



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

**FACULTAD DE SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Propuesta de Investigación, previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE LÓGICA DIFUSA
PARA LA CÁMARA FRIGORÍFICA DE UNA PLANTA PROTOTIPO DE
REFRIGERACIÓN PARA COMPARACIÓN CON UN CONTROLADOR PID”**

AUTOR

NÉSTOR GABRIEL DE LA ROSA MEJILLÓN

PROFESOR TUTOR

ING. ELSY VILLAMAR GARCÉS, MGTR.

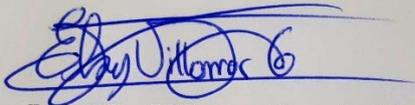
LA LIBERTAD – ECUADOR

2019

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutora del trabajo de titulación denominado: **“Diseño e implementación de un control de lógica difusa para la cámara frigorífica de una planta prototipo de refrigeración para comparación con un controlador PID”**, elaborado por el egresado **De la Rosa Mejillón Néstor Gabriel**, de la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes y autorizo al estudiante para que inicie los trámites legales correspondientes.

La Libertad, Febrero del 2019



Ing. Elsy Villamar Garcés, Mgtr.

DEDICATORIA

Dedico este documento especialmente a mis padres Pablo De la Rosa y Alicia Mejillón, por enseñarme a cómo vivir la vida por más dura que sea, por no dejarme decaer sin importar las adversidades que se me puedan presentar, por estar siempre ahí dándome sabios consejos, llenas de sus experiencias vividas las mismas que me ayudan día a día a formarme como persona.

Les agradezco infinitamente por todo el esfuerzo que han realizado para ayudarme a conseguir una más de mis metas y poder seguir formándome profesionalmente.

Néstor Gabriel De la Rosa Mejillón

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiarme durante mi carrera estudiantil desde el inicio hasta el fin, por brindarme las fuerzas necesarias en momentos de debilidad y ayudarme a cumplir cada una de mis metas.

Agradezco a los docentes de la facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, especialmente a la ingeniera Elsy Villamar, tutora del proyecto de investigación, por su buena disposición de ayuda en todo momento, por compartir sus conocimientos y especialmente su amistad.

Agradezco infinitamente a mis padres Pablo De la Rosa y Alicia Mejillón, por ser un pilar fundamental durante toda mi carrera estudiantil, ya que con sacrificio lograron brindarme lo necesario para mi formación profesional, por sus consejos y sabias palabras que día a día me motivaban a seguir adelante.

A mis hermanos, sobrinos, amigos y demás familiares por estar conmigo, por apoyarme, por brindarme alegría y aliento en momentos de desánimos cuando sentía ya no poder.

“Deja que tu corazón guíe las ideas que produce tu cerebro, así lograrás el éxito.”

Anónimo.

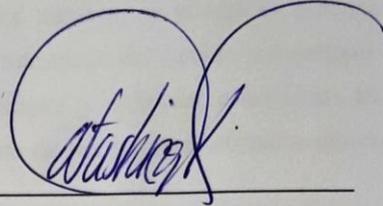
Néstor Gabriel De la Rosa Mejillón.

TRIBUNAL DE GRADO



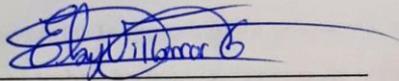
Ing. Freddy Villao Santos, MSc.

DECANO DE FACULTAD



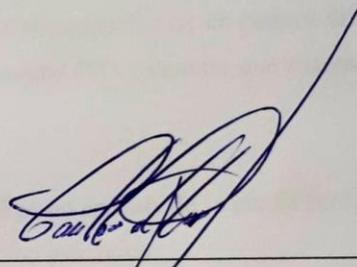
Ing. Washington Torres Guin, MSc.

DIRECTOR(A) DE CARRERA



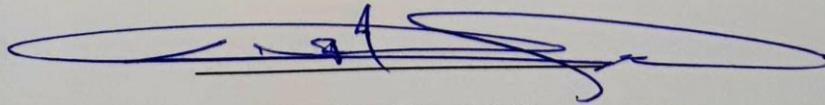
Ing. Elsy Villamar Garcés, Mgtr.

PROFESOR TUTOR



Ing. Carlos Saldaña Enderica, Mgtr

PROFESOR DE ÁREA



Ab. Víctor Coronel Ortiz

SECRETARIO GENERAL

RESUMEN

El presente trabajo de titulación muestra el diseño e implementación de un control de lógica difusa sobre una cámara frigorífica en un prototipo de refrigeración para comparación con un controlador PID, con este proyecto se pondrá en práctica aquellos conocimientos adquiridos durante el transcurso del estudio universitario en las asignaturas recibidas de análisis de señales y sistemas, conociendo las características técnicas como el funcionamiento de los equipos utilizados dentro de esta propuesta.

La importancia de realizar este proyecto es el de aumentar el tiempo de durabilidad de productos almacenados en una cámara frigorífica y brindar mayor ahorro en el consumo eléctrico mediante la implementación de un control difuso, además de realizar una comparación con un control PID y denotar que sistema de control es más eficiente.

Para validar la metodología propuesta, se realizó un análisis de la planta prototipo el cual trabajaba bajo un sistema de refrigeración mecánico.

En primera instancia se realiza la adquisición de datos del sistema en lazo abierto para identificar la problemática existente sobre la planta prototipo de refrigeración para luego implementar un control en lazo cerrado aplicando el sistema difuso sobre el proceso requerido y así optimizar el funcionamiento de la planta incluyendo el ahorro del consumo eléctrico.

ABSTRACT

The present work of titillation shows the design and the implementation of a control of the diffuse logic on a cold room in a prototype of the refrigeration for the comparison with a controller PID, with this project keeps in practice the knowledge acquired during the course of the university study in the subjects of analysis of signals and systems, knowing the technical characteristics as the operation of the equipment within this proposal.

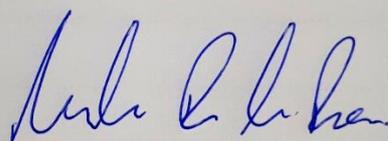
The importance of carrying out this project is to increase the durability time of products stored in a cold store and provide greater savings in electricity consumption through the implementation of a fuzzy control, in addition to making a comparison with a PID control and denote that Control system is more efficient.

To validate the proposed methodology, an analysis was made of the prototype plant which worked under a mechanical refrigeration system.

In the first instance the data is acquired in the system in the open loop to identify the existing problem in the prototype plant in the refrigeration and then implement a control in the closed loop by applying the diffuse system in the required process and thus optimize the operation of the operation of the plant as the saving of electricity consumption.

DECLARACIÓN

El contenido del presente Trabajo de Graduación es de mi responsabilidad; el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Universidad Estatal Península de Santa Elena



Néstor Gabriel De la Rosa Mejillón

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
TRIBUNAL DE GRADO.....	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT.....	vi
DECLARACIÓN	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
LISTA DE ANEXOS.....	xix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
GENERALIDADES DE LA PROPUESTA.....	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL:.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 METODOLOGÍA	4
1.5 RESULTADOS ESPERADOS	5

CAPÍTULO II.....	6
LA PROPUESTA	6
2.1 MARCO CONTEXTUAL	6
2.1.1 UBICACIÓN	6
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	7
2.2.1 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	7
2.2.2 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE CONTROL	10
2.2.3 TIPOS DE CONTROLADORES	12
2.2.4 CONTROLADOR CON LÓGICA DIFUSA	16
2.2.5 SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	18
2.3 MARCO TEÓRICO	20
CAPÍTULO III.....	22
DESARROLLO	22
3.1 COMPONENTES DE LA PROPUESTA.....	22
3.1.1 COMPONENTES FÍSICOS	22
3.1.2 COMPONENTES LÓGICOS.....	30
3.2 DISEÑO DE LA PROPUESTA.....	33
3.2.1 DISEÑO FÍSICO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN.....	33
3.2.2 DIAGRAMAS DEL SISTEMA.....	34
3.2.3 DISEÑO DE LOS CONTROLADORES	40
3.2.4 CONTROL PID PARA LA CÁMARA FRIGORÍFICA.....	44
3.2.5 DISEÑO DE CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA.....	45
3.2.6 PROGRAMACIÓN DEL PLC S7 1200 AC/DC EN TÍA PORTAL PARA CONTROL DE COMPRESORES.....	51

3.2.7	DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE PANTALLA HMI EN EL SOFTWARE DOPSOFT V2	56
3.3	CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN KWH Y COSTOS MENSUALES.....	57
3.4	ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.....	58
CAPÍTULO IV		62
PRUEBAS Y RESULTADOS		62
4.1	PRUEBAS	62
4.2	RESULTADOS	82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		88
CONCLUSIONES		88
RECOMENDACIONES.....		89
BIBLIOGRAFÍA		90
ANEXOS		92

