	TT	Analógico	4 a 20	mA	I:1.0	Salida de Conducto
10.	Regulador de Calefactor	HC	Analógico	0 a 10	VDC	O:1.0	Interior de Panel
11.	Controlador de Velocidad	SC	Analógico	0 a 10	VDC	O:1.1	Interior del panel

Tabla 3.18: Tabla De Especificación De Equipos
Fuente: Elaboración Propia

3.4.4. Configuración de puertos de entrada serial RS232 (Port COM3)

Se procede a la configuración de la entrada de las señales de control por medio del puerto serial RS232 COM3 el cual se le conecta un cable conversor Serial RS232 a USB y que permitirá conectar la entrada por el terminal USB que será reconocido como cable serial según el esquema de la figura 3.49.

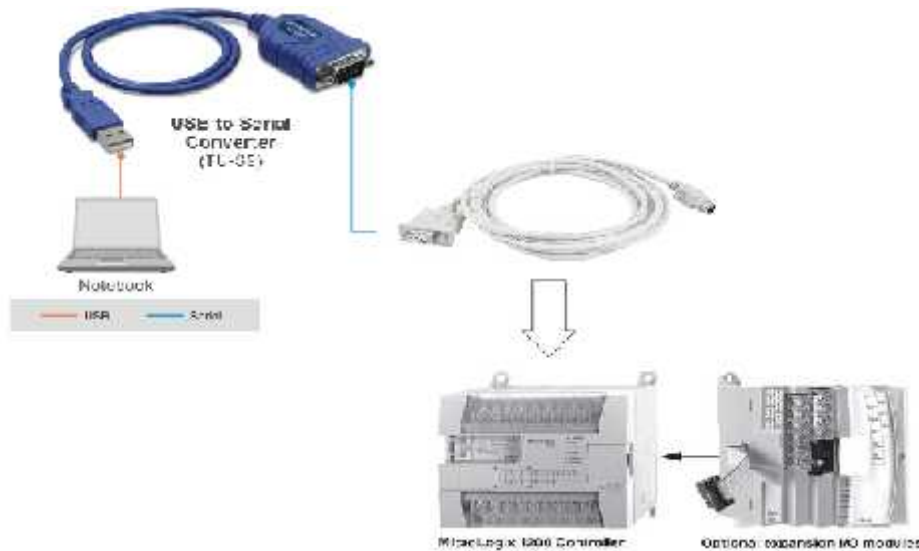


Figura. 3.49: Esquema de comunicación entre PC y PLC
Fuente: Elaboración Propia

Con el fin de que el cable conversor sea permitido para establecer comunicación con el PLC se actualiza por uso de su driver para que finalmente el sistema operativo reconozca el cable conversor y pueda estar en funcionamiento y permita establecer comunicación entre el PLC y el PC según la configuración de la figura 3.50. y figura 3.51.



Figura. 3.50: Configuración del conversor RS232 - UBS
Fuente: Driver TRENDnet

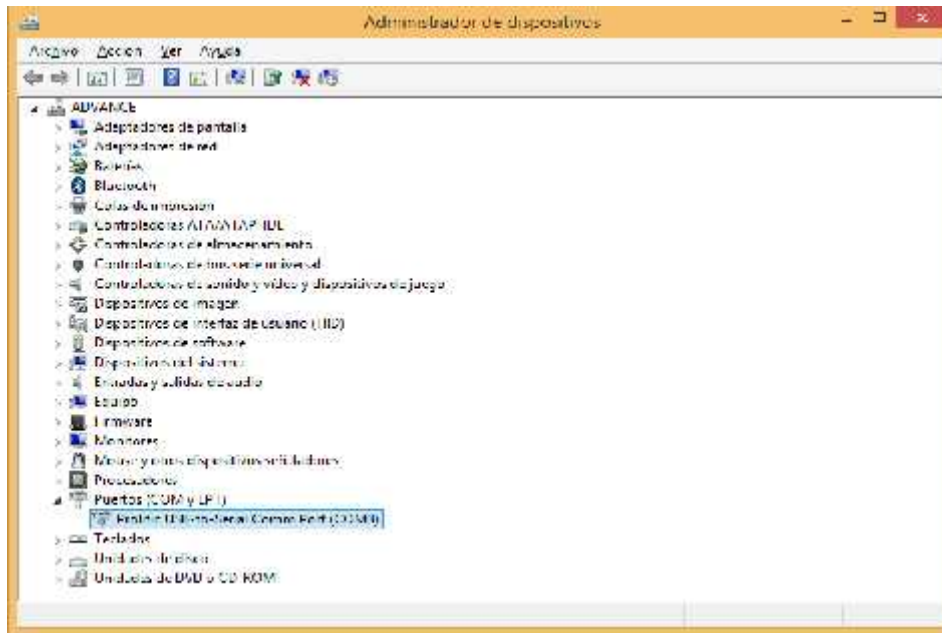


Figura. 3.51: Identificación de entrada Serial RS232
Fuente: Administrador de Windows 8

El driver permite la entrada de las señales de control al sistema y luego se repite el mismo procedimiento en el virtual machine (figura 3.52 y figura 3.53) para que las señales de control estén asociadas al programa ladder y SCADA directamente y ponga en marcha el prototipo de control CASCADA.

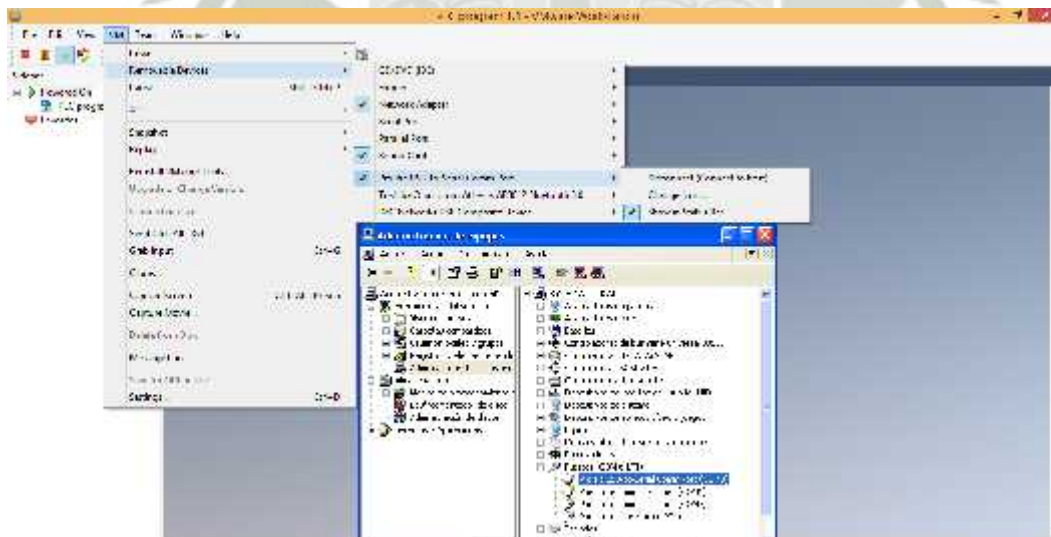


Figura. 3.52: Configuración de entrada serial al Virtual Machine
Fuente: Programa VMWARE

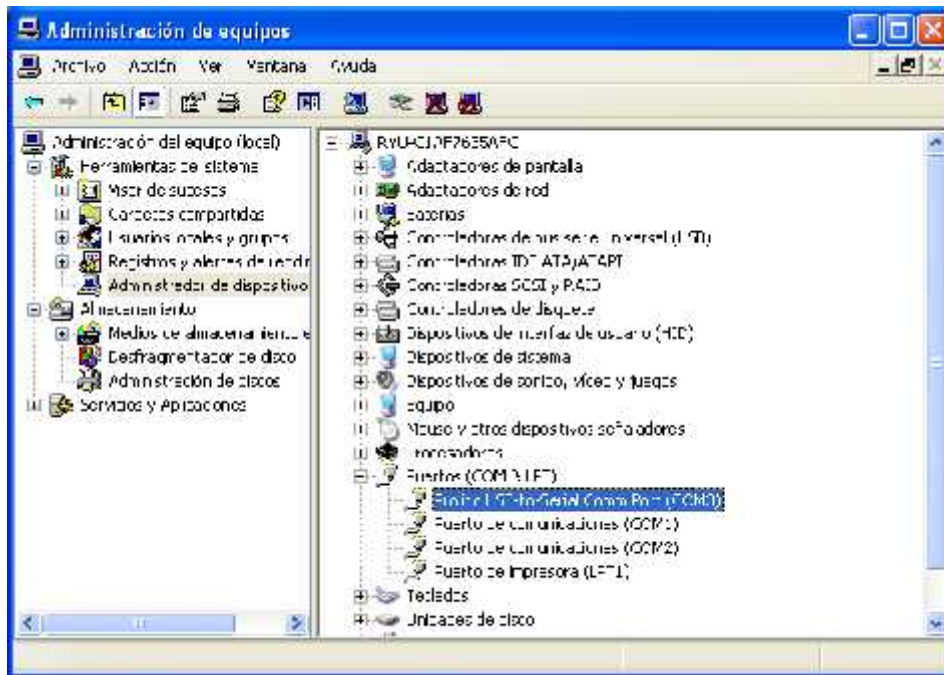


Figura. 3.53: Identificación de entrada Serial RS232
Fuente: Administrador del VMware Windows XP

3.4.5 Programación del RSLinx para comunicación entre PLC y PC

Este programa pertenece a la gama de Allen Bradley de Rockwell Automation que es un proveedor global de soluciones de automatización la cual interactúa dentro del entorno Microsoft Windows que particularmente para el desarrollo de esta tesis su versión es la 2.43.



Durante la programación del Autómata Micrologix 1200 se establece primero un lazo de comunicación y particularmente para el caso de la programación se realizará un modo de comunicación serial, es decir vía RS-232, y luego dentro del entorno Windows se accederá al programa RSLinx por medio del presente icono a continuación () y posteriormente se visualizará la siguiente ventana que se observa en la figura 3.54.



Figura. 3.54 Ventana Principal de RSLinx
Fuente: Programa RSLinx

Para asegurarnos primero se revisa la comunicación sea la correcta por medio del conexionado del puerto RS-232 entre la PC y el PLC y que el cable no presenta problemas físicos que puedan causar problemas y por último se enciende el PLC, después por medio del software se ingresan al entorno de programación a la opción “Configure Drivers” () donde aparecerá la ventana que se observa en la figura 3.55

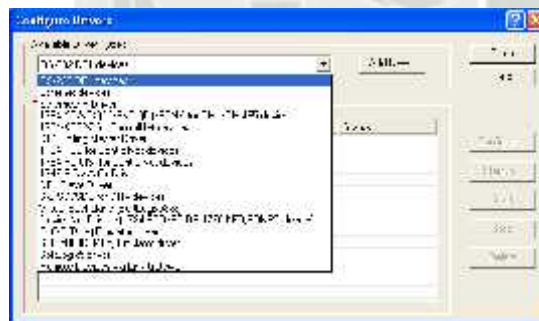


Figura. 3.55: Ventana Configure Drivers en Comunicación Con El Controlador
Fuente: Programa RSLinx

Dentro de la ventana de la figura 3.54, se desglosa la opción de “Available Driver Types” del cual se puede elegir las diferentes opciones de comunicación que nos muestra, particularmente en nuestro caso escogemos “RS-232 DF1 devices” ya que el puerto de comunicación que se ha conectado es el serial y por medio de este nos permitirá la programación. Después nos aparecerá la ventana en la figura 3.56



Figura. 3.56: Ventana de ingreso de nuevo Driver RSLinx
Fuente: Programa RSLinx

Dentro de la ventana “Add New RSLinx Driver” se coloca el nombre del lazo de comunicación que está realizando, para nuestro caso se dejó el nombre que el programa da por defecto. Después de aceptar aparece la siguiente ventana en la figura 3.57



Figura. 3.57: Ventana de Configuración RS232
Fuente: Programa RSLinx

En la ventana con el nombre de “Configure RS 232 DF 1 Devices ” de la figura 3.57, los datos que se tomaran en cuenta son el puerto de comunicación COM1 y la velocidad de comunicación que tiene la unidad de medida en baudios es de 19200 y luego se comprueban su legibilidad por medio de la opción de Auto-Configure ya que también permite verificar la conectividad efectiva entre el PLC y la PC, después de acceder a esta opción en el cuadro del costado aparecerá el aviso “Successful

Autoconfigure”. Una vez terminado todo esto se volverá al cuadro que muestra la figura 3.58, pero con la diferencia que en la parte inferior estará mencionado el lazo de comunicación entre la PC y el PLC como la figura 3.58

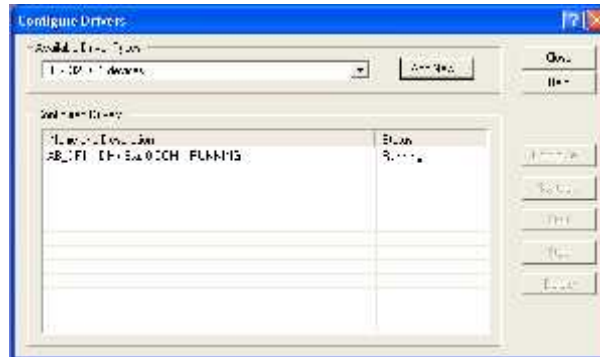



Figura 3.58 Ventana Configure Drivers después de Comunicarse Con El Controlador

Fuente: Programa RSLinx

Partiendo de la figura 3.58 vemos que efectivamente ya existe un lazo de comunicación entre la PC y el PLC y luego comprobamos ingresando a la opción “RSWho” (), que nos enviara a una ventana y dentro de ella visualizaremos al PLC (figura 3.59), en caso no exista comunicación el dibujo del PLC será mostrado tachado con un color rojo.

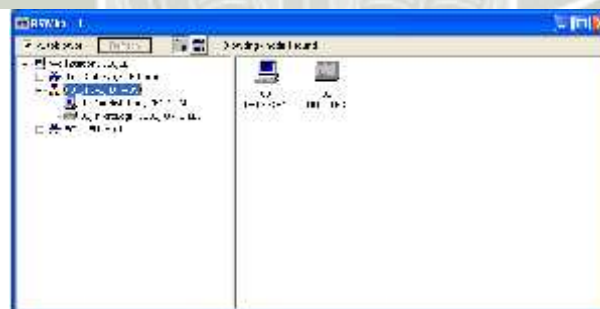


Figura 3.59: Ventana RSWho


Fuente: Programa RSLinx

Y finalmente podemos decir que existe una comunicación entre el PLC y el PC y posteriormente se puede proceder a su programación.

El programa RSLogix es un entorno de programación que proviene de la familia de Allen Bradley de Rockwell Automation que funciona dentro del Microsoft Windows y particularmente para esta tesis se trabaja con la versión 6.3.

Previamente se deberá conocer las condiciones de nuestro programa y las entradas, salidas y tags que se van a utilizar.

3.4.6 Configuración del RSLogix para la programación LADDER

Posteriormente se procede a obtener los rangos de trabajo que aplicaremos tanto en el nivel de temperatura del calefactor como en el set point. Para ello se realiza unas aproximaciones previas en programación para poder obtener resultados que posteriormente contrastaremos y finalmente nos ayuden a obtener el programa definitivo con los valores deseados, para esto se abre el programa RSLogix por medio de su ícono () , apareciendo en pantalla un cuadro según la figura 3.60.

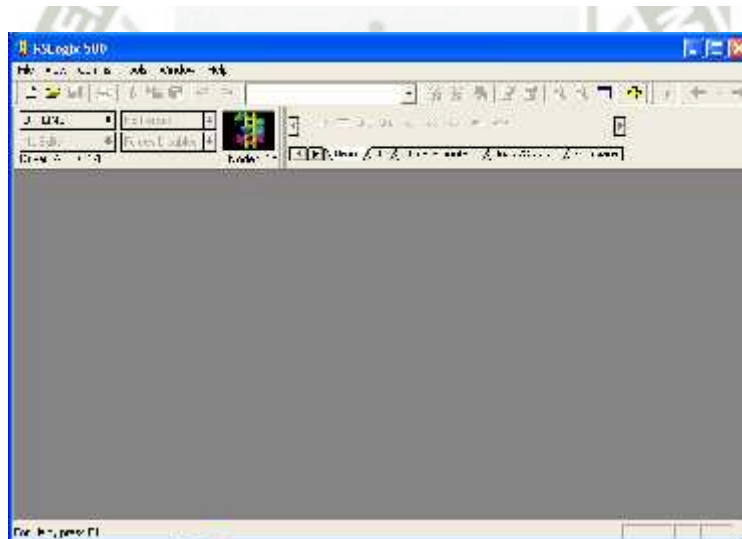


Figura 3.60: Ventana RSLogix 500
Fuente: Programa RSLogix 500

Ahora en la programación, primero ingresaremos a la opción “New” para elegir el PLC con el que nos comunicaremos para programarlo, particularmente en nuestro caso escogeremos el PLC Micrologix 1299 Serie B como se observa en la figura 3.61

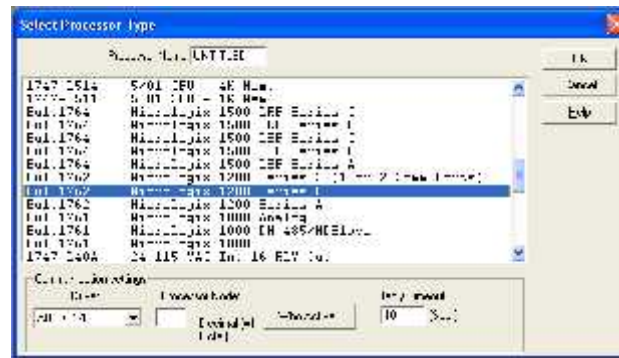


Figura 3.61: Ventana de Selección de Controlador
Fuente: Programa RSLogix 500

Después se hace un reconocimiento de todos los equipos enlazados con el autómata (nuestro caso sería el puerto de comunicación analógica) por medio de la opción “IO Configuration” según la figura 3.62.

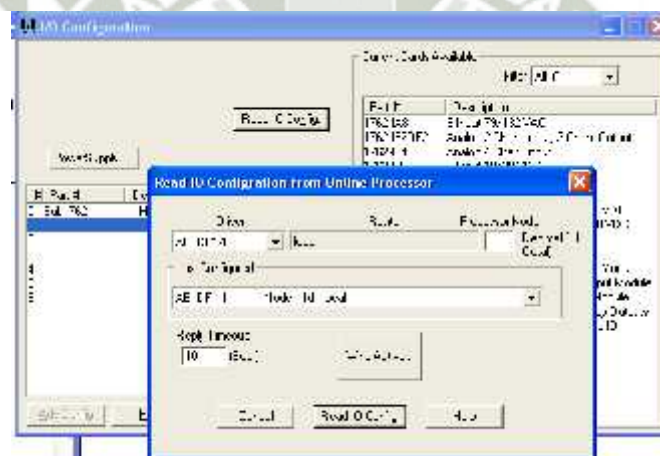


Figura 3.62: Ventana de Configuración de Entradas y Salidas
Fuente: Programa RSLogix 500

Para un reconocimiento automático se escoge la opción “Read IO Config.” según la figura 3.62, permitiendo que la extensión analógica sea reconocida. Tenemos la opción de lectura de la entrada la cual por defecto se encontrará en voltaje de 0 a 10VDC pudiendo ser cambiada a corriente de 4 a 20mA como se muestra en la figura 3.63

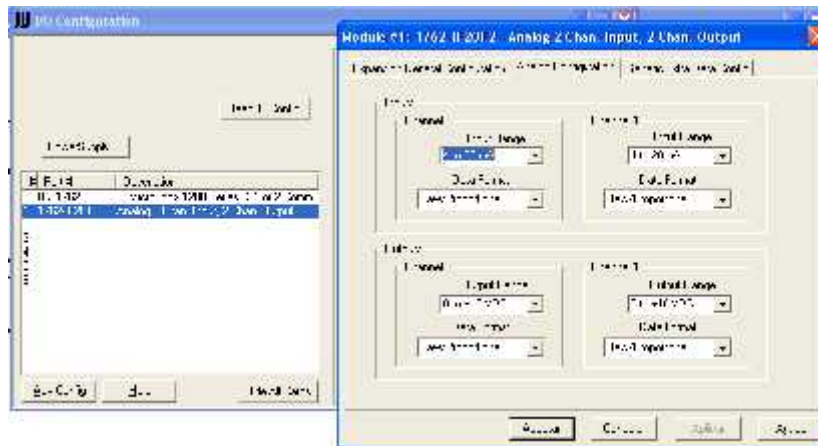


Figura 3.63: Ventana de Configuración de Entradas y Salidas del Módulo Analógico
Fuente: Programa RSLogix 500

Realizada esta configuración se procede a programar el PLC sin ningún problema. Luego para los lazos de control PID primero se descarga el programa ladder simple por el que inicialmente involucraremos al bloque SCP. El sensor de flujo que trabaja con el PLC Allen Bradley está escalándose digitalmente desde 0 a 32767 con un con una entrada de voltaje de 0 a 10 voltios a valores digitales de 0 ya que debido al margen de trabajo del sensor de flujo es de 0 a 168 PCM siendo multiplicado para tener una resolución visible.

Después tenemos la instrucción para programar el PLC será utilizada por medio de la barra desplegable ubicada en la parte superior derecha de la ventana y después escogemos la opción “DOWNLOAD” que permite descargar el programa ladder al PLC como la figura 3.64.



Figura 3.64 Ventana de Descarga del Programa
Fuente: Programa RSLogix 500

Por cada vez que se descargue el programa ladder al PLC el software exige guardar en memoria, ya que estos primeros pasos son sólo para hallar datos de pruebas y no

son de prioridad y serán guardadas temporalmente en la carpeta “mis documentos” para luego sean eliminadas.

3.4.7. Bloques de Control PID para Lazos de Control

Teniendo los valores calculados anteriormente se establece dentro del bloque los parámetros de control tanto para los lazos de control de temperatura y el lazo de control de flujo que permitirá finalmente el control multivariable cascada.

El sensor de flujo tiene la capacidad de medir desde los -40 a 400 celsius y luego mediante la programación del transmisor su lectura es de 0 a 100 centígrados con una señal de control de 4 a 20 mA que sirve de entrada al PLC y luego se escala la entrada con una resolución digital de 0 a 32767 y será escalado por el SCP a valores que van desde el 0 digital hasta el 16383 digital, mandando este valor a la dirección “PD9:0.SPS” que es la dirección del valor set point del lazo PID que se colocará en la siguiente línea de programación ladder y luego el operador ingresará a la dirección “N7:1” como set point un valor que varía entre cero y cien, este valor será el nivel deseado en porcentaje según la figura 3.65.

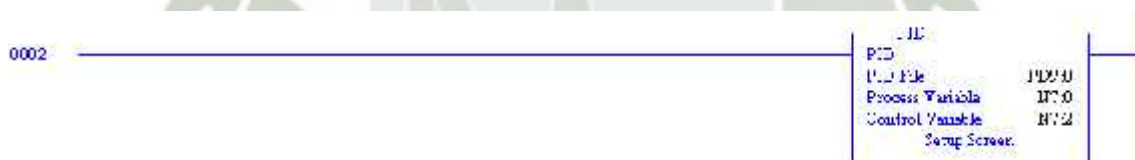


Figura 3.65 Bloque Funcional del Lazo PID
Fuente: Programa RSLogix 500

Se tiene el lazo de control PID, donde la dirección de este lazo es el “PD9:0”, su variable de proceso es el sensado de flujo y su variable de control se enviará a la dirección “N7:2” para su posterior uso. Los valores de control de este lazo deben ser ingresados previamente a la programación según la figura 3.66.

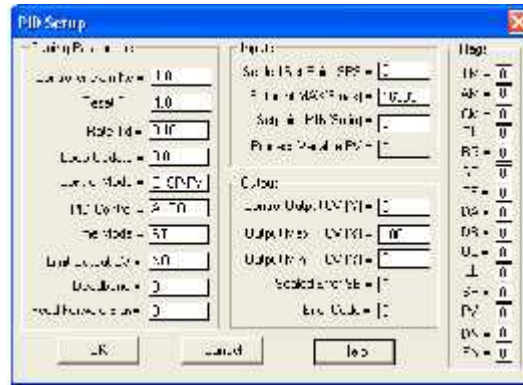


Figura 3.66 Programación del Lazo PID
Fuente: Programa RSLogix 500

Los parámetros de nuestro PID como ganancia (K_c), Tiempo Integrativo (T_i) y tiempo derivativo (T_d) fueron ingresados por criterio del usuario además de un rápido control de flujo se utilizará el programa “RSTune”. El parámetro “Loop Update” determina el tiempo que tardará el lazo de control PID en hallar cada valor que se deberá enviar a la variable de control mediante los demás valores establecidos, la opción “PID Control” se encuentra en AUTO, ya que queremos que este lazo se encargue del control sin intervención del operador, la escala de trabajo del valor Set Point irá desde el 0 digital hasta el 16383 digital y su porcentaje de trabajo para la variable de control (salida) irá desde el 0% hasta el 100% del valor de trabajo del lazo PID (0 - 16383) las cuales teniendo como referencia valores de sintonización como la tabla 3.19.

Tipo de Lazo	K_c	T_i (min)	T_D (min)
Flujo	0.2 - 2	0.005 - 0.05	-
Presión (Líquido)	0.2 - 2	0.005 - 0.05	-
Presión (Gas)	2 - 100	1 - 50	0.02 - 0.1
Nivel (Líquido)	2 - 100	1 - 100	0.01 - 0.05
Temperatura	1 - 50	2 - 50	0.1 - 20
Cromatógrafo	0.05 - 1	10 - 120	0.1 - 20

Tabla 3.19 Asignación De Valores De Sintonización Para Lazos De Control PID
Fuente: www.experture.com/tutor.html

Una vez conocidas las condiciones del programa con los datos de flujo y temperatura se podrán crear una lista de ordenamiento de la tabla 3.20 de la cual nos guiaremos para la programación ladder definitiva con sus correspondientes resultados.

Ítem	Equipo	TAG	Dirección	Descripción
1.	Pulsador normalmente cerrado	Parada Emergencia (PE)	I:0.0/0	Permite detener el funcionamiento del módulo por completo en cualquier estado que se encuentre.
2.	Pulsador normalmente abierto	Inicio	I:0.0/1	Permite poner en marcha el funcionamiento del módulo.
3.	Indicador Rojo	IND1	O:0.0/0	Al encenderse indicará que la planta se encuentra apagada.
4.	Indicador Verde	IND2	O:0.0/1	Al encenderse indicará que la planta se encuentra encendida.
5.	Sensor de Temperatura	TIT	I:1.0	Medidor de Temperatura que genera una señal de 4 a 20 mA.
6.	Sensor de Flujo	FIT	I:1.1	Medidor de Flujo de Aire que genera una señal de 0 a 10 voltios.
7.	Calefactor	Heater	O:1.0	Calefactor que genera la energía calorífica y trabaja de 0 a 220 Vac controlado por PWM con señales de 0 a 10 voltios.
8.	Ventilador	Blower	O:1.1	Ventilador que genera flujo de aire para el transporte de energía calorífica y trabaja de 0 a 220 Vac controlado por PWM con señales de 0 a 10 voltios.
9.	PLC	PID Maestro	PD9:0	Controlador PID donde PV es el sensor de temperatura, el CV es el calefactor y el set point es ingresado por el usuario.
10.	PLC	PID Esclavo	PD9:1	Controlador PID donde PV es el sensor de flujo, el CV es el ventilador y el set point es el valor digital del calefactor que trabaja.
11.	PLC	TIT Valor Digital	N7:0	Valor transformado del sensor de temperatura de 4 a 20mA a valores de 0 a 16383 digitales.
12.	PLC	FIT Valor Digital	N7:1	Valor transformado del sensor de flujo de 0 a 10 voltios a valores de 0 a 16383 digitales.
13.	PLC	Heater Digital	N7:2	Valor digital de 0 a 16383 transformado a valores de 0 a 10 voltios hacia el calefactor.
14.	PLC	Blower Digital	N7:3	Valor digital de 0 a 16383 transformado a valores de 0 a 10 voltios hacia el ventilador.
15.	PLC	Set Point TIT	N7:4	Valor introducido por el usuario para el control de la temperatura deseada entre valores de 30 a 50 centígrados.

16	PLC	Set Point TIT Digital	PD9:0.S PS	Valor digital transformado del Set Point TIT de valores de 0 a 100 centígrados a 0 a 16383
17	PLC	Set Point FIT Digital	PD9:1.S PS	Valor digital transformado del Set Point FIT de valores de 0 a 168 PCM a 0 a 16383 digitales.
18	PLC	TIT Lectura	N7:5	Valor digital de lectura transformado de 4 a 20 mA a un valor de 0 a 100 centígrados.
19	PLC	FIT Lectura	N7:6	Valor digital de lectura transformado de 0 a 10 voltios a un valor de 0 a 168 pies cúbicos por minuto.
20	PLC	Blower Porcentaje	N7:7	Valor digital de lectura de 0 a 16383 transformado a valores de 0% a 100% de flujo de aire del ventilador.
21	PLC	Heater Porcentaje	N7:8	Valor digital de lectura de 0 a 16383 transformado a valores de 0% a 100% del poder calorífico del calefactor.
22	PLC	Temp 1	T4:0	Temporizador con duración calculada de 0.2 segundos que mantendrá encendido el calefactor.
23	PLC	Temp 2	T4:1	Temporizador con duración calculada de 0.2 segundos que mantendrá encendido el ventilador.
24	PLC	Periodo	N7:9	Periodo de tiempo calculado con duración de 1 segundo para funcionamiento de temporizadores del calefactor y ventilador.
25	PLC	Heater PWM	N7:10	Valor digital de temporización de 0 a 16383 a valores de 0 a 10 para establecer tiempo de temporización del calefactor.
26	PLC	Blower PWM	N7:11	Valor digital de temporización de 0 a 16383 a valores de 0 a 10 para establecer tiempo de temporización del ventilador.
27	PLC	Encendido PWM 1	O:0.0/2	Al activarse iniciara la modulación por PWM para el calefactor.
28	PLC	Encendido PWM 2	O:0.0/3	Al activarse iniciara la modulación por PWM para el ventilador.
29	PLC	Parada de Emergenci a SCADA	B3:0/0	Contacto virtual on/off que únicamente será activado por el usuario desde la PC de control vía SCADA.

Tabla 3.20: Lista De Ordenamiento Final
Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO IV

FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS

Como se pretende organizar nuestro programa se modelara las secuencias de funcionamiento basándose en el método grafico Grafcet (Graphe de Commande Etape-Transition) que cuenta con la normativa internacion IEC-848 que representa el sistema en secuencias ya que a comparación del diagrama de flujo ayuda a describir el sistema de manera más explícita que permitirá dividir nuestro programa en modo funcional, tecnológico y operativo según la figura 4.1.

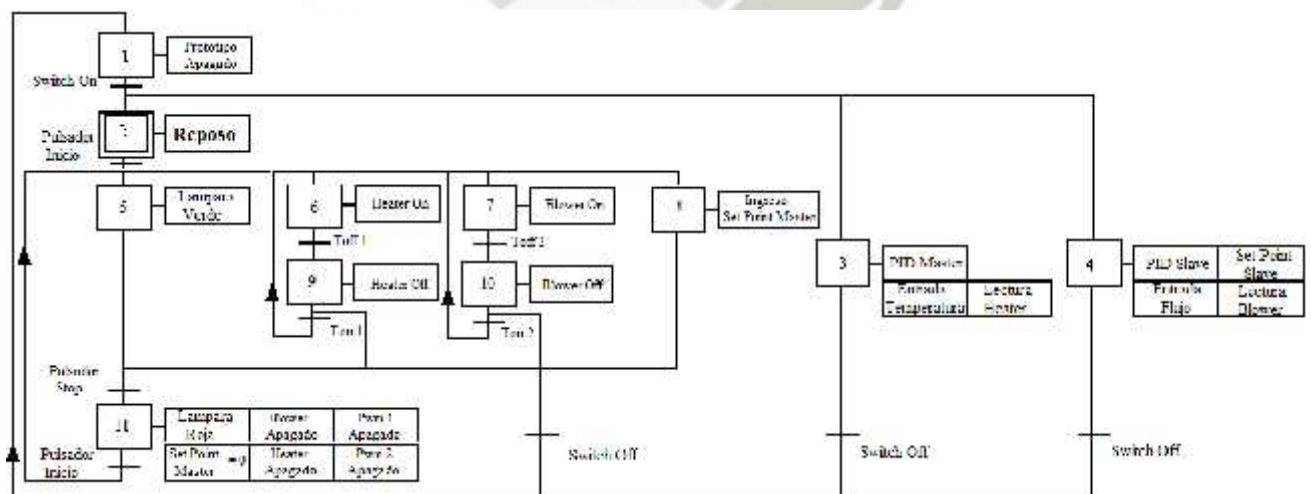


Figura 4.1 Grafcet del Sistema de Control Multivariable Cascada.

Fuente: Elaboración Propia

4.1 Programación del Controlador Micrologix 1200 con Rockwell Software

Durante la programación del controlador Micrologix 1200 se desarrollan dos programas de mayor importancia el primero es para realizar el lazo de comunicación entre la PC y el PLC y el segundo para realizar la programación ladder que se desea configurar finalmente.