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA.....	6
FIGURA 2. PLANTA PROTOTIPO DE REFRIGERACIÓN	6
FIGURA 3. DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN, RECUPERADA DE AREATECNOLOGICA.COM	9
FIGURA 4. DIAGRAMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO	10
FIGURA 5. DIAGRAMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO.....	11
FIGURA 6. DIAGRAMA DE CONTROL SISO	12
FIGURA 7. DIAGRAMA DE CONTROL MIMO	12
FIGURA 8. CONJUNTOS DIFUSOS	14
FIGURA 9. FUNCIÓN DE FORMA TRIANGULAR	15
FIGURA 10. FUNCIÓN DE FORMA TRAPEZOIDAL	16
FIGURA 11. DIAGRAMA PARA DESARROLLO DE UN CONTROL DIFUSO	17
FIGURA 12. LIBRERÍAS DE SIMULINK	18
FIGURA 13. BLOQUES DE SISTEMAS CONTINUOS.....	19
FIGURA 14. BLOQUES DE SEÑALES.....	19
FIGURA 15. BLOQUES DE SALIDAS	20
FIGURA 16. PARTES EXTERNAS DEL PLC SIEMENS S7-1200	22
FIGURA 17. MÓDULO DE COMUNICACIÓN CM 1241 RS422/485	23
FIGURA 18. INTERFAZ HOMBRE - MÁQUINA HMI DELTA.....	25
FIGURA 19. SENSOR DE TEMPERATURA NTC FULL GAUGE SB41.....	25
FIGURA 20. CONTROLADOR FULL GAUGE VX - 950 PLUS.....	26
FIGURA 21. PRESENTACIÓN DEL PANEL VX - 950 PLUS	27
FIGURA 22. INTERFAZ VX-950 HMI/01	27
FIGURA 23. INDICADORES Y TECLAS DE LA INTERFAZ VX-950 HMI/01, RECUPERADA DEL DATASHEET	28
FIGURA 24. FUENTE DE ALIMENTACIÓN MW RS 15-12.....	29
FIGURA 25. DISPOSITIVO CONV32 USB RS-485.....	30

FIGURA 26. SOFTWARE TÍA PORTAL V14	31
FIGURA 27. SOFTWARE DOPSOFT V12.....	31
FIGURA 28. SOFTWARE SITRAD 4.13.2.2.....	32
FIGURA 29. SOFTWARE MATLAB	32
FIGURA 30. SOFTWARE CADE_SIMU V3.0.....	33
FIGURA 31. DISEÑO FÍSICO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN.....	33
FIGURA 32. DIAGRAMA DEL SISTEMA ELÉCTRICO	35
FIGURA 33. IMPLEMENTACIÓN DEL TABLERO ELÉCTRICO.....	35
FIGURA 34. CONEXIONES DEL CONTROLADOR PLC	37
FIGURA 35. CONEXIONES BARRA SUPERIOR E INFERIOR DEL CONTROLADOR VX-950 PLUS, RECUPERADA DEL DATASHEET.....	38
FIGURA 36. RANURA DEDICADA PARA CONEXIÓN DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN, RECUPERADA DEL DATASHEET.....	38
FIGURA 37. CONEXIÓN PARA COMUNICACIÓN CON HMI VX-950 Y SOFTWARE SITRAD SIMULTÁNEAMENTE, RECUPERADA DEL DATASHEET	38
FIGURA 38. SISTEMA DE CONTROL CON PLC Y VX-950 PLUS.....	39
FIGURA 39. SISTEMA DE MONITOREO CON HMI DELTA Y HMI VX-950	39
FIGURA 40. DIAGRAMA TOPOLÓGICO DEL SISTEMA IMPLEMENTADO	40
FIGURA 41. ADQUISICIÓN DE DATOS MEDIANTE EL SOFTWARE SITRAD	41
FIGURA 42. DIAGRAMA DE ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA.....	41
FIGURA 43. PRUEBAS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE LA CÁMARA FRIGORÍFICA	42
FIGURA 44. SEÑALES EN RESPUESTA A LA CÁMARA FRIGORÍFICA....	42
FIGURA 45. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA CÁMARA FRIGORÍFICA.....	44

FIGURA 46. VARIABLE DE ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA DE CONTROL.....	44
FIGURA 47. CREACIÓN DE SISTEMA FUZZY EN MATLAB.....	47
FIGURA 48. CREACIÓN DE VARIABLES ENTRADA, SALIDA.....	48
FIGURA 49. CREACIÓN DE FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA LA ENTRADA TEMPERATURA	48
FIGURA 50. CREACIÓN DE FUNCIONES DE MEMBRESÍA LA PARA SALIDA ABERTURA_VÁLVULA	49
FIGURA 51. ASIGNACIÓN DE REGLAS AL SISTEMA.....	49
FIGURA 52. VISTA GENERAL DE REGLAS IMPLEMENTADAS	50
FIGURA 53. ONDA DE LA SEÑAL ENTRADA: ABERTURA_VÁLVULA VS SALIDA: TEMPERATURA	50
FIGURA 54. CREACIÓN DE NUEVO PROYECTO EN TÍA PORTAL V14....	51
FIGURA 55. CONFIGURACIÓN DE NUEVO DISPOSITIVO.....	51
FIGURA 56. PROGRAMACIÓN DE PARO Y MARCHA DEL SISTEMA	52
FIGURA 57. BLOQUES PARA LECTURA DEL SENSOR DE TEMPERATURA Y PRESIÓN.....	53
FIGURA 58. BLOQUE DE CONTROL PID, NORMALIZACIÓN Y ESCALADO	54
FIGURA 59. CONTROL DE ENCENDIDO Y APAGADO DE COMPRESORES	54
FIGURA 60. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE CONTROL	55
FIGURA 61. CREACIÓN DE NUEVO PROYECTO EN DOPSOFT.....	56
FIGURA 62. CONFIGURACIÓN PARA COMUNICACIÓN ETHERNET.....	56
FIGURA 63. DISEÑO DE INTERFAZ HMI PARA MONITOREO DEL SISTEMA DE CONTROL	57
FIGURA 64. DIAGRAMA DE CONTROL PID EN SIMULINK PARA EL CONTROL DE LA CÁMARA FRIGORÍFICA	62
FIGURA 65. SEÑAL DE SALIDA APLICANDO EL CONTROL PID A LA CÁMARA FRIGORÍFICA.....	63

FIGURA 66. ERROR DE ESTADO ESTACIONARIO EXISTENTE EN EL SISTEMA DE CONTROL PID.	64
FIGURA 67. GRÁFICA DE LA SEÑAL DE ERROR DE ESTADO ESTACIONARIO CON LA APLICACIÓN DE UN CONTROL PID.....	64
FIGURA 68. DIAGRAMA DE CONTROL PID CON PERTURBACIÓN.	65
FIGURA 69. GRÁFICA DEL CONTROLADOR PID APLICANDO PERTURBACIÓN.	65
FIGURA 70. DIAGRAMA DE CONTROL DIFUSO EN SIMULINK	66
FIGURA 71. EXPORTAR E IMPORTAR DATOS DEL CONTROLADOR	67
FIGURA 72. SEÑAL DE SALIDA EN RESPUESTA AL CONTROLADOR DIFUSO	67
FIGURA 73. ERROR DE ESTADO ESTACIONARIO EXISTENTE EN EL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO.	68
FIGURA 74. GRÁFICA DE LA SEÑAL DE ERROR DE ESTADO ESTACIONARIO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DIFUSO.	69
FIGURA 75. DIAGRAMA DE CONTROL DIFUSO CON PERTURBACIÓN.	69
FIGURA 76. GRÁFICA DEL CONTROLADOR DIFUSO APLICANDO PERTURBACIÓN.....	70
FIGURA 77. ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA (1)	71
FIGURA 78. ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA (2)	71
FIGURA 79. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID	74
FIGURA 80. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA	75
FIGURA 81. GRÁFICA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS DE APERTURA DE LA VÁLVULA EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA.....	76
FIGURA 82. DATOS DE TEMPERATURA Y ABERTURA DE VÁLVULA EXTRAÍDOS DE LA SIMULACIÓN.	80

FIGURA 83. VALORES DE SOBRECALENTAMIENTO EXTRAÍDOS DE LOS DATOS ADQUIRIDOS INICIALMENTE.	80
FIGURA 84. SETPOINT DE SOBRECALENTAMIENTO.	80
FIGURA 85. DIAGRAMA DE CONTROL ON/OFF DE COMPRESORES.	81
FIGURA 86. COMPARACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO ENTRE LA PLANTA ACTUAL Y LA PLANTA CON LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES.....	84
FIGURA 87. COMPARACIÓN DE LOS COSTOS POR PAGAR MENSUALMENTE ENTRE LA PLANTA ACTUAL Y LA PLANTA CON LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL PLC S7-1200 AC/DC	23
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE COMUNICACIÓN.....	24
TABLA 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CONTROLADOR VX – 950 PLUS	26
TABLA 4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA INTERFAZ VX-950 HMI/01	28
TABLA 5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA FUENTE MW RS 15-12	29
TABLA 6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL DISPOSITIVO CONV32 RS-485	30
TABLA 7. MODELOS DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA OBTENIDAS PARA LA CÁMARA FRIGORÍFICA	43
TABLA 8. VALORES DE LOS PARÁMETROS P,I,D PARA EL CONTROL DE LA CÁMARA FRIGORÍFICA.	45
TABLA 9. FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA VARIABLE DE ENTRADA "TEMPERATURA"	46
TABLA 10. FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA VARIABLE DE SALIDA "ABERTURA_VÁLVULA"	46
TABLA 11. REGLAS PARA EL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO	47
TABLA 12. ASIGNACIÓN DE IP A DISPOSITIVOS	52
TABLA 13. COSTOS POR CONSUMO DE KVH, RECUPERADA DE CNEL EP.....	58
TABLA 14. PRECIO DE EQUIPOS SIEMENS	59
TABLA 15. PRECIOS DE EQUIPOS UTILIZADOS	59
TABLA 16. COSTOS DE MANO DE OBRA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PID	60
TABLA 17. COSTOS DE MANO DE OBRA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO	60