4.1.1 Programa LADDER Para El Control Multivariable CASCADA

Basándonos de los datos calculados teóricamente con la lista de ordenamiento realizada y método graficet se puede proceder a la realización del programa ladder para el diseño de un control multivariable cascada dentro de nuestro controlador lógico programable ya que posee algoritmos de control dentro de su lógica cerrada que permite implementar los parámetros de los PID de lazos maestro y esclavo de nuestro sistema de control multivariable que actualmente en la actualidad es común su utilización para aplicaciones a grandes escalas con facilidad de adquisición a menor costo la cual se comenzara al arranque ilustrados en la siguiente figura 4.2

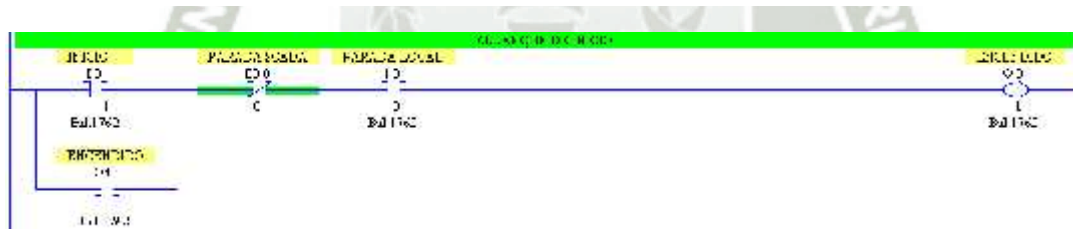


Figura 4.2 Arranque del Programa Multivariable CASCADA
Fuente: RSLogix 500

La primera línea de programación está dirigida al accionamiento del indicador verde que significa Inicio de la secuencia del programa que permitirá encender la planta cuando ninguna de las dos paradas de emergencia se encuentre activada figura 4.3



Figura 4.3 Parada del Programa Multivariable CASCADA
Fuente: RSLogix 500

La segunda línea muestra el criterio de parada de planta en casos de emergencia siendo el indicador rojo de apagado que será activado al presionar cualquiera de las dos paradas sea local o remoto.



Figura 4.4 Escalamiento de Temperatura
Fuente: RSLogix 500

Las siguientes líneas de programación muestran dos escalamientos de la dirección "I:1.0" que es el sensado del medidor de temperatura desde 4mA a 20mA que varía desde el valor digital de 0 al 32767 escalado a la dirección "N7:0" desde 0 hasta 16383 para trabajar con un lazo de control PID y escalado desde el valor 0 al 100 en la dirección "N7:5" para mostrar el valor de la temperatura en escala porcentual al 100% ilustrados en la figura 4.4.

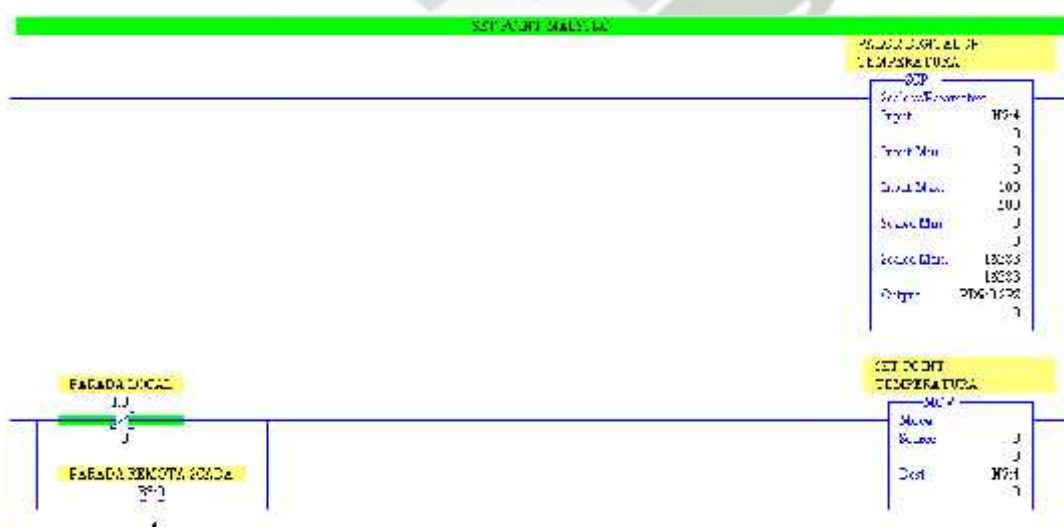


Figura 4.5 Set Point del Control Multivariable CASCADA
Fuente: RSLogix 500

Después continuando con la presente línea de programación se establece el valor set point que ingresará el personal usuario a la dirección de memoria de “N7:4” que está dentro de los valores 0 y 100 escalados por medio de un SCP en un valor digital que varía entre los valores 0 y 16383 y será enviado a la dirección “PD9:0.SPS” el cual será el valor de set point del lazo PID Maestro. Después se envía el valor cero como Set Point cuando se activa cualquiera de dos paradas de emergencia según figura 4.5.



Figura 4.6 Bloque PID de Lazo Maestro
Fuente: RSLogix 500

Luego la siguiente secuencia de instrucciones es dirigida para el lazo PID Maestro del lazo entre el medidor de temperatura y el calefactor, siendo la dirección de este lazo PID es “PD9:0” y su variable de proceso es el dato de la dirección “N7:0” y la variable de control proviene de la dirección “N7:2” y sus datos modificados dentro de este lazo serán los mismos aplicados anteriormente, ya que al momento de iniciar el programa en funcionamiento se ingresarán los valores definitivos de Kc, Ti y Td según la figura 4.6.



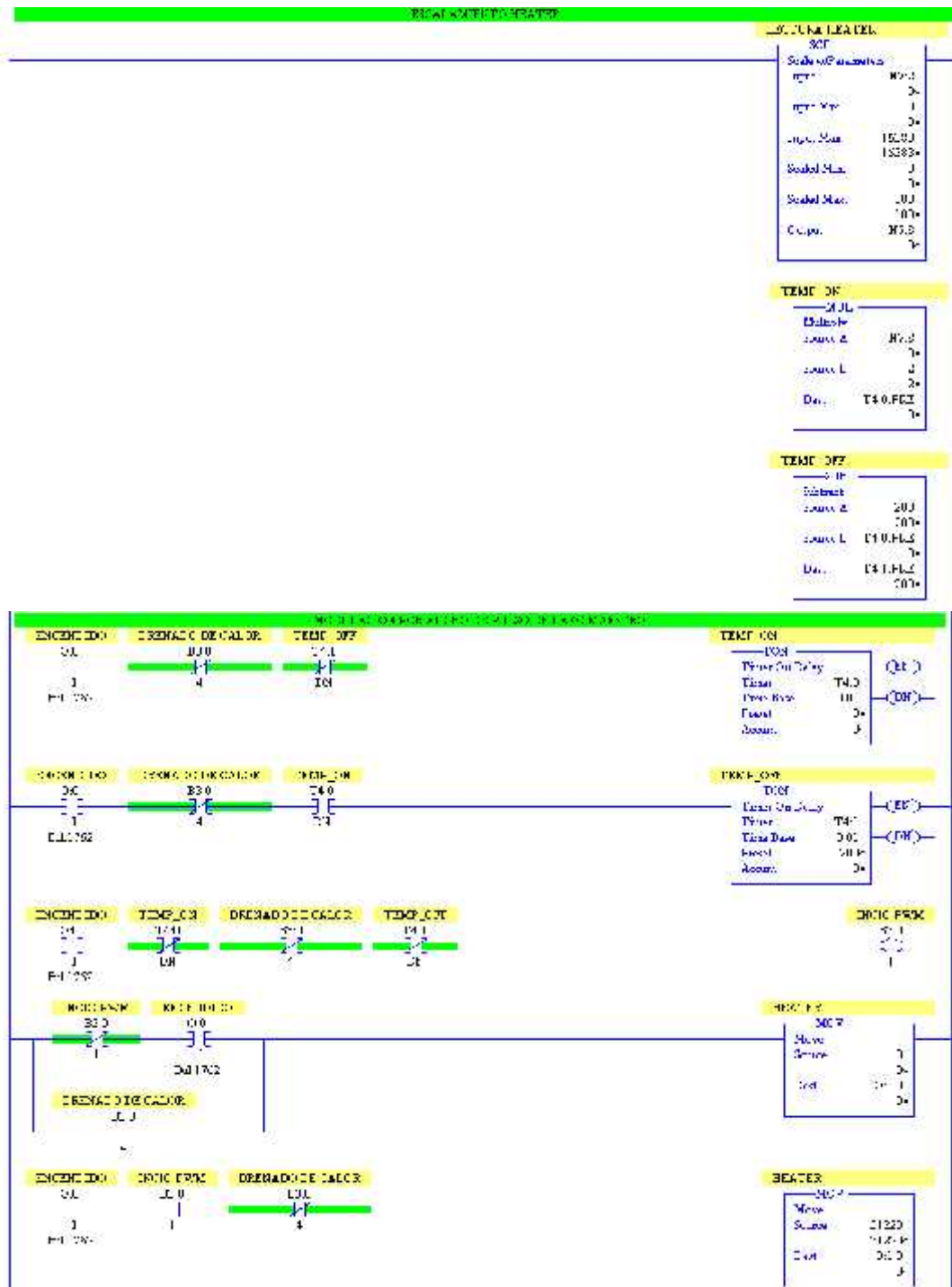


Figura 4.7 Escalamiento y Modulación de la señal de control Maestro
Fuente: RSLogix 500

Después las siguientes instrucciones escalan el valor de la dirección “N7:2” que es la salida del lazo PID Maestro que varía entre 0 a 16383 es enviado a la dirección “O:1.0” entre los valores digitales 10000 y 32767 y después muestra el escalamiento de la dirección “O:1.0” a valores entre 0 y 100 lo cual representa el porcentaje de la

temperatura que proviene del calefactor, enviado a la dirección “N7.7” que se muestra en la figura 4.7 y la figura 4.8.



Figura 4.8 Escalamiento del Flujo de Aire
Fuente: RSLogix 500



Figura 4.9 Set Point Esclavo
Fuente: RSLogix 500

La línea siguiente de programación de la figura 4.9 muestra que por medio del bloque MOV se envía el valor que se dé en la dirección “N7:2” a la dirección “PD9:1.SPS” que es el valor de set point del lazo PID esclavo. El envío de este valor que es la salida del lazo de control PID Maestro es lo que establece la aplicación del control multivariable cascada.



Figura 4.10 Bloque PID del Lazo Esclavo
Fuente: RSLogix 500

Después la figura 4.10 se ve que el lazo de control PID esclavo dado entre el FIT sensor de flujo de aire que va direccionado por “N7:1” como variable del proceso y la salida del PID esclavo que va direccionado por “N7:3” como variable de control y el set point que fue especificada anteriormente.

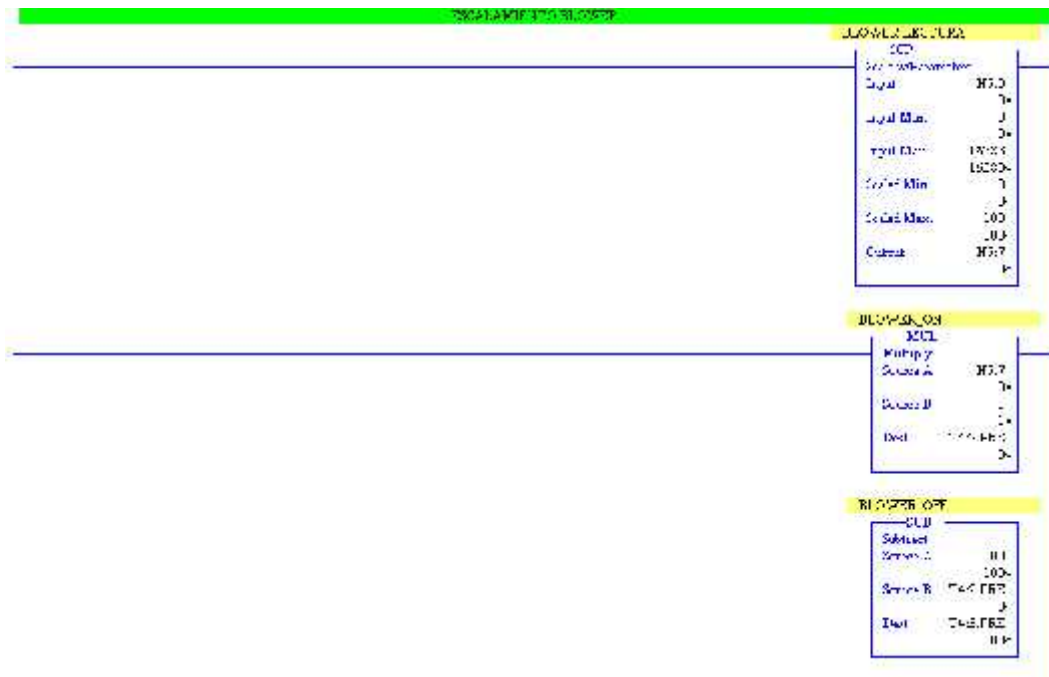


Figura 4.11 Escalamiento de la Señal de Control del Blower
Fuente: RSLogix 500

La instrucción MOV envía el valor cero a la dirección de salida “O:1.1” en el caso que alguna de las paradas de emergencia sea activada

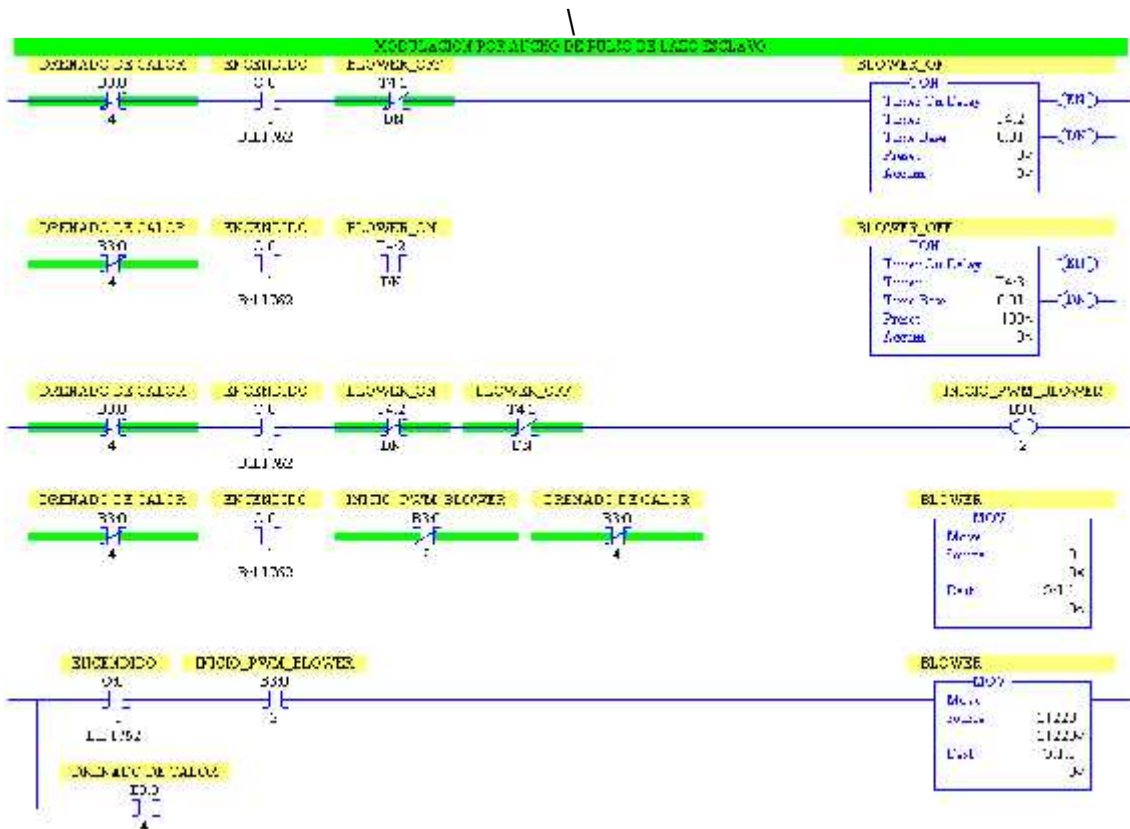


Figura 4.12 Modulación de la Señal de Control del Lazo Esclavo
Fuente: RSLogix 500



Figura 4.13 Parada de Actuadores del Sistema
Fuente: RSLogix 500

Al juntar todas estas líneas de programación realizadas, se obtiene el diagrama ladder el cual será el programa definitivo en la aplicación del control multivariable cascada.

4.2 Desarrollo del sistema de supervisión, control y adquisición de datos SCADA

En el desarrollo de la comunicación y control en SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) se ejecutará el programa RSView32 de Rockwell Automation, familia de Allen Bradley para su cumplimiento. La cual se realizará vía RS232, siendo posible sea visto desde un punto con la condición que sólo uno de ellos sea el maestro de todo el sistema según la figura 4.14.

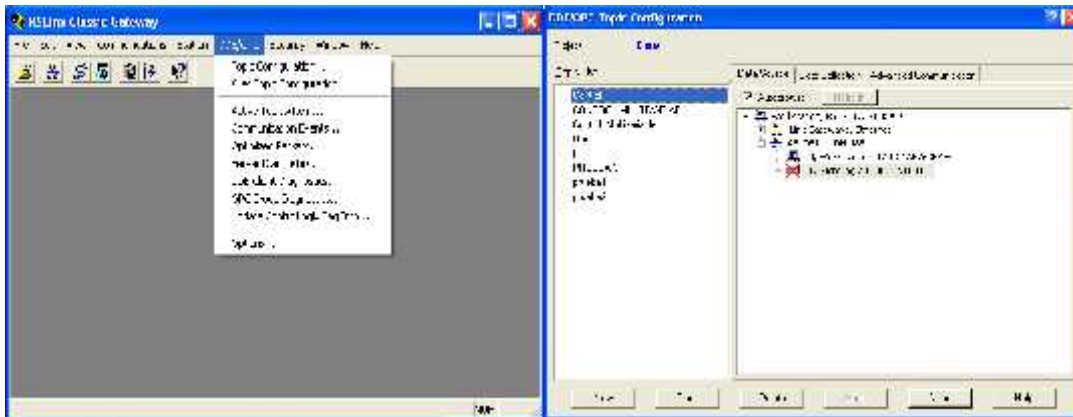



Figura 4.14 Ventana de comunicación entre RSLogix y Rsviwe32
Fuente: RSLinx

El software para el control y supervisión SCADA que aplicaremos es el RSViwe32 de Allen Bradley, para ingresar hacia el software y comenzar con la programación se dirige al ícono característico de “RSView32 Works” () , mostrando la ventana principal que se ve en la figura 4.15.

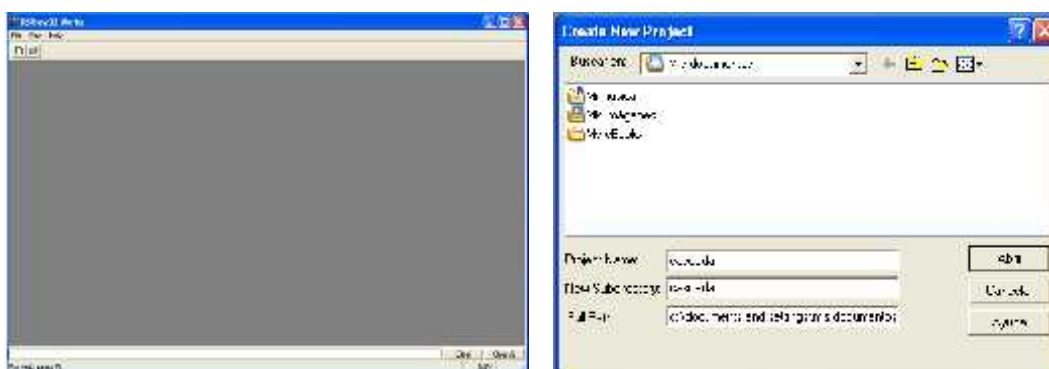


Figura 4.15 Ventana Principal y Creación de Nuevo Proyecto del RSView 32
Fuente: RSView 32

Luego para la programación SCADA se creará una carpeta desplegando de la opción “New” lo cual para este caso particular se le llamó “cascada”. Después de realizada la creación del archivo de programa llamado “cascada”, aparece la pantalla de inicio de la programación que se desea con su respectivo canal de comunicación según la figura 4.16.

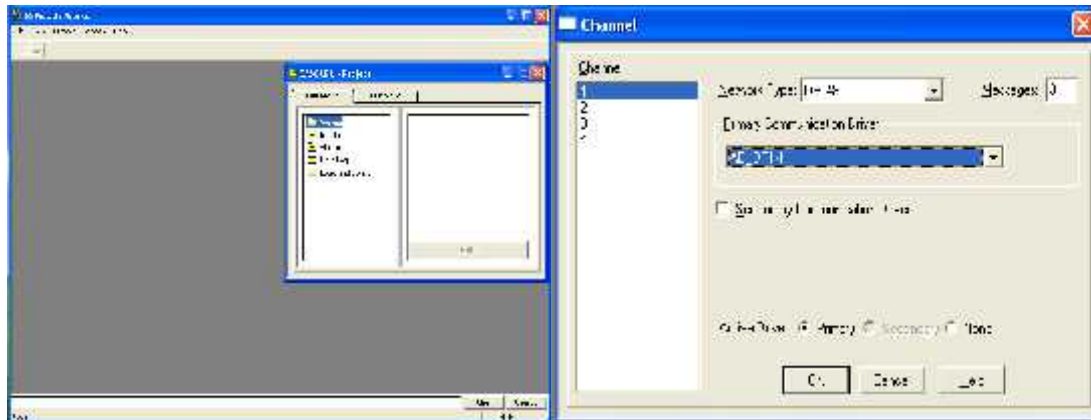


Figura 4.16 Ventana Principal del SCADA y su Canal de Comunicación
Fuente: RSView 32

Después se establece comunicación con el Controlador Micrologix 1200 la cual para eso se establecerá un canal de comunicación y un nodo de comunicación que después permita asignar direcciones “device” a los elementos del SCADA según la figura 4.17.

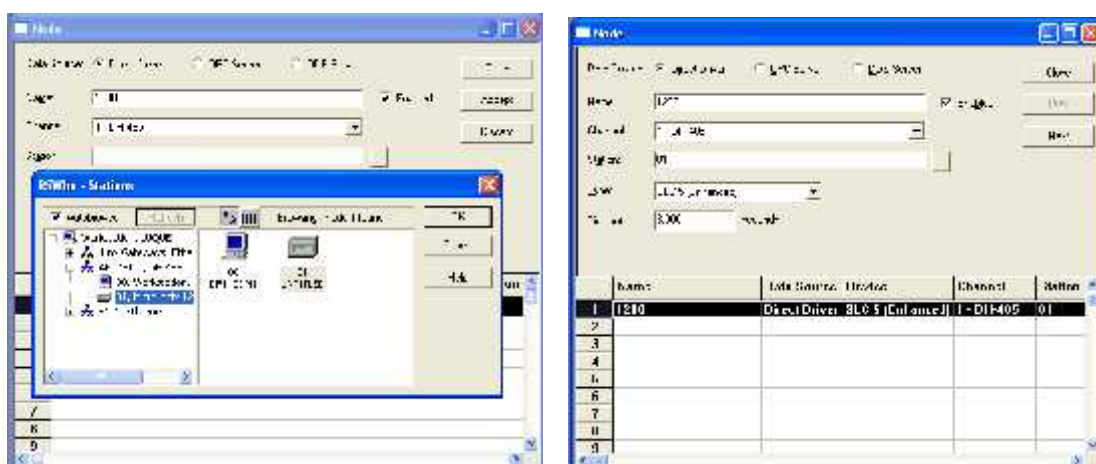


Figura 4.17 Ventana De Selección De Controlador y Configuración De Un Nodo
Fuente: RSView 32

Se determina el canal de comunicación por medio de la opción “Channel” que permite el modo de comunicación con el PLC para poder identificarlo dentro de su entorno de animaciones graficas previamente con el PLC conectado y encendido.



Figura 4.18 Ventana Project
Fuente: RSView 32

Después se crea el nodo asignándole un nombre con las palabras de “CONTROL” y desplegando la opción “Station” se seleccionará el PLC. Luego de la comunicación se procede a establecer los “tags” de esta programación SCADA la cual se basa en la lista de ordenamiento establecida para la programación ladder del PLC y luego se asigna Tags en el RSView32 donde se ingresa a la opción “Tag Database” dentro del grupo “System” como muestra la figura 4.19.

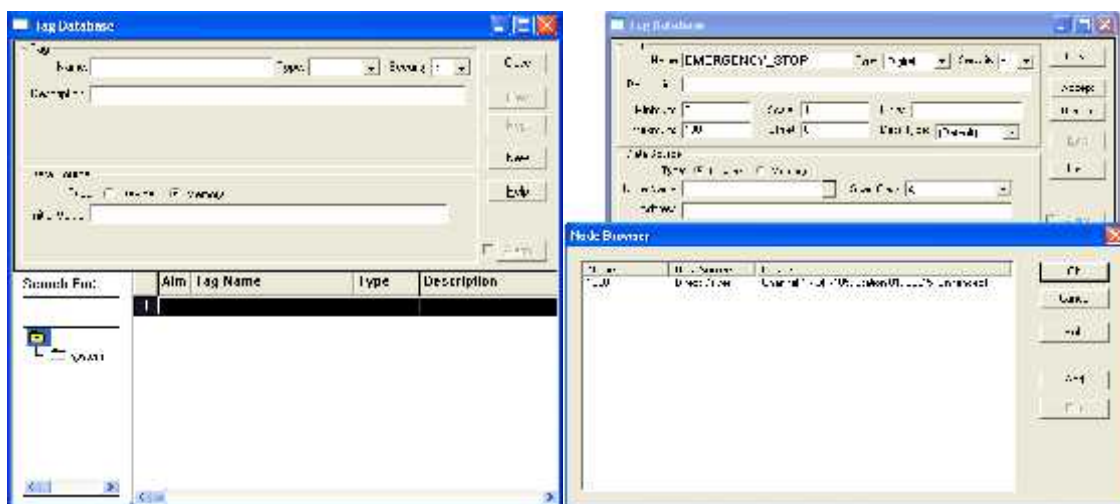


Figura 4.19 Ventana de Configuración De Tags y Selección Del Controlador
Fuente: RSView 32

Luego a cada TAG se le asigna un nombre y tipo con “type” que denomina la opción de tipo de señal, es decir si la señal de comunicación entre el SCADA y el PLC va ser

analógica, discreta o tipo string pero en “Data Source” el tag quedará identificado dentro de la memoria del sistema SCADA o si tendrá comunicación directa con el PLC. Quedando así establecido el tag “Emergency_Stop”, Parada o Stop como un tag de tipo digital y direccionado a un bit del paquete binario del PLC seleccionado según la figura 4.20.

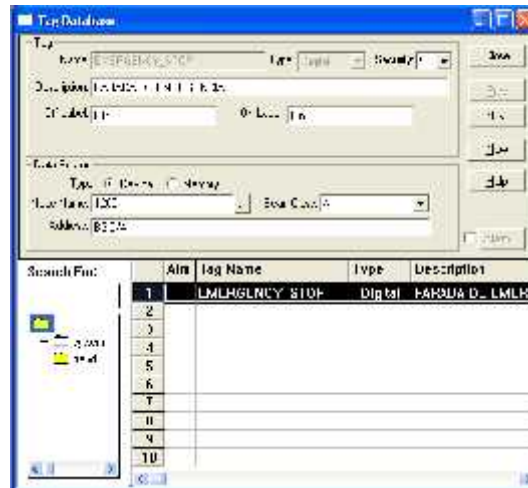


Figura 4.20 Ventana Para La Asignación y Configuración De Tags
Fuente: RSView 32

Siguiendo el mismo procedimiento para asignación de Tag del “Stop” se establecen los demás tags deseados, teniendo como resultado todos los tags para la programación de este sistema la cual posteriormente se procede a realizar los gráficos correspondientes para la adquisición de datos del módulo desde la pantalla HMI y el control SCADA. Luego se diseñan gráficos animados que mostrarán de manera virtual el estado del proceso en tiempo real creando una pantalla por medio del grupo llamado “Graphics” y posteriormente seleccionando la opción “New” que particularmente se creará dos pantallas SCADA, una llamada “Control Principal” en la cual se observará el proceso térmico de acondicionamiento de aire con sus valores sensados y la otra pantalla será llamada “Señales de Control” la cual mostrará por medio de trazos rectos en tiempo real continuo el comportamiento de los sensores, actuadores, set point y las salidas de los lazos de control maestro y esclavo.

En la ventana de “Control Principal” de la figura 4.21 se observa un fondo blanco con comandos de herramientas que por medio de ellas se crearán las imágenes gráficas animadas.



Figura 4.21 Creación De Las Ventanas De Visualización, Control y Herramientas
Fuente: RSVIEW 32

Por medio de estas herramientas se procede al diseño de imágenes de nuestro proceso para tener un concepto visual del estado del prototipo. El diseño de estas gráficas no sigue un procedimiento de reglas determinadas si no que es creación original y arte del usuario, en este el diseño es el visualizado en la figura 4.22.



Figura 4.22 Creación De Las Ventanas De Visualización, Control y Herramientas
Fuente: RSVIEW 32

En la ventana “Control Principal” se muestra la ilustración gráfica del prototipo de control de flujo y temperatura conformado por dos botones de stop y start, dos indicadores start y stop, los cuales representarán a los indicadores del mismo color encontrados en el tablero además de un tercer botón de drenado y su indicador en pantalla de color amarillo, también se observan símbolos numéricos por cada sensor y actuador los cuales al momento de encontrarse en comunicación con el módulo indicarán el valor sensado o de envío al actuador y también se dispone de una entrada que permite digitar el set point y por último se observa un botón virtual “Señales de Control” que momento de pulsarlo cambiará de pantalla dirigida a la ventana “Señales de Control” la cual posteriormente se procede a mostrarnos las gráficas necesarias y la previa configuración en la figura 4.23.

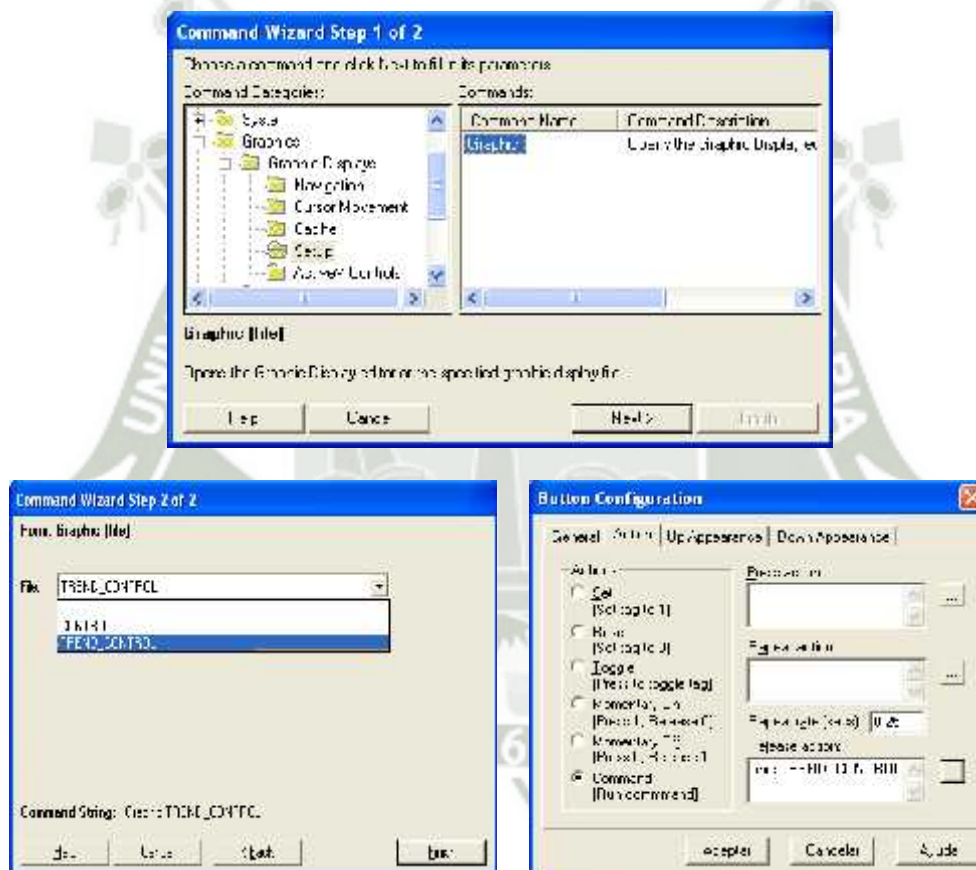


Figura 4.23 Creación De Las Ventanas De Visualización, Control y Herramientas
Fuente: RSVIEW 32

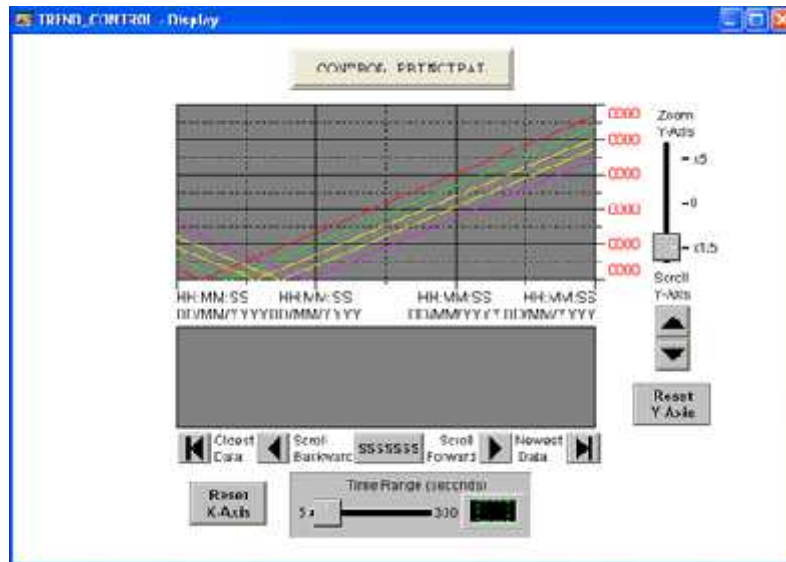


Figura 4.24 Ventana “Trend” Creada
Fuente: RSView 32

Luego en la ventana “Señales de Control” se observa cuatro líneas las cuales por medio de la comunicación con el PLC representarán los valores del set point, el sensor de flujo de aire, el sensor de temperatura, el porcentaje del calefactor y el porcentaje del ventilador y un botón de retorno a la ventana “Principal” que posteriormente se procede a programar las diferentes gráficas para establecerles una animación respectiva y para que los numerales indiquen el valor deseado según la figura 4.24.