TABLA 18. COSTOS TOTALES DE IMPLEMENTACIÓN.....	61
TABLA 19. VALORES PICO A PICO Y OVERSHOOT DE LA SEÑAL DE SALIDA (1)	63
TABLA 20. VALORES PICO A PICO Y OVERSHOOT DE LA SEÑAL DE SALIDA (2)	68
TABLA 21. NORMALIZACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA.....	72
TABLA 22. TIEMPO DE ESTABILIDAD DE LA PLANTA ACTUAL	73
TABLA 23. TIEMPO DE ESTABILIDAD CON CONTROL PID Y CONTROL DIFUSO	73
TABLA 24. TIEMPO DE ESTABILIDAD DEL CONTROLADOR PID	74
TABLA 25. TIEMPO DE ESTABILIDAD DEL CONTROLADOR DIFUSO ..	75
TABLA 26. PORCENTAJE DE APERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA, VALORES POR SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR PID.....	76
TABLA 27. PORCENTAJE DE APERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA, VALORES POR SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO.....	77
TABLA 28. FUNCIONES UTILIZADAS PARA ACCIONAMIENTO DE VÁLVULA DE EXPANSIÓN.	78
TABLA 29. FUNCIONES UTILIZADAS PARA INGRESO DE PARÁMETROS P,I,D.	78
TABLA 30. PORCENTAJE DE APERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA, VALORES POR IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR PID.....	79
TABLA 31. PORCENTAJE DE APERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA, VALORES POR IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO	81
TABLA 32. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE ESTABILIDAD ENTRE LA PLANTA ACTUAL Y LA PLANTA CON CONTROLADORES	82

TABLA 33. VALORES DE PRECISIÓN Y PORCENTAJE DE ERROR DE LA NORMALIZACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA	83
TABLA 34. COMPARACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO Y COSTOS MONETARIOS ENTRE CONTROLADOR PID Y CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA.	85
TABLA 35. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE VALORES DE SIMULACIÓN Y VALORES DE IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID.....	86
TABLA 36. PORCENTAJE DE ERROR ENTRE VALORES DE SIMULACIÓN Y VALORES DE IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA	86
TABLA 37. COMPARACIÓN ENTRE VALORES DE SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN Y PORCENTAJE DE ERROR EN RELACIÓN A LA APERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN.....	87

LISTA DE ANEXOS

ANEXOS 1: VARIABLES UTILIZADAS DURANTE LA PROGRAMACIÓN EN EL SOFTWARE TIA PORTAL.....	92
ANEXOS 2: PROGRAMACIÓN PARA EL ENCENDIDO Y APAGADO DE LOS COMPRESORES EN EL SOFTWARE TIA PORTAL.	93
ANEXOS 3: DATOS ADQUIRIDOS PARA LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA CÁMARA FRIGORÍFICA Y COMPRESORES....	95
ANEXOS 4: DATOS DE CONTROL PID IMPLEMENTADO.....	96
ANEXOS 5: DATOS DE CONTROL DIFUSO IMPLEMENTADO.....	97
ANEXOS 6: ELABORACIÓN DE TABLERO ELÉCTRICO Y DE CONTROL.	98

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo la optimización de una planta prototipo de refrigeración, mejorando la durabilidad de los productos almacenados en una cámara frigorífica.

El capítulo uno detalla todo lo referente a generalidades del proyecto, como sus objetivos a alcanzar para la optimización del control de la planta prototipo y la justificación del proyecto.

El capítulo dos se conforma de los fundamentos teóricos, detallando el marco contextual, marco conceptual y marco teórico, en el que se describen los conceptos de las tecnologías de control y automatización además del software de simulación.

En el capítulo tres se detalla todo lo referente al desarrollo de la propuesta. En esta sección del capítulo se describe todo lo concerniente a los equipos de control y automatización que son utilizados para el desarrollo del control difuso en la planta prototipo de refrigeración, además del software Matlab en donde se realizará la simulación del sistema antes de la implementación.

El capítulo cuatro muestra las pruebas y resultados obtenidos de la simulación e implementación del desarrollo de la propuesta de la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración y finalmente el capítulo cinco que detalla las conclusiones y recomendaciones del proyecto desarrollado.

Para la implementación del sistema se usó un dispositivo lógico programable (PLC) acompañado de la instalación y configuración de una interfaz hombre – máquina (HMI) para monitoreo y control de la planta prototipo.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES DE LA PROPUESTA

1.1 ANTECEDENTES

En 1965 Lotfi A. Zadeh ideó el concepto de lógica difusa al no estar conforme con los conjuntos clásicos que solo permitían dos opciones “0” o “1”. Es por ello que da lugar a su campo al publicar un artículo el cual llamó “Fuzzy Sets”, en donde describe las matemáticas de los conjuntos difusos en el cual los datos podrían tener asociados un grado de pertenencia parcial. [1]

Años después en 1974, Ebrahim H. Mamdani en Reino Unido, diseñó un controlador difuso para la regulación de un motor a vapor, demostrando así la aplicabilidad de la lógica difusa en el campo del control. [1]

La lógica difusa es un término usado para cualquier procedimiento matemático o computacional que razona en base a un sistema difuso, siendo su propósito el proporcionar una manera simple de obtener una conclusión a partir de una entrada simple, ambigua e incompleta. [2]

Ecuador al ser un país productivo y comercial en las áreas como la ganadería, agricultura y pesca exigen de sistemas de refrigeración para el mantenimiento y durabilidad de sus productos y así conservarlos limpios y frescos para su exportación e importación. [3]

Los sistemas de refrigeración actualmente dentro del mercado ecuatoriano como en centros comerciales y supermercados son de gran importancia para la conservación de los alimentos hasta el momento de su comercialización, sin embargo, en algunos casos se ha presenciado que algunas tiendas con mayor producción presentan inconvenientes en la preservación de sus productos al no

tener un correcto funcionamiento en la temperatura a la cual los productos deberían estar sometidos, esto debido al mal uso de los equipos que utilizan.

Al no disponer de un sistema de control de temperatura sobre los productos, esto produce que los equipos se encuentren en constante funcionamiento, provocando una gran demanda en el consumo eléctrico lo cual puede ser perjudicial para la empresa.

Conociendo el problema que se presenta, se crea la necesidad de diseñar e implementar un sistema de control automático para los equipos de refrigeración, para conseguir un mayor desempeño en el proceso de enfriamiento y así aumentar la durabilidad de los productos almacenados en las cámaras frigoríficas, además de obtener una reducción en el consumo eléctrico y a su vez generar la reducción de los costos a pagar por el consumo.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 OBJETIVO GENERAL:

Diseñar e implementar un control de lógica difusa para una cámara frigorífica en una planta prototipo de refrigeración para comparar el ahorro eléctrico con el controlador PID.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Analizar e identificar datos y reglas para el sistema de control difuso.
- Diseñar e implementar el controlador de lógica difusa para la cámara frigorífica.
- Implementar y configurar la interfaz HMI para monitoreo dentro de la cámara frigorífica.
- Comparar el ahorro del consumo eléctrico entre el control difuso y un control PID.
- Realizar pruebas necesarias del sistema implementado y asegurar el correcto funcionamiento del mismo.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Para poner en práctica aquellos conocimientos adquiridos en el transcurso de los estudios universitarios en la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones, se presentará un proyecto que estará enfocado al área de automatización y control, siendo una de las ramas de la ingeniería que ha revolucionado al sector industrial gracias a que brinda sistemas más eficientes y seguros.

Mediante este proyecto de diseño e implementación de un control de lógica difusa sobre una cámara frigorífica en un prototipo de refrigeración se busca un sistema que brinde mayor eficiencia a la planta, mayor seguridad y menor consumo eléctrico, haciendo que la durabilidad que los alimentos almacenados sea mayor que en un sistema convencional.

Actualmente los sistemas basados en lógica difusa no son muy comunes para el control de procesos dentro de las industrias en comparación con los controladores PID. Es por ello que este proyecto pretende demostrar que los sistemas difusos al igual que los sistemas PID pueden brindar soluciones de calidad, por lo cual se realizará una comparación en el ahorro del consumo eléctrico dentro de la planta prototipo de refrigeración.

1.4 METODOLOGÍA

Este proyecto tiene como objetivo la creación de un control de lógica difusa en una cámara frigorífica de un prototipo de refrigeración, para esto se adaptarán diferentes técnicas de investigación tales como: método exploratorio, diagnóstico, cuantitativo y descriptivo.

El método de diagnóstico nos ayuda a realizar una evaluación del sistema de refrigeración mediante la prueba de equipos a implementar, con el propósito de conseguir optimización en el sistema.

El método de investigación exploratoria ayudará a identificar el problema dentro del área en que se ejecutará el proyecto, siendo el caso la provincia de Santa Elena, para así implementar el control de lógica difusa en una cámara frigorífica mediante visitas del campo en el que comúnmente son utilizadas.