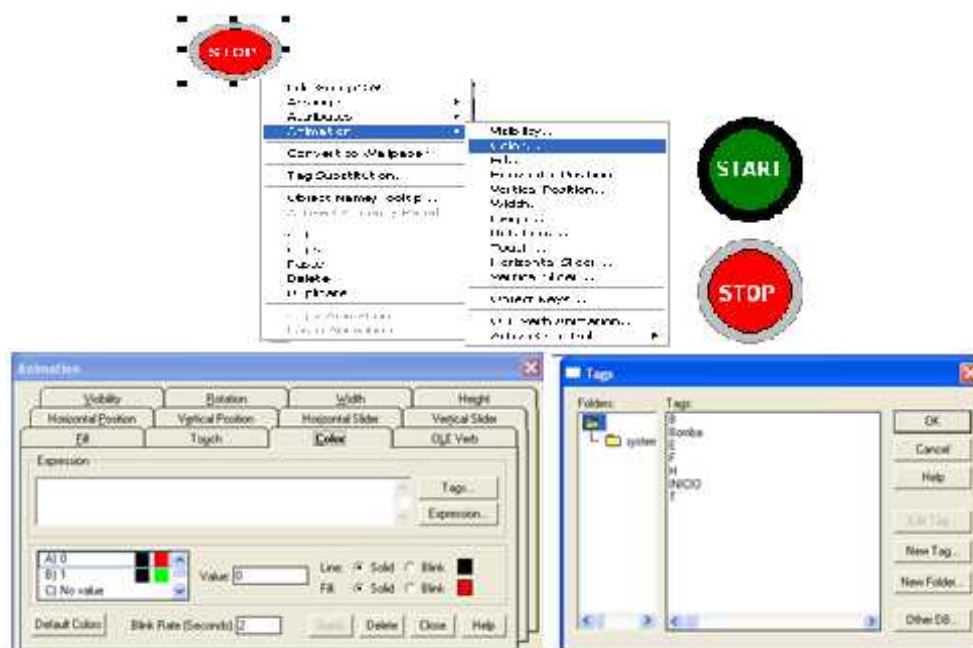


Figura 4.25 Configuración de la Animación Del Botones Start y Stop
Fuente: RSView 32

Para la parada stop del sistema se le asigna la opción de acción que al momento de ser pulsado (Toggle) se le asigna el tag “Stop”. Ya que para una mejor visualización del usuario se programa el stop virtual de modo que al estar activada encienda de color rojo y al encontrarse desactivada se encuentre de color blanco según la figura 4.25.

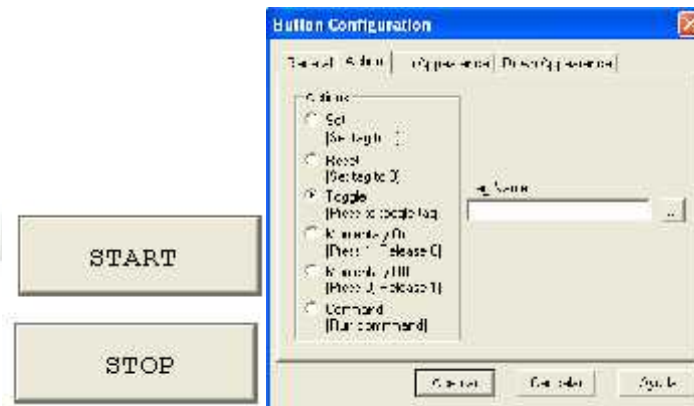


Figura 4.26 Ingreso a la Configuración del Start y Stop
Fuente: RSView 32

Luego para los indicadores de color rojo y verde representarán el estado actual de los indicadores del tablero que muestran el encendido y/o apagado del sistema la cual se le asigna a cada una una animación visual, la cual su cambio de estado hace que pueda ser visto cuando se encienda o apague el tablero o mejor dicho el sistema según figura 4.26

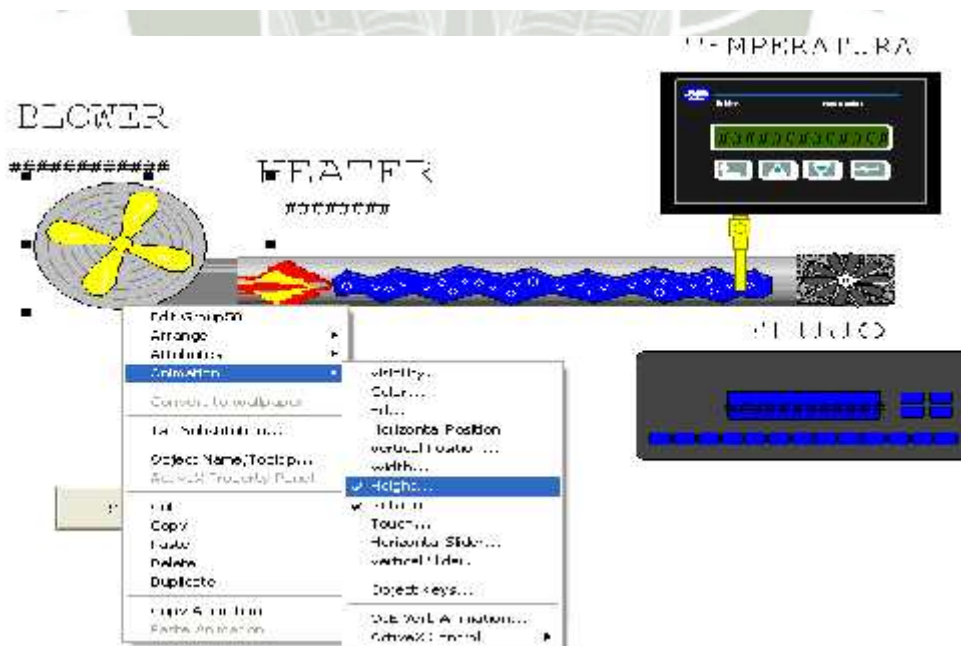


Figura 4.27 Configuración de la Animación de Blower y Heater
Fuente: RSView 32

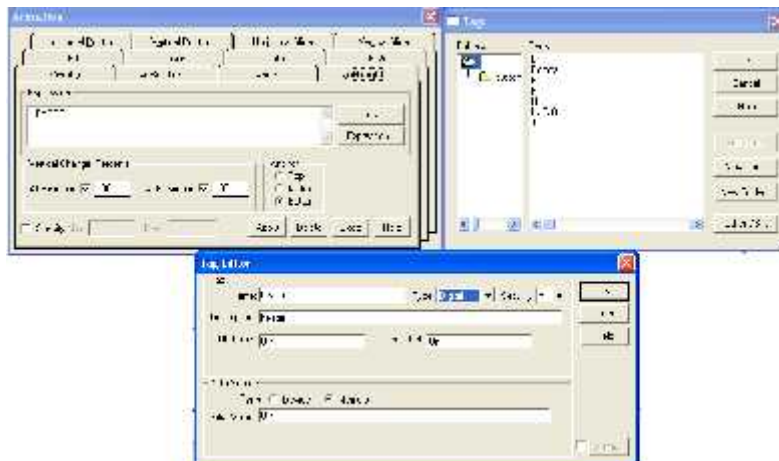


Figura 4.28 Configuración de la Animación del Heater
Fuente: RSView 32

Para conocer el nivel de Porcentaje de cada Actuador (Ventilador y Calefactor) del prototipo se programa por medio de la animación “Height”. A uno se le asigna un tag llamado heater y el segundo tag como blower. Del mismo modo se programa un rango, con la diferencia que el máximo será 100 y el mínimo será 0 a una escala de 1 asociándolo con la variable de proceso que será derivada de la salida de cada PID de cada lazo de control según las figuras 4.27 y 4.28.

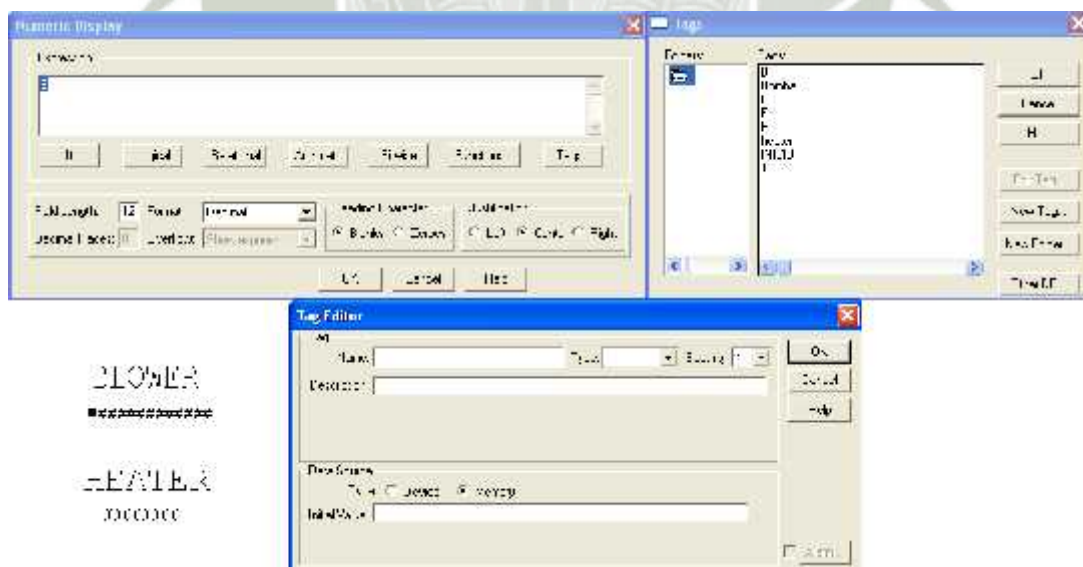


Figura 4.29 Configuración de la lectura de Valores del Blower y Heater
Fuente: RSView 32

Después se insertó indicadores numéricos que indican el porcentaje de capacidad de cada actuador uno para el ventilador y el otro para el calefactor a la cual estarán trabajando las cuales estarán asociados a los Tags que derivan de cada variable de proceso de la salida del PID del calefactor y el ventilador.

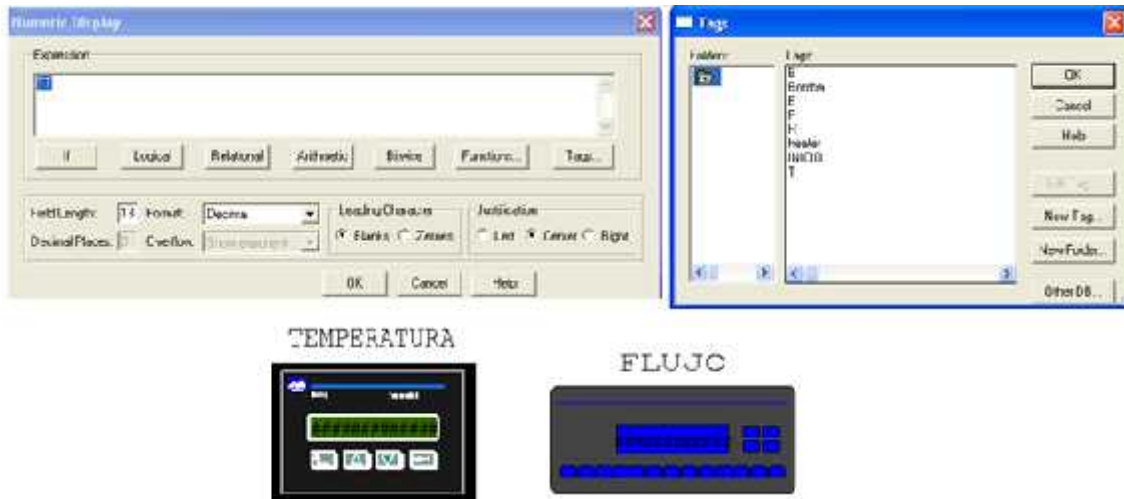


Figura 4.30 Configuración de la lectura de Temperatura y Flujo
Fuente: RSView 32

De igual forma se representa el nivel de temperatura y flujo de aire por medio de un número indicador display que será interpretado en porcentaje de su capacidad que deriva de 0 a 100% la cual son asignados los Tags temperatura y flujo atribuyéndoles una animación a cada uno que derivan de la variable de temperatura y flujo por medio de Tags que provienen de nuestro ladder la cual están basados en las figuras 4.29 y 4.30.



Figura 4.31 Configuración para Animación del Flujómetro
Fuente: RSView 32

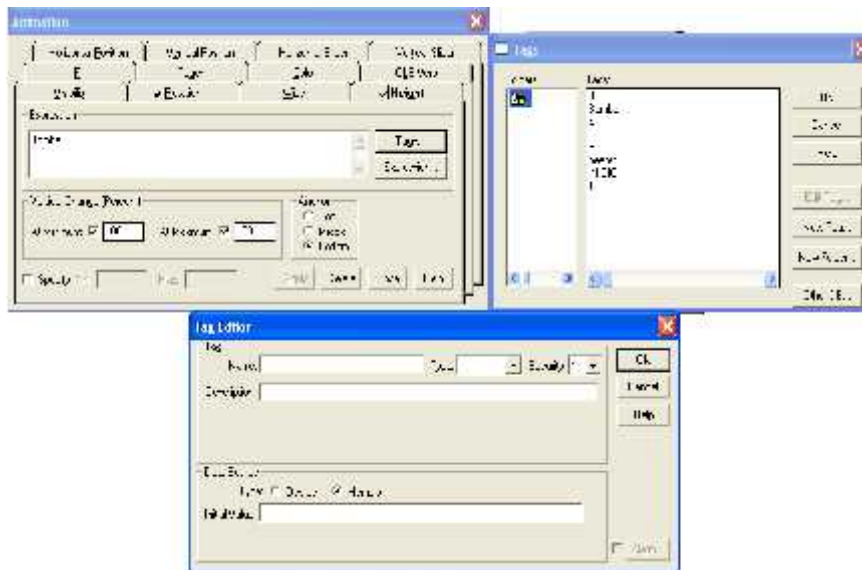


Figura 4.32 Configuración de la Animación de Sensores
Fuente: RSView 32

El siguiente cuadro de la figura 4.31 y 4.32 será un numeral que contiene un valor de entrada de Set Point que es ingresado por el usuario en pantalla SCADA, el tag de este numeral de entrada es “SET_POINT” orientado en la figura 4.33.

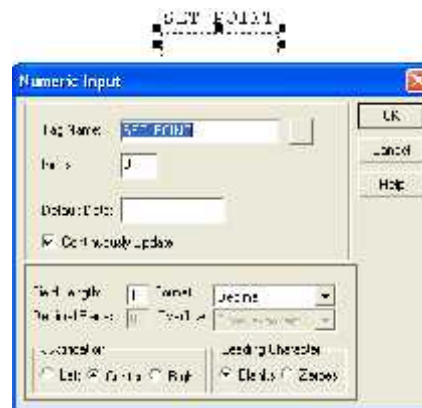


Figura 4.33 Configuración Del Ingreso Del Set Point
Fuente: RSView 32

Luego en la ventana “Señales de Control” se establecerá el mismo procedimiento de programación SCADA a los diversos gráficos según las figuras 4.34

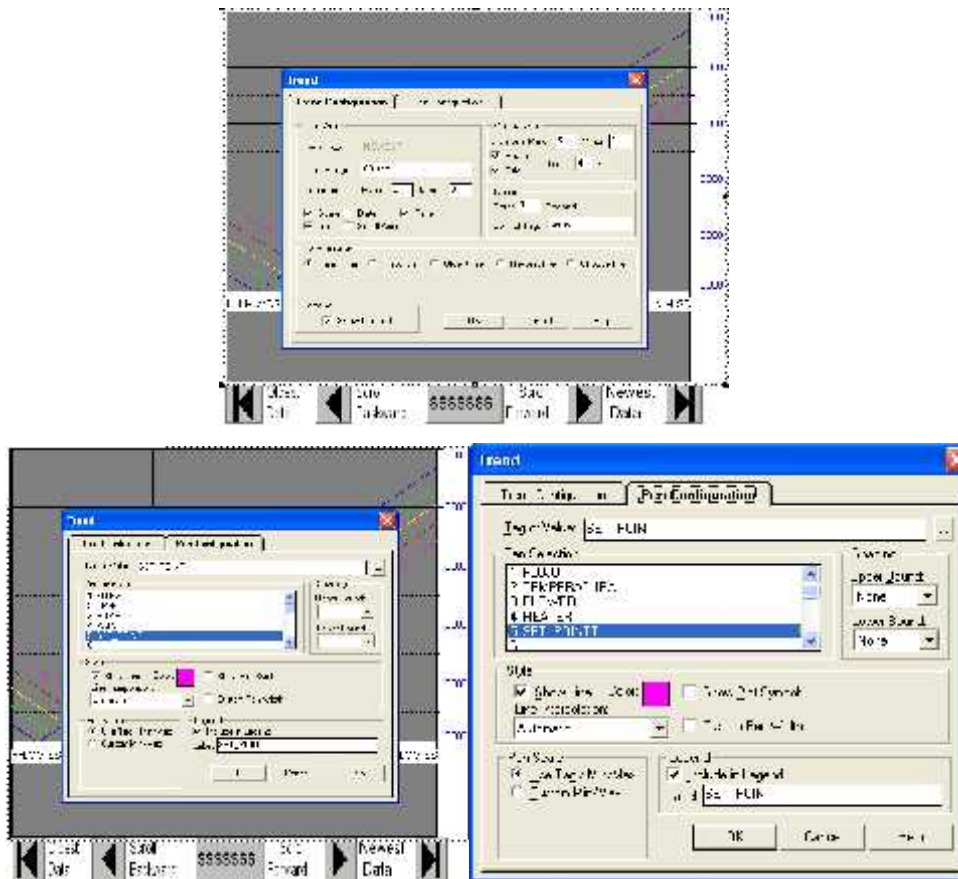


Figura 4.34 Configuración de las Gráficas de Datos
Fuente: RSVIEW 32

Para la lectura gráfica se comienza de la figura 4.35 en tiempo real de los actuadores se diseñan trazos rectos en tiempo continuo en el entorno de la ventana “Señales de Control”, una vez ingresado a este mismo se le asigna el tiempo de lectura de tramo a tramo, en este caso se le da un rango de lectura de 60 segundos de cada tag deseado y un color a cada línea visualizada.

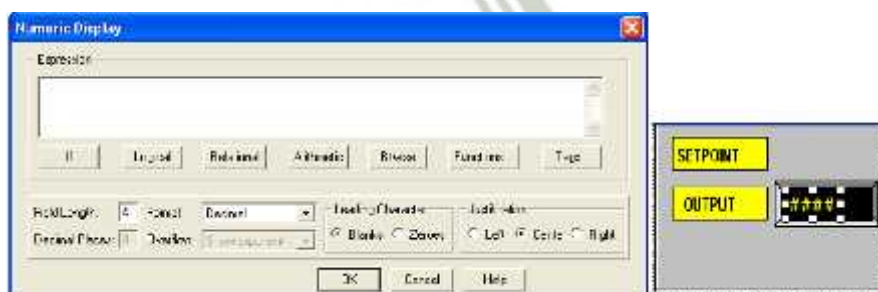


Figura 4.35 Configuración de la Lectura del Flujo
Fuente: RSVIEW 32

El numeral será como OUTPUT que indicará la salida del lazo de control de la Temperatura de salida y del mismo modo que en la ventana “Control Principal” la cual se multiplicará por un valor como escalamiento que está mostrado en la figura 4.36

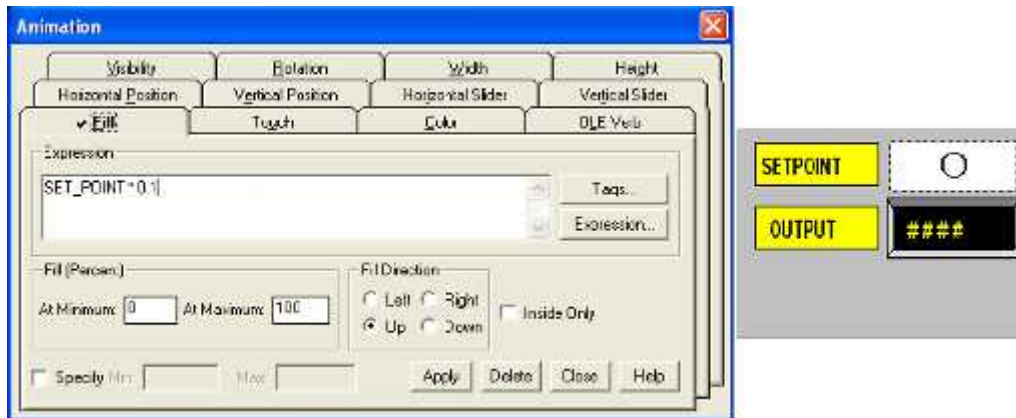


Figura 4.36 Configuración De La Lectura Del Set Point
Fuente: RSView 32

El valor de Set Point será mostrado en el cuadro que se indica en la figura 4.37, pero no podrá ser variado más que desde la ventana “Principal”, es por eso que en este caso el set point es multiplicado por 0.1.

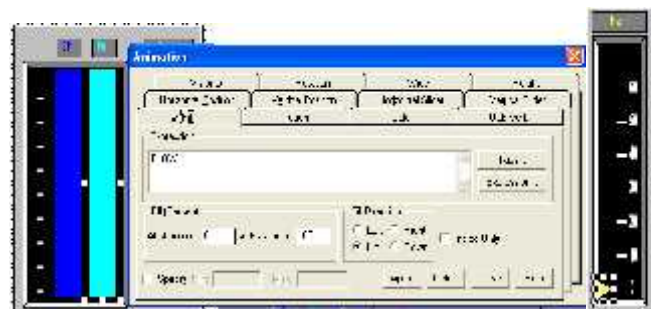


Figura 4.37 Configuración de la Lectura Animación Fill para la PV y HEATER
Fuente: RSView 32

La imagen de color turquesa representará la señal del lazo de control de temperatura, por esto se le asigna el tag “TEMPERATURA” en la animación fill de la figura 4.37. Igual forma se procede a la programación de la imagen color azul que representará el set point que ingrese el usuario en pantalla HMI desde la figura 4.38.

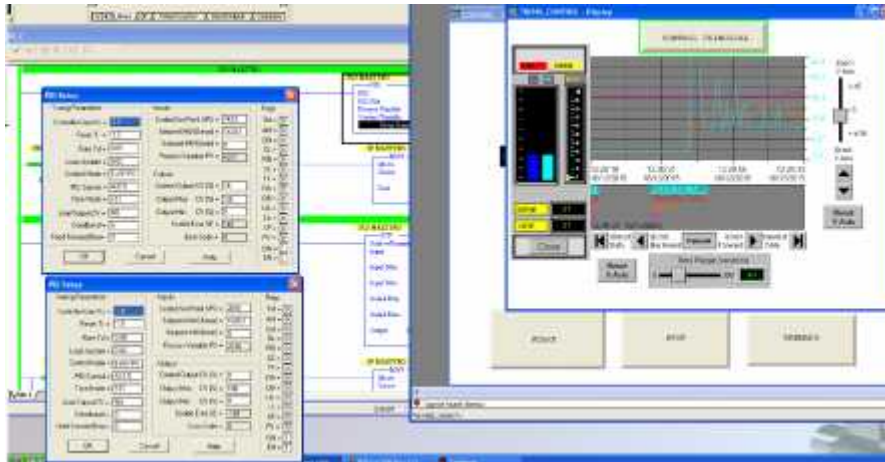


Figura 4.38 Visualización de Datos de Control y Gráficas
Fuente: RSVIEW 32

La animación del indicador representará el porcentaje de trabajo del calefactor que realiza un movimiento vertical desde un mínimo 0 y un máximo calculado por prueba y error de 100 la cual teniendo esta programación y comprobando la comunicación con el PLC por vía RS232 se puede controlar el módulo educativo de control por medio de un monitoreo SCADA. Para acceder al programa SCADA se hace desde nuestra carpeta creada con el nombre de cascada según la figura 4.39.



Figura 4.39 Ubicación Del Programa Creado (cascada) En RSVIEW 32
Fuente: Elaboración Propia

4.3 Resultados de la Adquisición de Datos del Sistema Multivariable CASCADA

Una vez calculados los parámetros introducidos dentro del programa ladder y los lazos PID maestro y esclavo se procederán a transmitir y visualizar las señales dentro del programa SCADA y pueda finalmente visualizarse y recogerse información que serán los valores finales de la respuesta de nuestro sistema multivariable. Según la figura 4.40 por

este medio de control se podrá visualizar tanto el set point como el valor que se desea obtener, el heater que genera poder calorífico por medio de la señal de control la cual dará como respuesta la temperatura que será la respuesta principal de nuestro sistema y el flujo de aire que permitirá incrementar la eficiencia por medio del blower de nuestro lazo secundario. Entonces se procede a sintonizar el lazo esclavo y posteriormente se configura el PID secundario para un comportamiento óptimo del flujo de aire que estará en función al valor del heater para una eficiente transferencia de calor y tenga una mejor respuesta el lazo maestro.

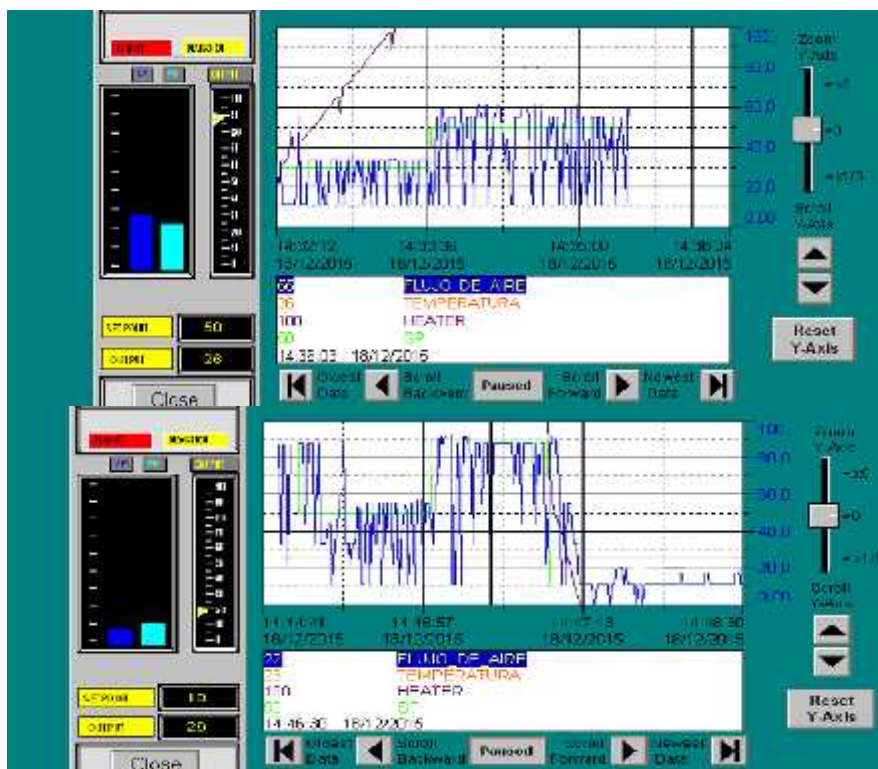


Figura. 4.40: Ajuste Óptimo de la señal del flujo de Aire al 90, 50 y 10 Por ciento
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestra 5 graficas de cada set point que visualizará los datos de las señales de control antes mencionados permitiendo analizar, contrastar y dar el mejor balance en sus parámetros de los lazos PID maestro y esclavo (figura 4.41) que este último incrementará la eficiencia del lazo maestro para un óptimo comportamiento y finalmente constituya un sistema de control multivariable óptimo con respuestas de las figuras 4.42, figura 4.43 y figura 4.44.

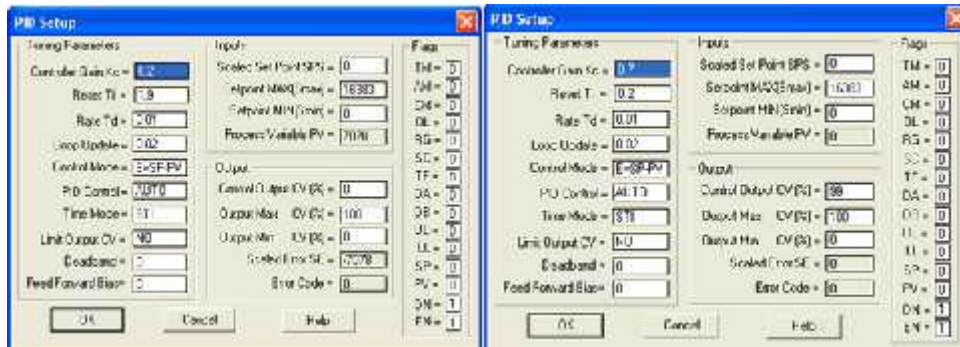


Figura. 4.41: Parámetros Finales de Lazos Maestro y Esclavo
Fuente: Elaboración Propia

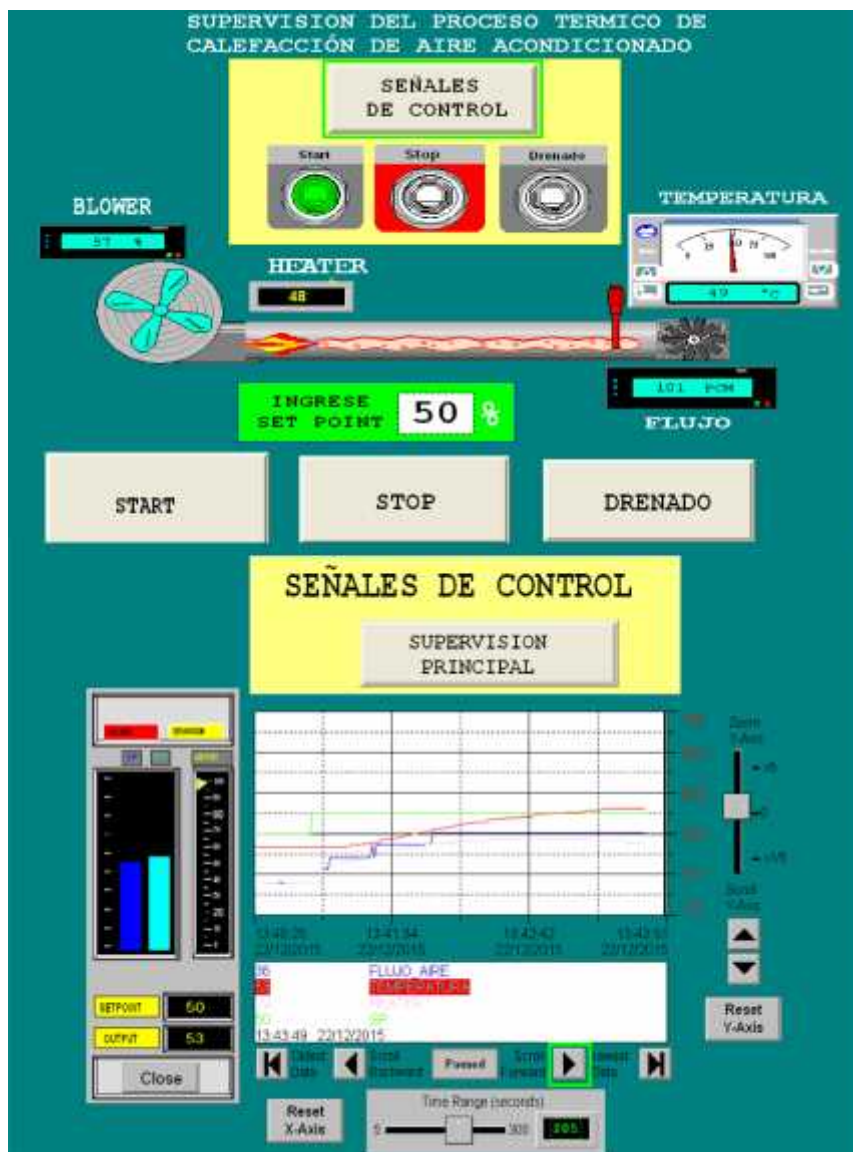


Figura. 4.42: Señal de la Respuesta del Sistema a 50 Centígrados deseados
Fuente: Elaboración Propia