EL método cuantitativo se basa en la recopilación de información del prototipo fundamentado, en los datos adquiridos luego del análisis para poder realizar una comparación entre un sistema difuso y un sistema PID.

En cuanto al método descriptivo permitirá captar las variables y condiciones en las que se utilizará el proceso del sistema de refrigeración, para así exponer los problemas identificados que se desea resolver y mejorar en la planta.

1.5 RESULTADOS ESPERADOS

- Lo que se espera con la implementación de este proyecto es brindar un sistema más eficiente en el funcionamiento de la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración.
- Denotar que la implementación de un sistema de control difuso resulta mejor que un sistema de control PID.
- Generar una reducción en el consumo eléctrico en la planta prototipo de refrigeración y a su vez disminuir los costos a pagar mensualmente con la implementación de un sistema de control difuso.
- Promover el uso de nuevas tecnologías de control y automatización mediante la implementación de un sistema de control en un prototipo de refrigeración.

CAPÍTULO II

LA PROPUESTA

2.1 MARCO CONTEXTUAL

2.1.1 UBICACIÓN

La Universidad Estatal Península de Santa Elena se encuentra ubicada en la provincia de Santa Elena, cantón La Libertad como lo muestra la figura a continuación.

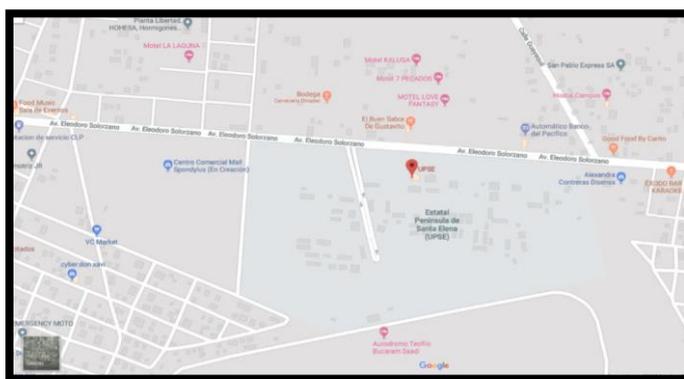


figura 1. Universidad Estatal Península De Santa Elena

La implementación del sistema de control de lógica difusa se realizará en un prototipo de refrigeración dentro del laboratorio de control y automatización de la carrera de electrónica y telecomunicaciones de la Universidad estatal Península de Santa Elena. Uno de los motivos para la elaboración de este proyecto es dar a conocer sobre los sistemas de control difuso ya que su implementación no es muy común en comparación a los sistemas de control PID, demostrando que los sistemas difusos también pueden brindar soluciones de alta calidad.



figura 2. Planta prototipo de refrigeración

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Los sistemas de refrigeración son un proceso el cual tiene como objetivo disminuir altas temperatura, manteniendo productos o alimentos a una temperatura menor a la del ambiente, brindando más tiempo de durabilidad de los alimentos almacenados.

2.2.1.1 COMPRESORES

Los compresores son equipos muy utilizados en los sistemas de refrigeración, encargados del incremento de un fluido, ya sea este gas o aire, aumentando el nivel de presión sobre el sistema.

2.2.1.2 CONDENSADOR

El condensador es un componente encargado de disipar el vapor comprimido causado por un proceso termodinámico.

2.2.1.3 VÁLVULA DE EXPANSIÓN

La válvula de expansión es un componente importante dentro de un sistema de refrigeración, ya que se encarga de generar una caída de presión necesaria entre el condensador y el evaporador.

2.2.1.4 EVAPORADOR

Es un intercambiador de calor, ya que realiza la acción de un cambio de estado (líquido - gaseoso), esto se realiza mediante la transferencia de calor desde un medio a ser enfriado como una vitrina o cámara frigorífica hacia un fluido refrigerante (gas).

2.2.1.5 COMPRESORES EN PARALELO

Los sistemas montados de compresores en paralelo son una solución actual a los sistemas de refrigeración. Consisten en la implementación de 2 o más compresores en el cual pueden trabajar simultáneamente o solo una parte de ellos según el frío necesario que se requiera, puesto que este sistema permitirá el aumento del flujo del refrigerante sobre la planta.

2.2.1.6 SEPARADOR DE ACEITE

Se encarga de separar el aceite lubricante del refrigerante, evitando que ingrese a otros componentes del sistema.

2.2.1.7 FILTRO

El filtro es un dispositivo encargado de filtrar o detener cualquier tipo de impurezas que ingresen al sistema con el fin de evitar averías u obstrucciones en el desarrollo de procesos.

2.2.1.8 ACUMULADOR

El acumulador es un tanque el cual recibe refrigerante líquido proveniente del evaporador, evitando que fluya hacia la línea de succión antes de evaporarse.

2.2.1.9 PRESOSTATO

El presostato es un elemento mecánico usado en los sistemas de refrigeración encargado de abrir o cerrar un circuito dependiendo de la lectura de presión de un fluido (gas).

2.2.1.10 VÁLVULA SOLENOIDE

Es un dispositivo utilizado para controlar el flujo de líquidos o gases en posición completamente abierta o completamente cerrada.

2.2.1.11 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA PLANTA DEL PROTOTIPO DE REFRIGERACIÓN.

El funcionamiento del sistema de refrigeración de la planta prototipo consiste en disipar el calor dentro de una cámara frigorífica y conseguir una temperatura adecuada para la durabilidad del producto almacenado.

Para lograr el proceso de enfriamiento, se empieza con el accionamiento de los compresores, permitiendo el paso del refrigerante a través de los tubos capilares, este envía una presión alta el cual pasa por un condensador donde se extrae el calor del refrigerante provocando un cambio de estado de gas a líquido, para luego entrar al separador de aceite y a su vez a un filtro eliminando las impurezas y evitando el paso de componentes no deseados, luego es enviado hacia la válvula de expansión quien permitirá el paso del refrigerante hacia el evaporador el mismo que realizará la acción de enfriamiento dentro de la cámara frigorífica, y una vez culminado el ciclo, este repite su proceso frigorífico, figura 3.

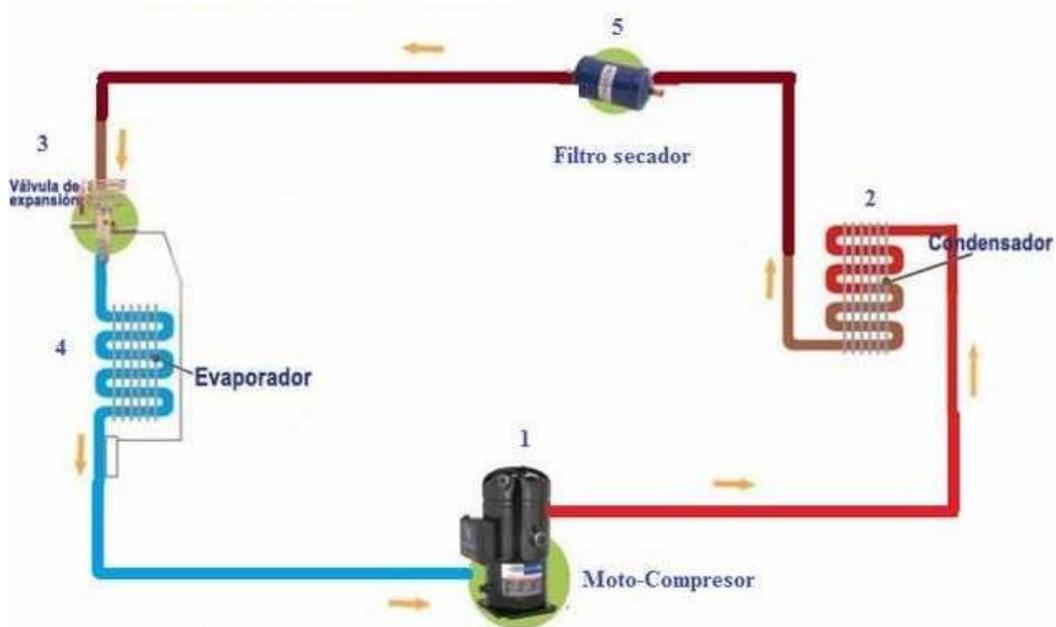


figura 3. Diagrama de un sistema de refrigeración, recuperada de areatecnologica.com

2.2.2 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE CONTROL

Dentro del estudio de la ingeniería, un sistema de control es un conjunto de dispositivos conectados entre sí, encargados de controlar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con la finalidad de optimizar procesos. [8]

2.2.2.1 SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO

Los sistemas de control en lazo abierto son aquellos en los que las señales de salida no inciden sobre el funcionamiento de la planta en general.