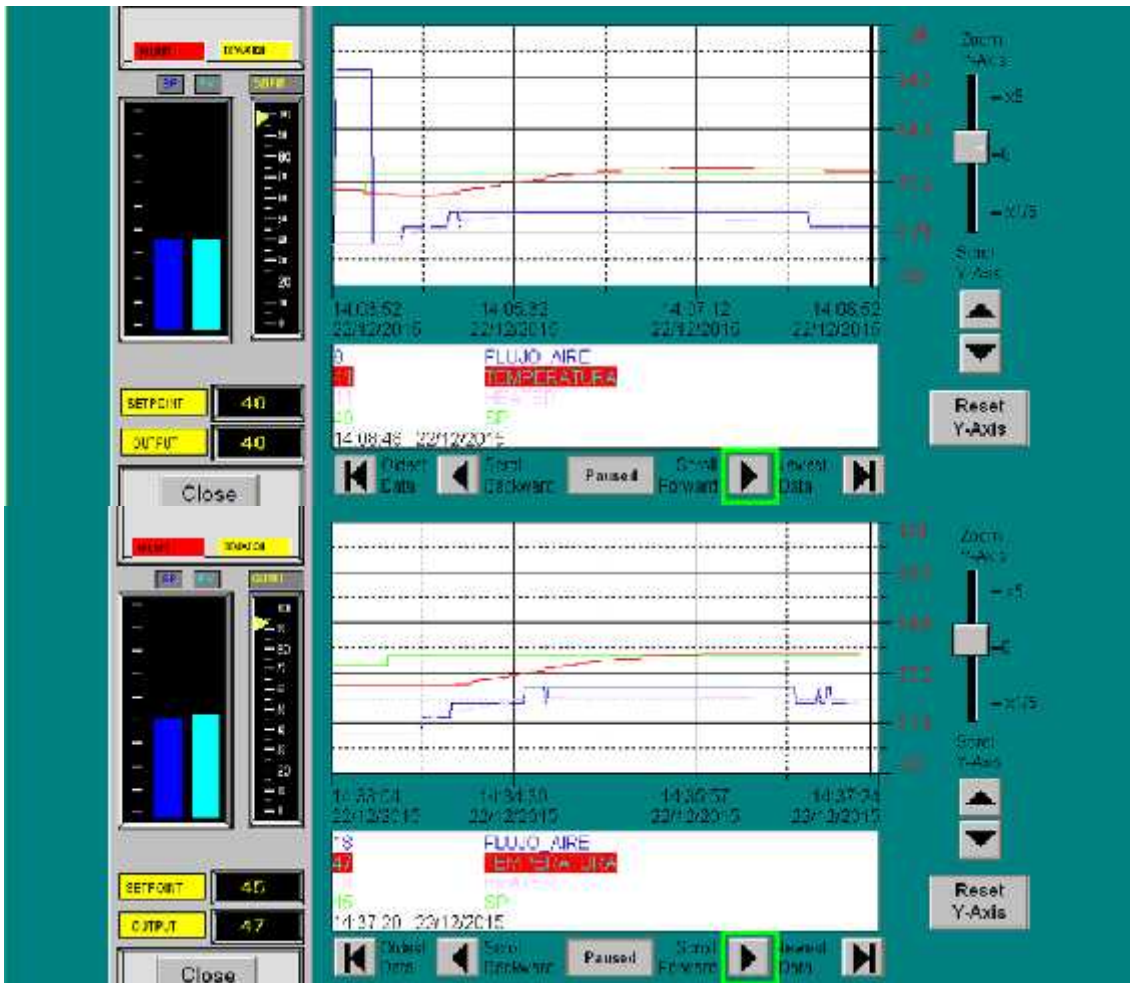


Fig. 4.43: Señal de la Respuesta del Sistema al 40 y 45 Centígrados deseados
Fuente: Elaboración Propia

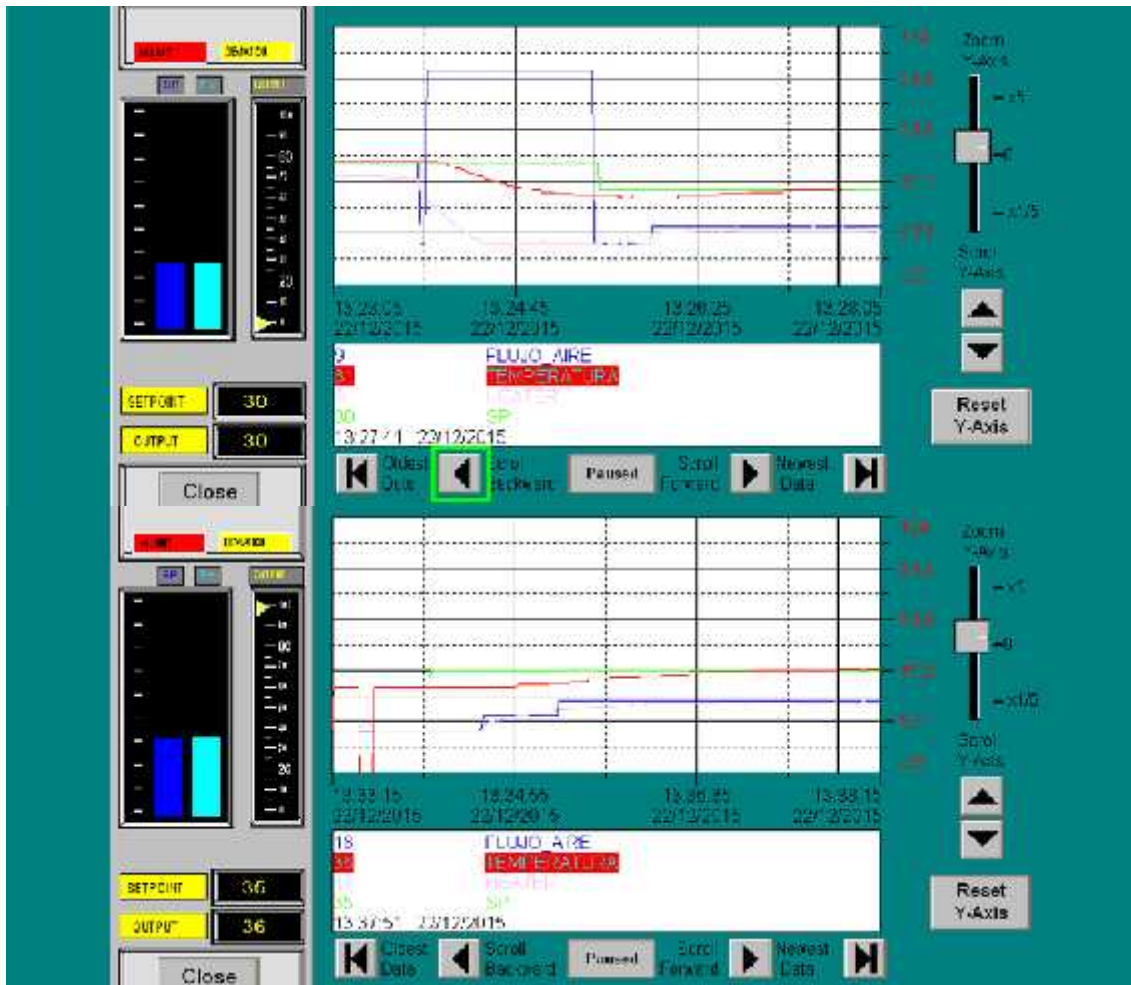


Figura. 4.44: Señal de la Respuesta del Sistema al 30 y 35 Centígrados deseados
Fuente: Elaboración Propia

Después se desarrolla la tabla 4.1 donde se contiene los resultados en porcentajes del calefactor contra los diferentes niveles de flujo del ventilador, como son de 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55% que son valores que están dentro del rango de trabajo del heater. Cuando el sistema este sintonizado entonces para cada nivel de flujo se deberá accionar el calefactor a diferentes niveles que irán desde el 25% hasta el 55% de amplitud, saltando un 5% de cada valor de temperatura. Con los valores de la tabla 4.1 obtenemos las gráficas de trabajo de cada porcentaje de flujo del blower de la figura 4.45.

Set Point	Niveles Porcentuales de Flujo de Aire										
	0%	5%	10%	12%	15%	20%	25%	30%	35%	45%	80%
30 C	27	28	35	33	30	29	30	30	28	30	29
35 C	26	27	30	38	35	33	35	34	35	33	34
40 C	26	26	26	27	27	42	44	40	45	37	37
45 C	26	26	27	28	30	40	47	47	46	45	46
50 C	26	26	27	27	28	28	28	29	30	50	45
55 C	26	26	27	27	27	28	29	30	35	60	58

Tabla 4.1: Tabla De Parámetros Medidos
Fuente: Elaboración Propia

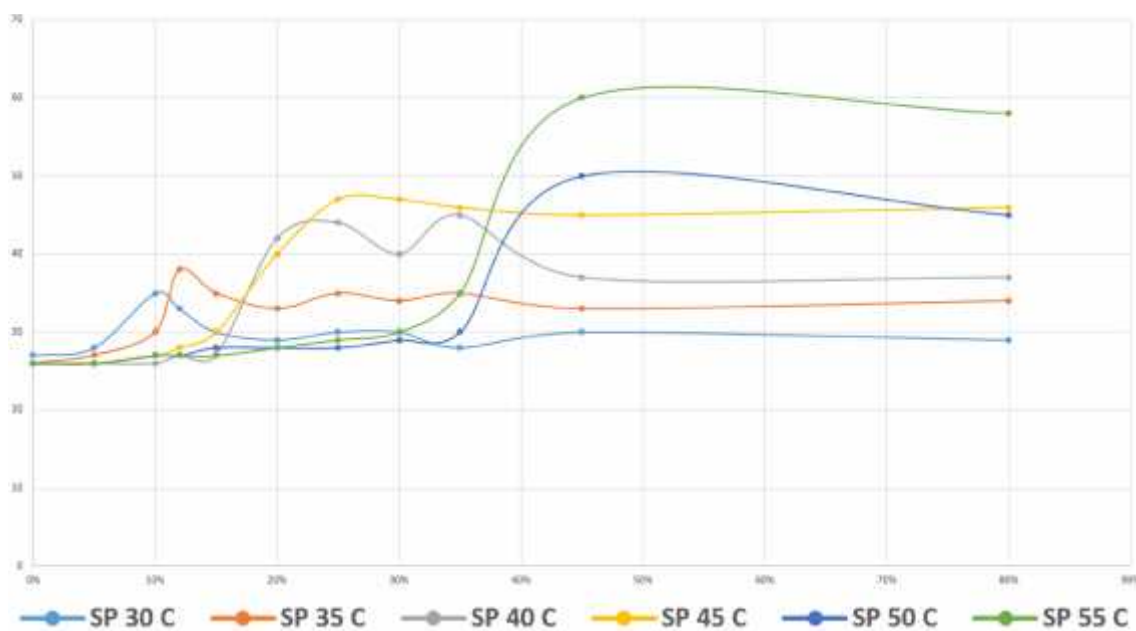


Figura. 4.45: Graficas de Temperatura por Unidad de Flujo de Aire
Fuente: Elaboración Propia

4.4 Aplicación del RSTune para Ajuste de Lazos PID

Normalmente, para el procedimiento de sintonización de lazos de control PID se utilizaba técnicas de sintonización analíticas por ejemplo Zigger & Nichols, IMC, etc., particularmente este caso se dispone de manera adicional el programa RSTune de Rockwell Software, el cual permite sintonizar de manera automática calculando la velocidad de respuesta de la variable de control, y la variable del proceso respecto al set point. Donde al momento del arranque y puesta en marcha el módulo se deberá cambiar los valores de K_c , T_i y T_d en los lazos de control PID maestro y esclavo para su


sintonización. Luego se deberá ingresar al programa RSTune por medio del ícono característico () en pantalla inicial de la figura 4.46.



Figura 4.46 Pantalla Principal RSTune
Fuente: Programa RSTune

Luego se procede a crear dos nuevos “New Loop”, donde después se programa las entradas virtuales al PLC la cual se calcularán según sus valores de variable de proceso, variable controlada y set Point mostrados en la figura 4.47.



Figura 4.47 Pantalla de configuración de control PID
Fuente: Programa RSTune

Después se observa la técnica de configuración de un lazo de control PID, particularmente se configuran las direcciones “PD9:0” que son los lazos PID maestro y la dirección “PD9.1” que es el equivalente al lazo PID esclavo la cual se le puede dar nombre para su reconocimiento, luego se abren ambas pantallas y automáticamente mostrarán gráficas de

las señales del proceso, la variable de control y el Set Point del PID indicado y se observa la pantalla principal de control PID en la figura 4.48.



Figura 4.48 Pantalla de control PID
Fuente: Programa RSTune

Para que el programa marche en funcionamiento de sintonización, se acciona el comando “Auto Tune” y se espera que el programa realice un muestreo la cual es lo mínimo que dispone para hallar los valores. Después de esto, el programa sugerirá valores para K_c , T_i y T_d que posteriormente podrán ser descargados haciendo clic en download.

4.5. Resultados Económicos

El análisis que se ha realizado a continuación es un proceso en el que se van a mostrar los costos y beneficios que conlleva este proyecto. El mismo que nos permite observar el impacto financiero que se provocaría en la empresa en el caso de que se llegara a implantar el sistema de control multivariable cascada en el sistema de aire acondicionado lo cual conlleva a la tabla 4.2.

ITEM	CANT	UNIDAD	SOLES
Aisladores Portabarras	2	UND	15
Relay de Estado Solido 25A a 480VAC MAX	2	UND	100
Cable GPT #16 ROJO NEGRO	10	Metros	80
Riel	1	UND	12
Portacintillo(Galletas)	50	UND	35
Interruptor Termomagnetico 16A weg	2	UND	80
Interruptor Termomagnetico 24A weg	1	UND	45
Interruptor Termomagnetico 35A weg	1	UND	55
Interruptor de levas 1/0/2	1	UND	40
Pulsador Verde/Rojo	2	UND	20
Terminal Horquilla Roja	50	UND	10
Terminal de Aislamiento Azul	20	UND	6
Luz Indicador Verde/Rojo	2	UND	20
Cintillo	1	UND	6
corrugado 3/8	10	Metros	20
Prensa Estopa 3/8	6	UND	36
Cable #18 Verde AWG	10	Metros	15
Cable #18 Blanco AWG	10	Meros	15
Cable #18 Negro AWG	10	Metros	15
barra de cobre para tierra con accesorios	1	UND	45
Motor Ventilador monofásico 220vac	1	UND	550
Calefactor monofásico	1	UND	50
Estructuras Metálicas de soporte y Tablero	1	UND	800
Controlador de Temperatura REG 48	1	UND	600
Placas Electrónicas	1	UND	50
Transformador	1	UND	180
Sensor de Temperatura	1	UND	170
TOTAL	199		3070

Tabla 4.2 Costos del prototipo del Control Multivariable
Fuente: Elaboración propia

En este análisis se ha tomado en cuenta los beneficios que la empresa obtendría al implementarse este sistema SCADA, entre ellos el ahorro de agua de riego y luz eléctrica, la optimización en el tiempo que el personal de mantenimiento tarda en reparar los equipos y el ahorro provocado gracias a la mayor productividad que tendría la empresa.

$$5 \times 60\text{seg} = 13,335$$

$$5\text{seg} \text{ ----- Gasto}$$

$$\text{Gasto} = 222 \text{ soles}$$

$$\text{Inversión} = \text{gasto} + \text{Costo de control} + \text{PLC Micrologix 1200}$$

$$\text{Inversión} = 222 + 3070 + 970$$

$$\text{Inversión} = 4262 \text{ soles}$$

$$\text{Ganancia} = \frac{\text{Inversión Anterior}}{\text{Inversión Nueva}} = \frac{13335}{4262}$$

$$\text{Ganancia} = 3.12$$

Considerando que las pérdidas anuales son de 13,335.51 soles en la empresa entonces se le relacionará con la calidad de la señal de la respuesta del sistema que particularmente por medio de las muestras tomadas tiene tiempo transitorios de aproximadamente 5 minutos durante el periodo de 1 año de funcionamiento. Debido a ello se le relacionará con los gastos que conlleva. Para ello en este sistema de control multivariable cascada se reducirá el tiempo transitorio aproximadamente a unos 5.5 segundos. Con ello la calidad del sistema de calefacción sea óptima y los costos para su implantación serán mínimas comparadas con las enormes pérdidas en el transcurso de 1 año según la figura 4.49.

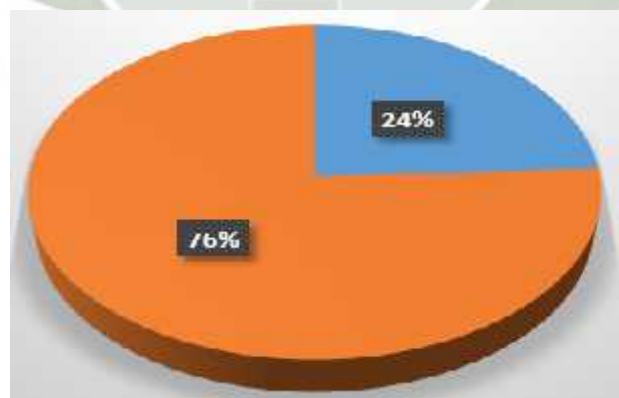


Figura 4.49 Costos del prototipo
Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

1. Se ha implementado satisfactoriamente un prototipo del proceso térmico de calefacción de aire acondicionado haciendo el uso de un controlador automata programable que dispone de algoritmos como los bloques funcionales PID para el desarrollo del control multivariable y poder brindar un control automatico optimo que se plasmará en la señal resultante de los lazos de flujo y temperatura.
2. Se diseño el sistema de supervisión SCADA del proceso de aire acondicionado que permitira visualizar el proceso por medio de figuras animadas y mostrar graficas de las señales de los datos adquiridos y además manipular equipos remotamente en tiempo real mediante una comunicación serial desde cualquier dispositivo fijo o portatil de una manera eficiente y segura con una interfaz HMI desde pantalla.
3. Para el control multivariable se diseñó circuito de modulación de señales de entrada de flujo con su visualizador LCD como indicador local y un transmisor de temperatura marza Zelio modelo Reg48 que una vez programada permite convertir la señal del PT100 en señal eléctrica estándar de 4 a 20 mA como entrada y ambos destinados para las entradas analógicas y puedan ser procesadas en los lazos de control en el interior del PLC Micrologix 1200.
4. También para la modulación de señales de salida se utilizó algoritmos por medio de bloques temporizadores para modular tiempo encendido Ton y tiempo apagado Toff dentro del diseño PWM en tiempo continuo a través de actuadores discontinuos del tipo on/off la cual dicha señal del PWM será directamente proporcional al cambio de la señal de control de las salidas de los PID proveniente de cada lazo de control maestro y esclavo del sistema multivariable.
5. El módulo de control de temperatura y flujo será calibrado todas sus partes y después puesto en funcionamiento la cual será considerado su diseño para un uso didáctico, demostrativo y la programación de la lógica de control y el tipo de comunicación estarán orientadas hacia el uso dentro de un ambiente industrial con equipos actuadores de más capacidad en kilowatts de mayor potencia y por medio de este prototipo sea de ayuda para mejor entendimiento del proceso.