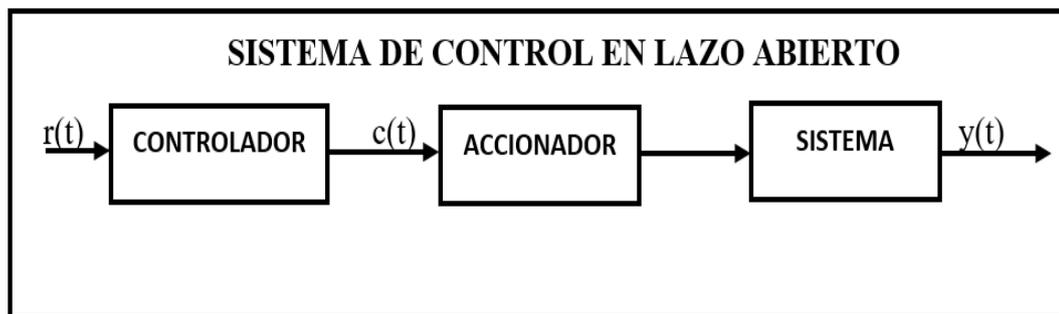


figura 4. Diagrama de control en lazo abierto

Controlador: El controlador es el encargado de recibir una señal de referencia y convertirla hasta llegar a que el sistema consiga una referencia deseada. [8]

Accionador: El accionador es aquel encargado de convertir la señal de control en una acción sobre el sistema. Por ejemplo, en el prototipo de refrigeración, el accionador será el sistema de potencia que enciente a la planta prototipo además de los compresores en paralelo. [8]

Sistema: El sistema también conocido como planta es aquello lo cual se va a controlar. [8]

2.2.2.2 SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO

Los sistemas de control en lazo cerrado son considerados por ser sistemas retroalimentados en el que la señal de salida es capaz de modificar la señal de entrada. [8]

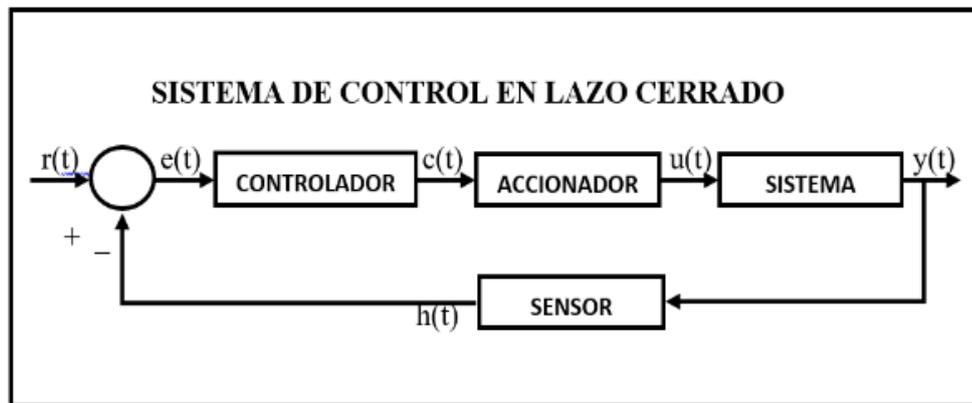


figura 5. Diagrama de control en lazo cerrado

Retroalimentación: La retroalimentación es una característica importante dentro de los sistemas en lazo cerrado, debido a que se consideran por hacer del sistema una secuencia causa – efecto entre variables, el cual nos permite realizar correcciones al sistema según se requiera.

Error: la señal de error es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de retroalimentación, en el cual es tomada para realizar correcciones a la señal de la variable de control.

Sensor: Es el encargado de medir el estado o variables del sistema a controlar dentro de la planta, por ejemplo: temperatura, posición, humedad. Ayuda a conseguir la respuesta deseada en la salida corrigiendo ciertas desviaciones que se presenten en la planta.

2.2.2.3 SISTEMA DE CONTROL SISO

Los sistemas de control SISO son caracterizados por ser sistemas que disponen de una sola señal de entrada y a su vez genera una única señal de salida (Single Input – Single Output). La figura 6 muestra de forma esquemática el sistema de control siso.



figura 6. Diagrama de control SISO

2.2.2.4 SISTEMA DE CONTROL MIMO

Los sistemas de control MIMO a diferencia del control SISO disponen de múltiples variables en la entrada y en la salida (Multiple Input – Multiple Output), además son los más usados en la práctica en general, debido a que los sistemas presentan muchas variables por controlar.

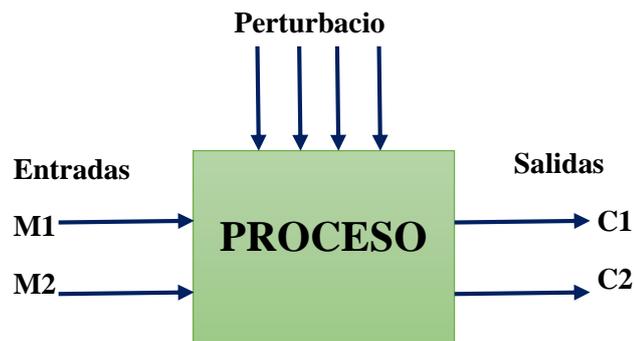


figura 7. Diagrama de control MIMO

2.2.3 TIPOS DE CONTROLADORES

2.2.3.1 CONTROLADOR PID

El controlador PID es un mecanismo de retroalimentación empleado usualmente en sistemas industriales en el que se calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado.

Los sistemas de control PID se conforman por tres parámetros: Proporcional, Integral y Derivativo.

Proporcional (P): Realiza una medición entre el valor actual y el set-point.

Integral (I): Describe el tiempo el cual tarda el sistema para realizar la acción de corrección de error.

Derivativo (D): Emite una acción predictiva en el que prevé el error, realizando una acción oportuna.

2.2.3.2 LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa también conocida como lógica borrosa busca más que dos simples valores de verdadero y falso que es lo que establece la lógica clásica. Lo que este propone es brindar una gama de grados de veracidad o falsedad lo cual está determinado por una función de pertenencia, la misma que puede tomar valores comprendidos entre (0,1).

Gracias a la lógica difusa, se puede expresar matemáticamente posibles estados como "caliente", "tibio" o "helado", como también "alto", "medio" o "bajo", para que sean procesadas por la computadora y así se pueda cuantificar los grados de verdad o falsedad de las expresiones humanas vagas. [7]

Conjunto Difuso

La lógica difusa permite trabajar con información inexacta o con un alto grado de imprecisión, a diferencia de la lógica convencional que trabaja con valores exactos de "0" ó "1", sin embargo, el problema nace por el bajo nivel de expresión de la lógica clásica. [9]

Conjuntos clásicos

Los conjuntos clásicos surgen ante la necesidad del ser humano de clasificar objetos y conceptos. Los conjuntos clásicos pueden estar determinados mediante un conjunto de elementos bien definidos o a través de una función de pertenencia la cual puede tomar valores de "0" ó "1". [9]

Un conjunto clásico puede estar definida bajo una función de pertenencia la misma que se muestra en la siguiente ecuación.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin A \\ 1 & \text{si } x \in A \end{cases} \quad (1)$$

Conjuntos Difusos

Los conjuntos difusos nacen bajo el hecho de que existen conceptos los cuales no tienen límites claros. En la función de pertenencia de un conjunto difuso este puede tomar valores del intervalo entre 0 y 1, y los valores que se comprende entre estos 2 valores es gradual y no cambia instantáneamente como sucede en los conjuntos clásicos. [9]

Un conjunto difuso en un universo en discurso puede estar definido bajo la siguiente ecuación.

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in U \} \quad (2)$$

Donde $\mu_A(x)$ es la función de pertenencia de la variable x , y U es el universo en discurso. Cuando más cerca este la pertenencia del conjunto A al valor de 1, mayor será la pertenencia de la variable x al conjunto A , como se muestra en la siguiente figura. [9]

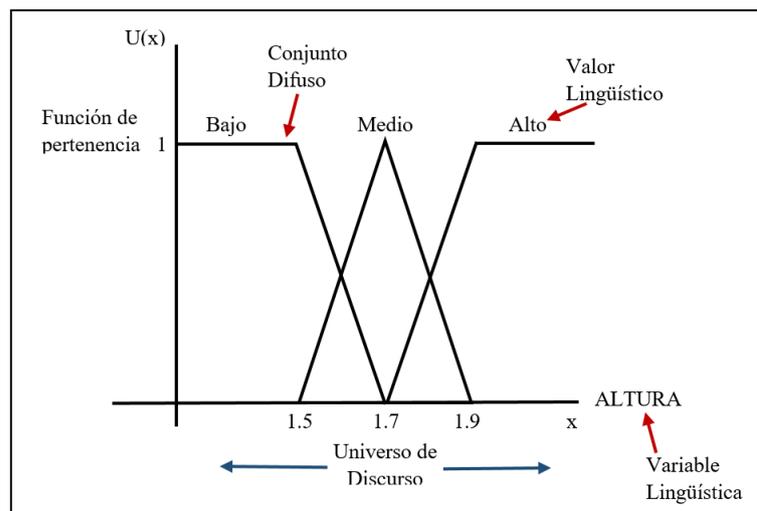


figura 8. Conjuntos Difusos

Funciones de pertenencia

Las funciones de pertenencia nos indica el grado de verdad al que cada elemento de un universo dado, pertenece a cierto conjunto con valores comprendidos entre 0 y 1. [9]

Las funciones de pertenencia nos permiten representar gráficamente un conjunto borroso, con formas triangulares, trapezoidales, gaussianas, sigmoidales, pero las comúnmente utilizadas gracias a su simplicidad matemática son las triangulares y trapezoidales, las mismas que se usarán para el diseño del proyecto a desarrollar. [9]

Función de pertenencia de forma triangular

La función de pertenencia triangular viene definida por un límite inferior a , un límite superior b y un valor modal m , tal que $a < m < b$. La figura muestra la función de pertenencia de forma triangular.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x \leq a \\ \frac{x - a}{m - a}, & \text{si } x \in (a, m) \\ \frac{b - x}{b - m}, & \text{si } x \in (m, b) \\ 0, & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

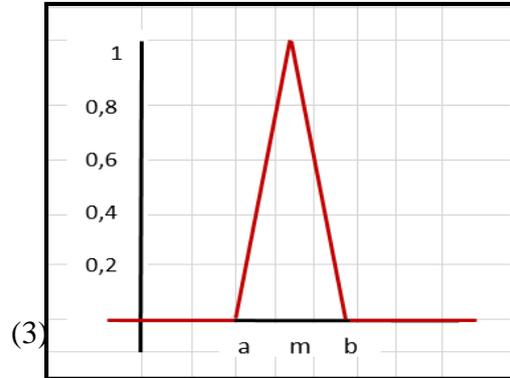


figura 9. Función de forma triangular

Función de pertenencia de forma trapezoidal

La función de pertenencia trapezoidal viene definida por un límite inferior a , un límite superior d , un límite de soporte inferior b y un límite de soporte superior c , tal que $a < b < c < d$. La figura muestra la función de pertenencia de forma trapezoidal.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } (x < a) \text{ ó } (x > d) \\ \frac{x - a}{b - a}, & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{si } b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c}, & \text{si } c \leq x \leq d \end{cases}$$

(4)

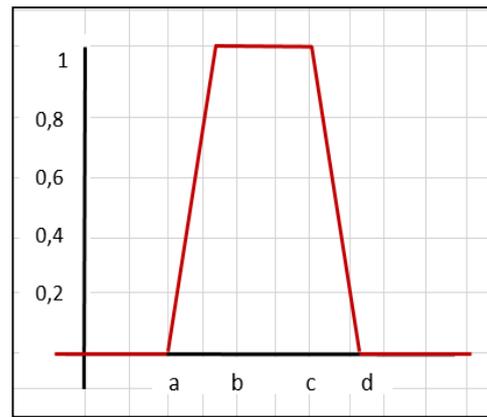


figura 10. Función de forma trapezoidal

2.2.4 CONTROLADOR CON LÓGICA DIFUSA

Un controlador difuso ofrece una eficiente metodología para el desarrollo de controladores no lineales sin la necesidad del uso de matemáticas avanzada. El controlador difuso no necesita de un modelamiento matemático del proceso a controlar de manera que estos problemas pueden ser solucionados de manera más eficiente a diferencia de un controlador clásico.

Los controladores difusos han sido de gran impacto para sistemas difíciles de modelar matemáticamente debido a que el diseño de este control se basa únicamente en experiencias y conocimientos del experto en el proceso. El control difuso en comparación a un control clásico brinda dos ventajas, una es que no es necesario obtener un modelo matemático del proceso a controlar, y la segunda es que se obtiene un control no lineal desarrollado prácticamente y sin complicaciones matemáticas. Para el desarrollo de un controlador difuso se debe tener en cuenta varias etapas que conforman este proceso, figura 11.

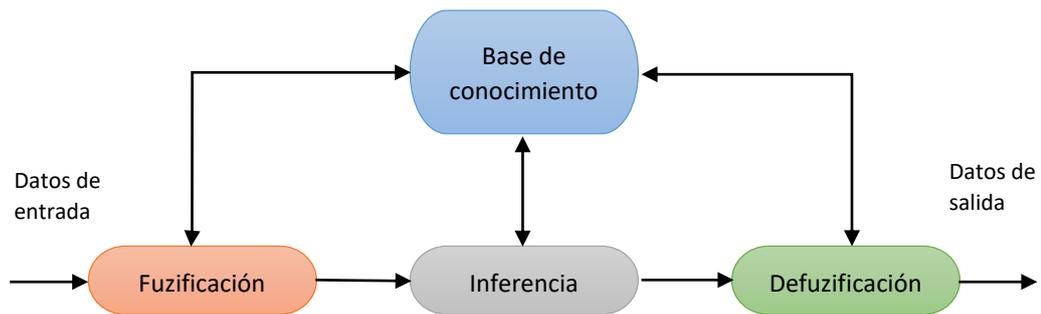


figura 11. Diagrama para desarrollo de un control difuso

Fuzificación

El proceso de Fuzificación es la primera etapa dentro de un diseño de control difuso, en el cual los datos de entrada (variables medidas) son transformados a un valor de cantidad difusa, asignándole un grado de membresía.

Base del conocimiento

La base del conocimiento o reglas lingüísticas es una de las partes fundamentales del control difuso ya que en esta se representa la parte central del controlador la misma que contiene toda la información del proceso que se requiere controlar. Está conformada por dos partes: La base de datos y la base de reglas. La base de datos quien contiene las definiciones de los conjuntos difusos para el establecimiento de reglas y manipulación de datos del proceso a controlar. La base de reglas quien contiene un conjunto de normas lingüísticas y que a su vez está compuesta por una serie de reglas las mismas que son empleadas por el experto para llevar a cabo el control requerido.

Inferencias

La inferencia es el proceso en el cual se generan nuevas reglas con el uso de proposiciones como (if-else) los cuales dan un modelamiento del proceso a resolver.

Defuzificación

En la última etapa del control difuso se encuentra la defuzificación, la cual consiste en convertir los datos difusos generados en la inferencia en datos reales para posteriormente implementarlo en el sistema o proceso como tal.

Para la defuzificación se emplean métodos matemáticos como son, método del centroide, método de membresía, método del promedio ponderado.

2.2.5 SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Matlab

Matlab es un software desarrollado para el análisis y cálculo matemático basado en un lenguaje de programación de alto nivel en el cual se encuentra un entorno interactivo el mismo que permite realizar una serie de operaciones complejas de manera más rápida en comparación a otros lenguajes de programación como lo es C, C++, java.

Matlab brinda un entorno interactivo para el desarrollo de algoritmos análisis de datos y calculo numérico. Además, dispone de un paquete adicional como es Simulink, usado para realizar simulaciones graficas de múltiples dominios, el mismo que será útil en el desarrollo del proyecto propuesto.

Simulink

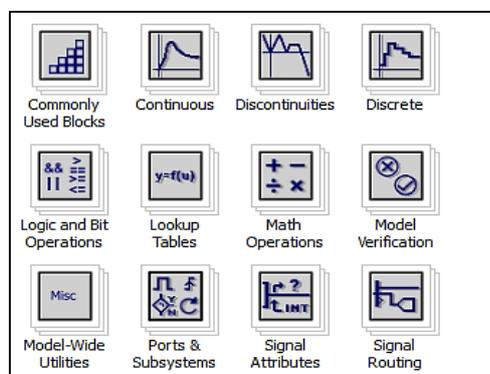


figura 12. Librerías de Simulink

Simulink es un paquete adicional de Matlab, el cual nos brinda un entorno de programación visual para el análisis y modelado de sistemas dinámicos mediante diagramas de bloques.

Bloques no lineales

En las siguientes figuras se muestran los menús de las librerías que suministran conjuntos de bloques operacionales.