Recomendaciones

1. Se incentiva aplicaciones de mejoras en el módulo de control de temperatura y flujo como:
 - a) Cambiar el tipo de sensado de temperatura utilizando sensores termopares u otros tipos con comunicación HART, Foundation Fieldbus u otros protocolos estándar de comunicación industrial.
 - b) Desarrollar tipo de comunicaron Ethernet mediante OPC server para el control SCADA como comunicación DH+, DeviceNet, etc.
 - c) Cambiar la configuración del regulador de temperatura por un control PID análogo o discreto debido a que está siendo inutilizada en esta TESIS siendo factible extender más las bondades que brinda.
2. Se recomienda que para realizar las prácticas respectivas con el prototipo de control de Flujo y temperatura se proceda a operarlo con el conocimiento de funcionamiento que se indican en el libro en todo el proceso de la práctica.
3. Se recomienda instalación de puesta a tierra con el fin de que el prototipo pueda trabajar en forma eficiente y segura conllevando a una operación sin riesgos y poder así eliminar riesgos por descargas eléctricas.

Observaciones

Según Decreto No 002-DEPIE-2015, en vía de regularización, se amplió por el lapso de un año el borrador de Tesis titulado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA PARA SISTEMA HVAC APLICANDO CONTROL MULTIVARIABLE CASCADA” a partir del 26 de Marzo del 2015 que fue autorizado por Decreto No 007-DPPIE-2014 de fecha 10 de Marzo del 2014.

BIBLIOGRAFIA

- Antonio Creus, "Instrumentación Industrial", Marcombo – 6ta Edición, 1997.
- Benjamín C. Kuo, "Sistemas De Control Automático", (Prentice Hall) - 1ra Edición - 1996.
- Luis Ibáñez, Antonio Creus, "Control de Motores Eléctricos", Marcombo – 2da Edición, 1979.
- José Ramirez Vazquez, "Centrales Electricas", Grupo Editorial Ceac, 8ta edición, 1995
- Ogata K., Ingeniería De Control Moderna (Prentice Hall) - 2da Edición - 2000.
- Alfred Roca Cusidó - Control de Proceso - Universidad Politécnica de Catalunya – 2da edición - Junio de 2002
- Balcells, Joseph y Romeral, José Luís, "Autómatas Programables" (Alfaomega) – 1ra Edición - Barcelona: Marcombo, 2000.
- Websites:

http://200.13.98.241/~javier/control_feedforward.pdf

http://www.bgu.ac.il/chem_eng/pages/Courses/oren%20courses/Chapter_9.pdf

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/203725/feedforward-control>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Feed-forward>

https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io8/public_html/causas.html

http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/1762-rm001_-es-p.pdf

<http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/tema4p.pdf>

<http://omarsanchez.net/multicontrol.aspx>

<http://www.lukor.com/ordenadores/05062902.htm>

http://www.sapiensman.com/control_automatico/control_automatico7.htm

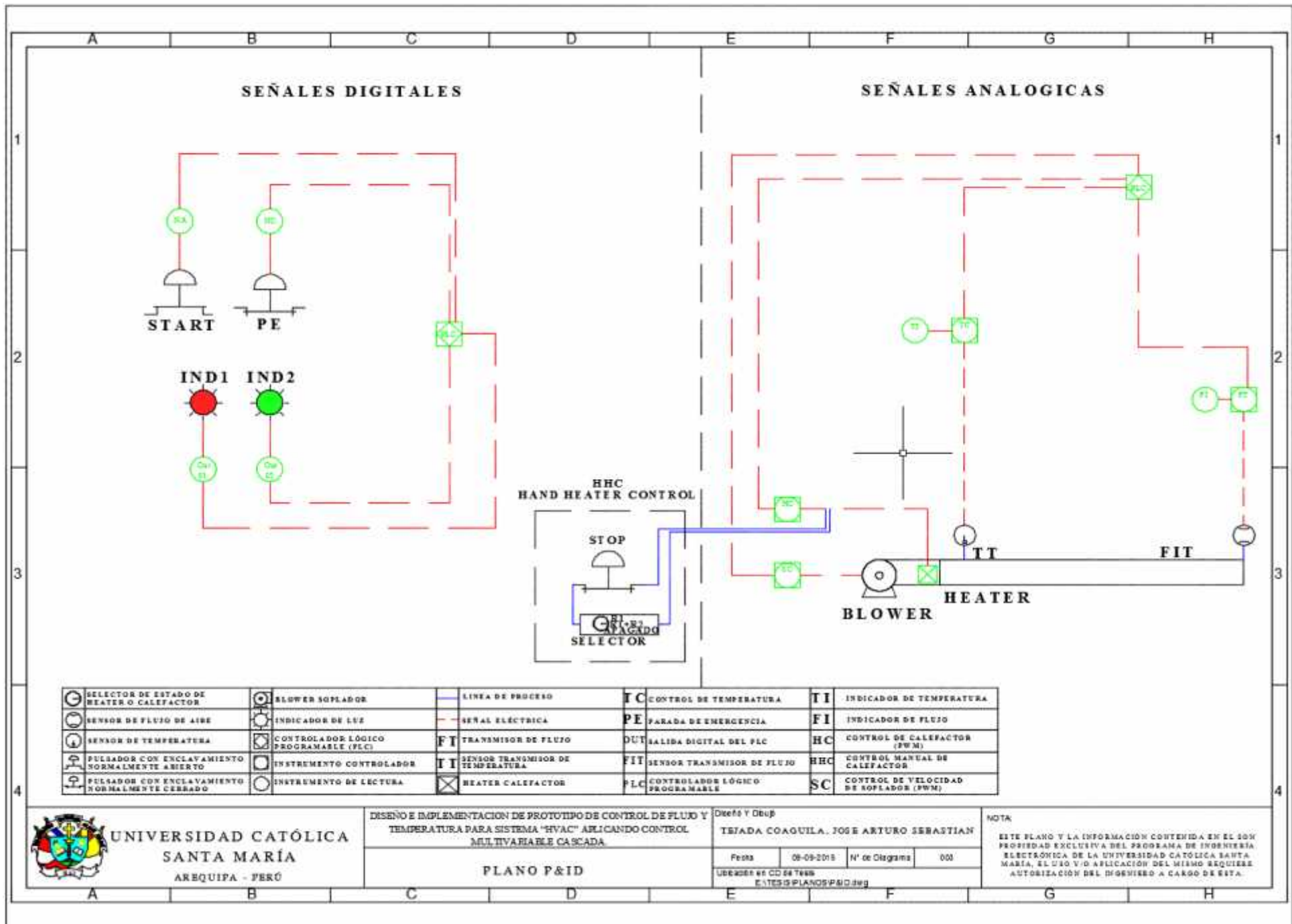
<http://www.controlnet.com>

http://www.uky.edu/bae/sites/www.uky.edu/bae/files/CAPITULO_7.pdf

<http://www.siemens.com>

ANEXOS





UNIVERSIDAD CATÓLICA
SANTA MARÍA
AREQUIPA - PERÚ

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA PARA SISTEMA "HVAC" APLICANDO CONTROL MULTIVARIABLE EN CASCADA.

PLANO P&ID

Diseño y Diagrama

TEJADA COAGUILA, JOSE ARTURO SEBASTIAN

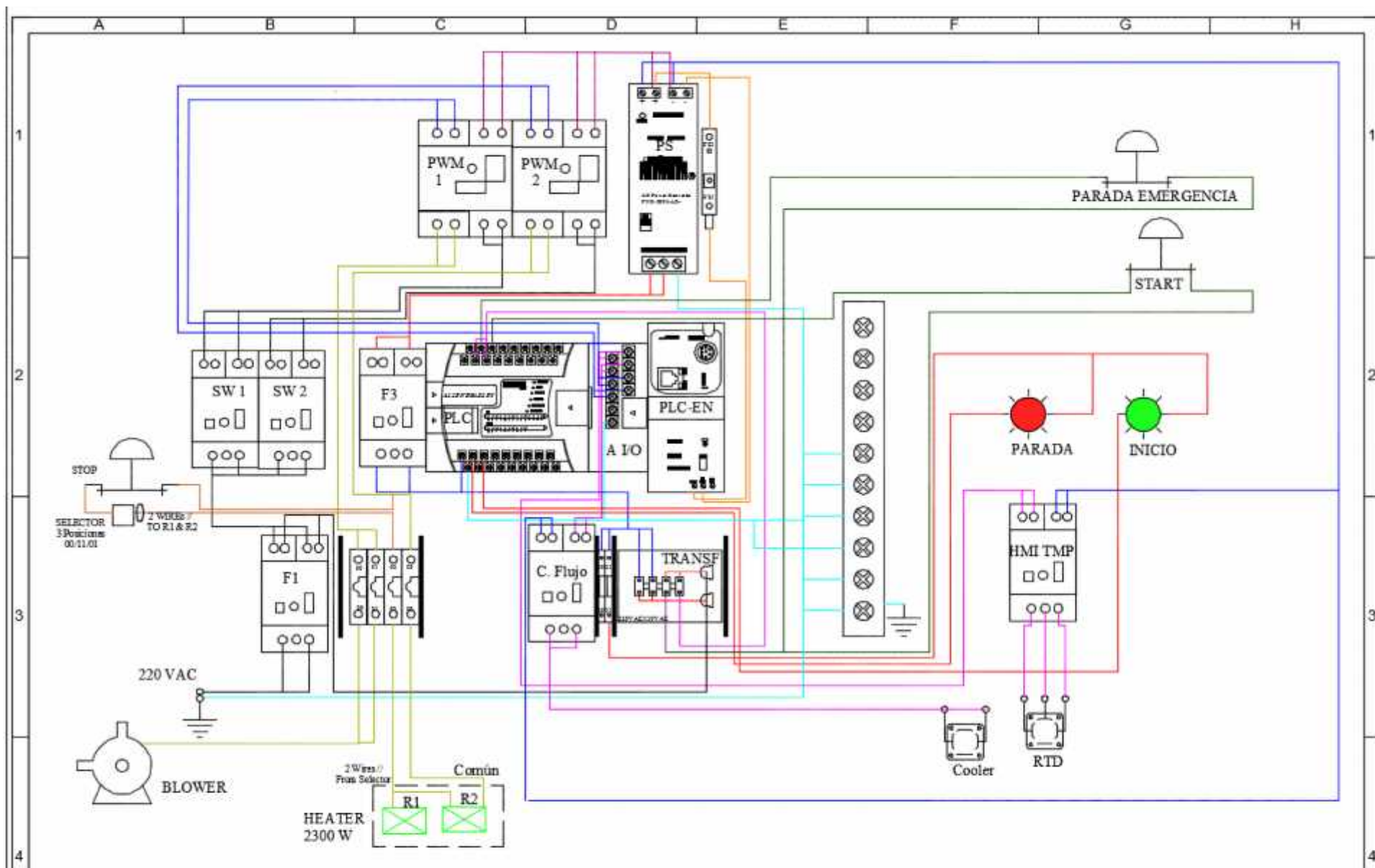
Fecha 08-09-2015

N° de Diagrama 000

USADOS EN CO 64 TRAB EN TESIS PLANOS P&ID JMG

NOTA

ESTE PLANO Y LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN EL SON PROPIEDAD EXCLUSIVA DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA. EL USO Y/O APLICACIÓN DEL MISMO REQUIERE AUTORIZACIÓN DEL DISEÑERO A CARGO DE ESTA.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
SANTA MARÍA
AREQUIPA - PERÚ

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA PARA SISTEMA "HVAC" APLICANDO CONTROL MULTIVARIABLE CASCADA.

PLANO DE CONEXIONES ELÉCTRICAS Y DE INSTRUMENTACIÓN

Diseño y Draw

TESADA COAGUILA, JOSÉ ARTURO SEBASTIÁN

Fecha

06-09-2015

N° de Diagrama

001

Ubicación en CD de Tesis

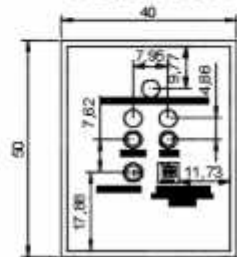
E:\TESIS\PLANOS ELECTRICOS INSTRUMENTAL.dwg

NOTA:

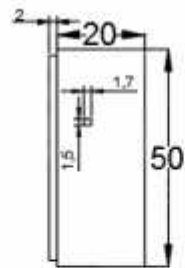
ESTE PLANO Y LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN EL SON PROPIEDAD EXCLUSIVA DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTA MARÍA. EL USO O APLICACIÓN DEL MISMO REQUIERE AUTORIZACIÓN DEL INGENIERO A CARGO DE ÉSTA.

TABLERO DE CONTROL

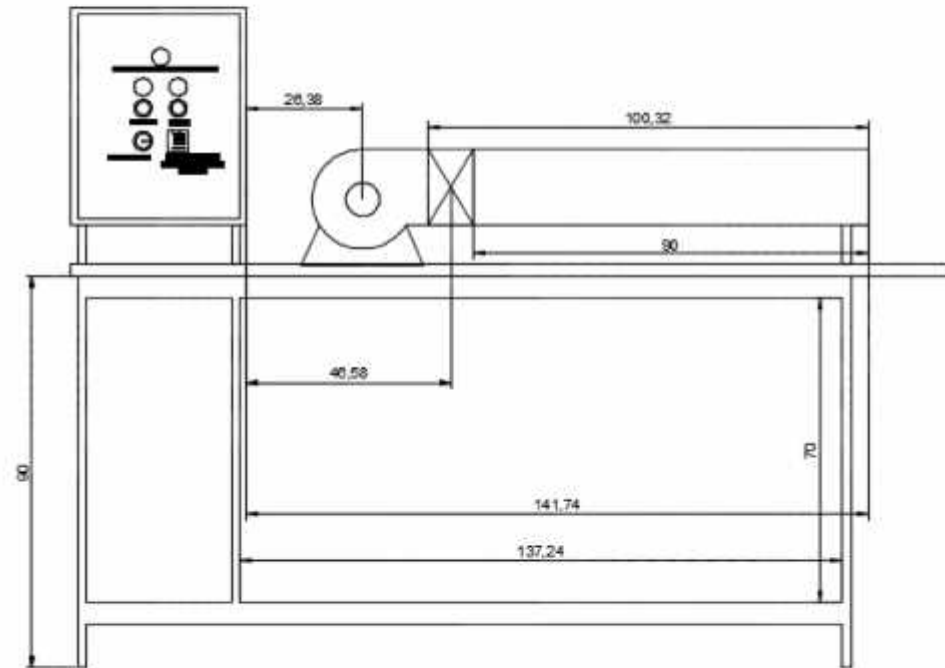
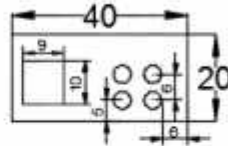
VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



VISTA INFERIOR



UNIVERSIDAD CATÓLICA
 SANTA MARÍA
 AREQUIPA - PERÚ

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE PROTOTIPO DE CONTROL DE FLUJO Y TEMPERATURA PARA SISTEMA "HVAC" APLICANDO CONTROL MULTIVARIABLE CASCADA

PLANO MECÁNICO

Diseño y Dibujó:
 TEJADA COAGUILA, JOSE ARTURO SEBASTIAN

FECHA: 10/09/2015 No. DIAGRAMA: 001

INDICACION DE CAD DE TEXTO:
 *TRABAJE PLANO MECANICO.DWG

ESTE PLANO Y LA INFORMACION CONTENIDA EN EL SON PROPIEDAD EXCLUSIVA DEL PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA SANTA MARÍA, EL USO Y/O APLICACION DEL MISMO REQUIERE AUTORIZACION DEL INGENIERO A CARGO DE ESTA.