Bloques continuos

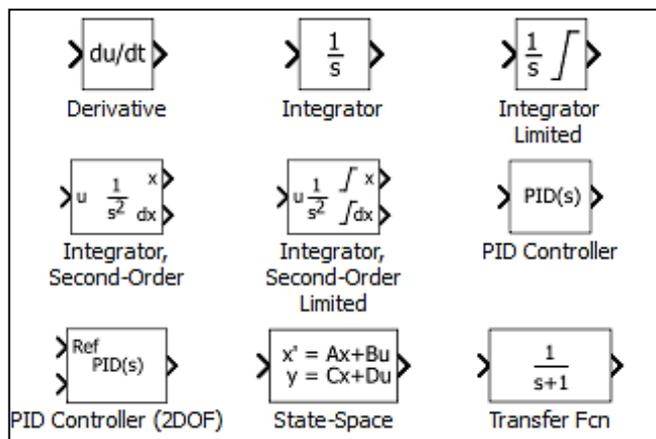


figura 13. Bloques de sistemas continuos

Bloques de fuentes

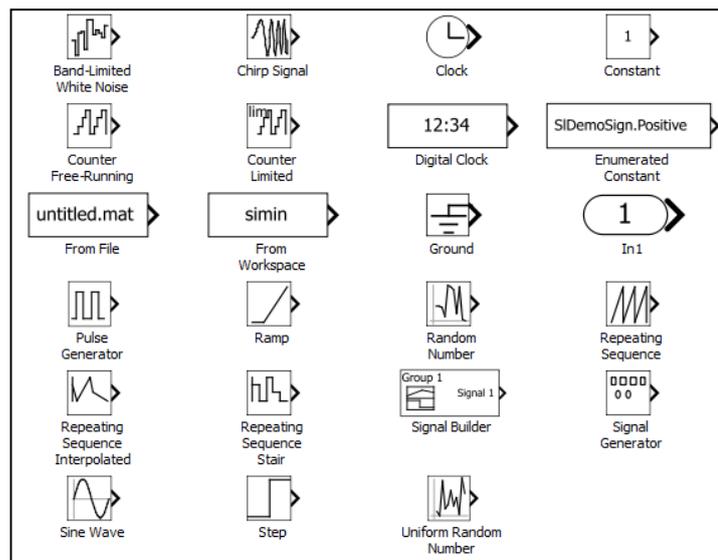


figura 14. Bloques de señales

Bloques de salidas

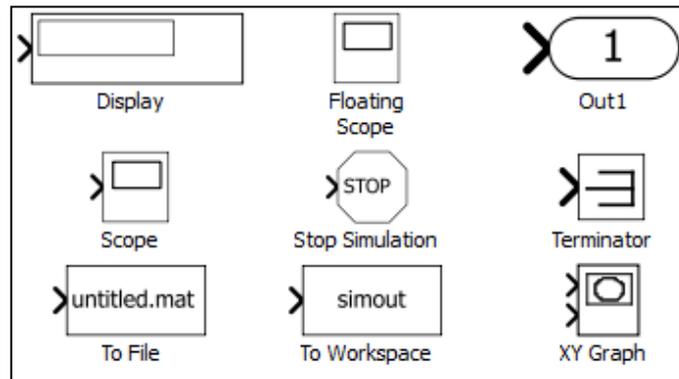


figura 15. Bloques de salidas

2.3 MARCO TEÓRICO

En el marco teórico se especifican diversos artículos asimilados por el autor en relación a la elaboración del proyecto.

MIKEL FERNÁNDEZ DE CASTILLO (2018), manifiesta que las nuevas soluciones de automatización de las cámaras frigoríficas simplifican la puesta en marcha y a su vez aceleran el rendimiento de la inversión. Muestra que las automatizaciones de las cámaras frigoríficas presentan ventajas como la protección de la mano de obra, presentar mayor eficiencia en el funcionamiento, disponer de mayor seguridad alimentaria y, además, la reducción del consumo de energía que a su vez reduce costos del sistema.

Para **ANDRÉS ARAMBURÚ y PARDO FIGUEROA (2017)**, las acciones de un controlador PID diseñado para compresores reducen significativamente los consumos eléctricos y a su vez la reducción de costos del sistema, con lo cual se consigue mantener los requerimientos del sistema trabajando a cierto porcentaje en la velocidad de giro de los compresores, así como también del flujo de aire aportado por los ventiladores. Sugiere que para el control de velocidad de giro de los compresores es preferible utilizar un control PI, ya que la acción del control D produce varios cambios de consigna, alterando demasiado la variable de control.

Según **ELSY VILLARMAR GARCÉS (2014)**, la implementación de un control de lógica difusa y un controlador discreto en espacio de estados generan un ahorro considerable dentro de un sistema de refrigeración con compresión en paralelo en relación a su funcionamiento inicial, sin aplicación de controles, sin embargo, cabe resaltar que existen diferencias durante el diseño e implementación de ambos controladores, ya que uno de ellos destaca más que el otro en los aspectos como el tiempo de estabilidad y el ahorro de consumo energético, brindando así un sistema más óptimo.

CAPÍTULO III

DESARROLLO

3.1 COMPONENTES DE LA PROPUESTA

3.1.1 COMPONENTES FÍSICOS

Para el desarrollo de la propuesta de investigación es importante conocer las características y funcionalidades de los elementos físicos empleados, que intervienen en la implementación del proyecto.

3.1.1.1 PLC SIEMENS 1200 AC/DC

El equipo que se escogió para el desarrollo de la propuesta fue de la marca siemens, ya que nos brinda puertos digitales y analógicos los cuales son requeridos para la implementación del sistema, además de brindar la facilidad de conectar módulos expansores de ser necesarios.



figura 16. Partes externas del PLC Siemens S7-1200

Las especificaciones técnicas del PLC modelo 1212C se muestran en la siguiente tabla.

Función	CPU 1212C
Dimensiones físicas (mm)	90 x 100 x 75
Memoria de usuario <ul style="list-style-type: none"> • Memoria de trabajo • Memoria de carga • Memoria remanente 	<ul style="list-style-type: none"> • 25 KB • 1MB • 2 KB
E/S integradas locales <ul style="list-style-type: none"> • Digitales • Analógicas 	<ul style="list-style-type: none"> • 8 Entradas / 6 Salidas • 2 Entradas

Tabla 1. Características del PLC S7-1200 AC/DC

3.1.1.2 MÓDULO DE COMUNICACIÓN CM 1241 RS422/485

El PLC Simatics S7-1200 nos permite una comunicación punto a punto con la ampliación de la CPU, usando un módulo RS422/485.

El módulo de comunicación puede ser definida en modo maestro o esclavo y para lograr esto es necesario usar la librería Modbus la cual se encuentra en el Step 7 de Tia Portal.



figura 17. Módulo de Comunicación CM 1241 RS422/485

A continuación, se presentan las características generales del módulo de comunicación RS422/485.

Tensión de alimentación	
Valor nominal (DC)	24 V
Rango admisible, límite inferior (DC)	20.4 V
Rango admisible, límite superior (DC)	28.8 V
Intensidad de entrada	
Consumo máximo	220 mA
Longitud del cable, máximo	1000 m

Tabla 2. Características del módulo de comunicación

3.1.1.3 INTERFAZ HOMBRE – MÁQUINA HMI DELTA DOP – B03E211

El dispositivo HMI permite llevar un control sobre el sistema, monitoreando lo que está sucediendo en el proceso en tiempo real.

Entre las características generales encontradas en el equipo tenemos:

- TFT LCD de 4.3 pulgadas (480 x 272 píxeles) 65536 colores.
- 2 juegos de puertos COM, soporta RS-232 / RS-422 / RS-485.
- Para transferencia / descarga de datos: RS-232, USB, Ethernet.
- Soporta Ethernet.
- Cumple con la norma IP65.
- Soporta visualización horizontal / vertical.
- El software de edición para PC, DOPSoft es compatible con los SO: Windows XP, Windows Vista, Windows 7.



figura 18. Interfaz Hombre - Máquina HMI DELTA

3.1.1.4 SENSOR DE TEMPERATURA NTC

Este elemento de medición fue elegido debido a su resistencia en ambientes de baja temperatura ya que esta sellada por una cubierta plástica, además por su precisión en la medida de la temperatura en ambientes húmedos.

Entre sus características encontramos lo siguiente:

- Voltaje de 3 a 5.5V.
- Resistencia al agua.
- Rango de medición de temperatura entre -55°C a 125°C
- 0.5°C de precisión desde -10°C a 85°C



figura 19. Sensor de Temperatura NTC full gauge Sb41

3.1.1.5 CONTROLADOR FULL GAUGE VX - 950 PLUS

El controlador VX – 950 plus es un instrumento digital para control de la válvula de expansión electrónica, además de brindar control de sobrecalentamiento, presión, deshielo y temperatura ambiente. Es un instrumento dirigido especialmente para el control procesos de refrigeración.



figura 20. Controlador Full Gauge VX - 950 plus

Alimentación	± 12 VDC – 1.3 mA
Temperatura de Control	-50 a 60°C / -58 a 140°F
Temperatura de Operación	0 a 50°C / 32 a 122°F
Presión de Control	0 a 500 PSI / 0 a 34.4 bar
Sensores	S1: Sensor Ambiente. S2: Sensor del Evaporador. S3: Sensor de Temperatura. P1: Sensor de Presión.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del controlador VX – 950 plus



figura 21. Presentación del Panel VX - 950 plus

3.1.1.6 INTERFAZ HOMBRE – MÁQUINA VX-950 HMI/01

La interfaz VX-950 HMI/01 trabaja en conjunto con su controlador VX-950 plus, figura 22, permite monitorear digitalmente hasta 32 controles y visualizar medias de temperatura, presión, además de parametrización de funciones y comandos para deshielo manual.



figura 22. Interfaz VX-950 HMI/01

Alimentación	115 o 230 VAC ±10% (50/60Hz)
Temperatura de control	0 a 50°C / 32 a 122°F
Dimensiones	76 x 34 x 77mm

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la interfaz VX-950 HMI/01

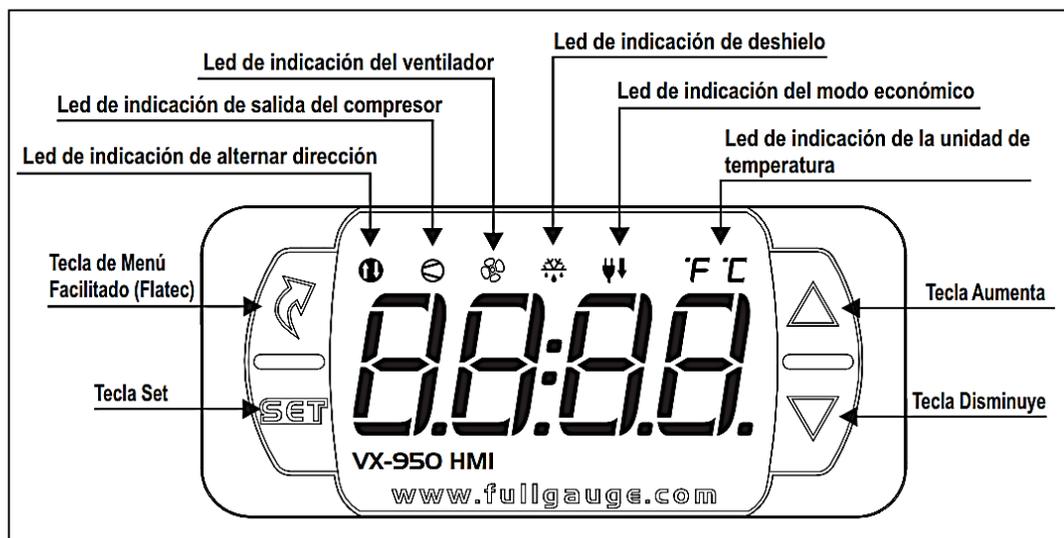


figura 23. Indicadores y teclas de la interfaz VX-950 HMI/01, recuperada del Datasheet

3.1.1.7 FUENTE DE ALIMENTACIÓN MEAN WELL RS 15-12

Este dispositivo de alimentación de la marca Mean Well se encarga de convertir la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC) para suministrar de energía a los distintos dispositivos electrónicos que se deseen conectar.

El dispositivo MW RS 15-12 cumple con las siguientes características:

- Entrada universal de CA / rango completo.
- Protección: corto circuitos / sobrecarga / sobre voltaje / sobre temperatura.
- Enfriamiento por convención de aire libre.
- Led indicador de encendido.
- Sin consumo de carga < 0.5W
- Soporta 300 VAC de sobretensión de entrada durante 5 segundos.
- Alta temperatura de funcionamiento hasta 70°C.
- Alta eficiencia, larga vida y alta confiabilidad.



figura 24. Fuente de alimentación MW RS 15-12

INPUT	
Voltaje	85 a 264 VAC // 120 a 370 VDC
Rango de Frecuencia	47 a 63 Hz
Corriente AC	0.35A / 115VAC // 0.25A / 230VAC
Fuga de corriente	<2mA / 240VAC
OUTPUT	
Voltaje	12V
Rango de corriente	0 a 1.3A
Potencia	15.6W

Tabla 5. Especificaciones Técnicas de la fuente MW RS 15-12

3.1.1.8 CONV32 USB RS485

Es un dispositivo de la marca Full Gauge utilizado para la conexión con los instrumentos de control de la serie plus, figura 25. Su función es posibilitar la comunicación del controlador con la PC mediante la conversión de la señal estándar RS-485 de los controladores a la señal estándar RS-232 del pc y esta conexión se la realiza mediante puerto USB.



figura 25. Dispositivo CONV32 USB RS-485

Alimentación	A través del puerto USB
Temperatura	0 a 50°C
Led´s de indicación	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Para señalar que la interfaz está conectada. ➤ Transmisión TX. ➤ Recepción RX.

Tabla 6. Especificaciones técnicas del dispositivo CONV32 RS-485

3.1.2 COMPONENTES LÓGICOS

3.1.2.1 TÍA PORTAL V14

El Tía Portal es un innovador sistema desarrollado para la ingeniería el cual permite configurar de forma instintiva y eficiente los procesos de producción y planificación. Convence gracias a su alta funcionalidad y por ofrecer un entorno de ingeniería dentro del cual se pueden realizar tareas de control, visualización y accionamiento.

El software de Tía Portal brinda las siguientes ventajas:

- Team Engineering. Varias personas pueden trabajar simultáneamente sobre una misma tarea.

- Búsqueda automática de actualización de software.
- Consistente desarrollo de lenguajes de programación (LAD, FBD, STL, SCL y Graph).
- Carga de la configuración hardware y el programa de usuario incluyendo valores para servicios.
- PLCSim para S7-300 / S7-400 y ahora S7-1500



figura 26. Software Tía Portal V14

3.1.2.2 DOPSOFT V2

DOPSoft es un software de programación para pantallas HMI perteneciente a la empresa Delta, este brinda una interfaz hombre-máquina amigable en el cual se realizan diseños para el control y monitoreo de los procesos de enfriamiento.

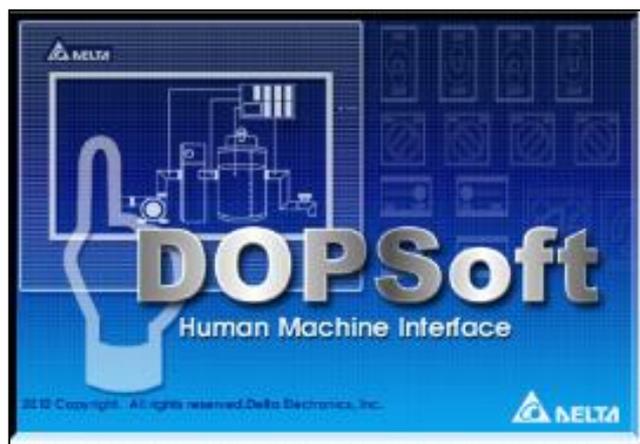


figura 27. Software DOPSoft V12

3.1.2.3 SITRAD LOCAL 4.13

El Sitrad es el software de la empresa Full Gauge Controls para administrar sistemas de refrigeración a distancia. Este evalúa, configura y almacena constantemente los datos como la temperatura, presión y tiempo, además de permitir la configuración de los parámetros de operación antes mencionados según requiera el operario con total precisión y seguridad.



figura 28. Software Sitrad 4.13.2.2

3.1.2.4 MATLAB

Es un software de programación en el cual nos apoyaremos para realizar la identificación del sistema de la planta prototipo encontrando su función de transferencia y conocer su comportamiento. Además, gracias a su complemento Simulink es útil para realizar la simulación del sistema de control difuso a implementar sobre la cámara frigorífica de la planta prototipo.

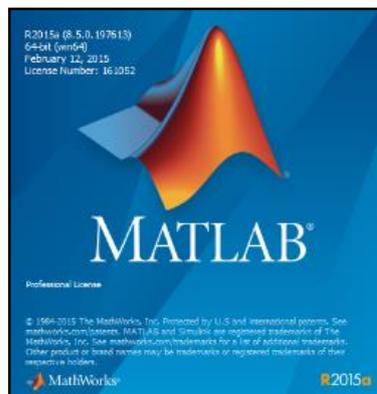


figura 29. Software Matlab

3.1.2.5 CADE SIMU V3

Cade simu es un programa desarrollado específicamente para la elaboración de esquemas eléctricos de forma rápida y sencilla. Además, permite realizar la simulación del circuito una vez terminado, comprobando el correcto funcionamiento del circuito y de cada dispositivo utilizado.



figura 30. Software Cade_Simu V3.0

3.2 DISEÑO DE LA PROPUESTA

3.2.1 DISEÑO FÍSICO DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN

Mediante un diagrama de bloque se expresa el modo de operación del sistema de automatización a implementar, dentro del cual se comprenden varios aspectos como: alimentación, potencia y el control de los elementos con el controlador principal (PLC).

En la siguiente figura se observa el diagrama de bloque con el sistema de control a implementar.

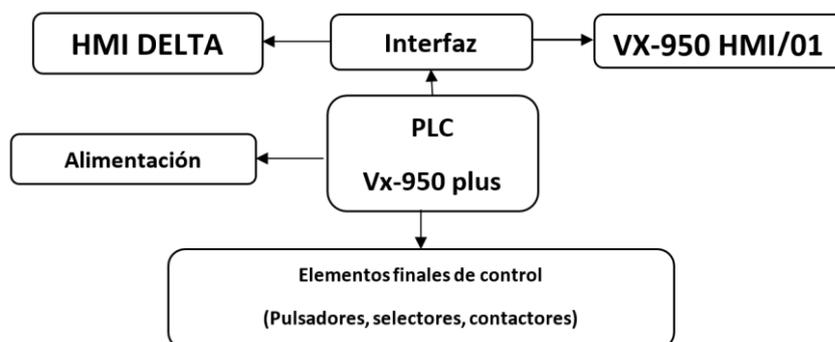


figura 31. Diseño físico del sistema de automatización

3.2.2 DIAGRAMAS DEL SISTEMA

3.2.2.1 DIAGRAMA DEL TABLERO ELÉCTRICO

El diagrama mostrado en la figura 32 define los elementos y conexiones a realizar para la implementación del sistema eléctrico dentro del tablero. A continuación, se detallan los dispositivos utilizados para el desarrollo.

Disyuntor: Este elemento como principal, tiene como función alimentar eléctricamente a todo el sistema implementado, permitiendo el paso de corriente una vez que es accionado, a su vez permite cortar el paso de energía si la intensidad supera los 30A desactivando el funcionamiento de la planta prototipo.

Portafusibles: Actúan como elementos de protección en caso de cortocircuitos, desconectando el paso de la corriente al sistema.

Contactores: Este elemento permite accionar o desactivar el paso de corriente a los compresores una vez que la bobina es energizada, ya que esta es controlada por el sistema ya programado en el dispositivo de control PLC.

Relé térmico: Este dispositivo es usado como medida de seguridad hacia los compresores en caso de sobrecargas o desfases de energía. Esta parte del procedimiento tiene como función alimentar a toda la planta prototipo, incluyendo el sistema de control a implementar, asegurando el correcto funcionamiento de cada equipo como también la protección de cada uno.

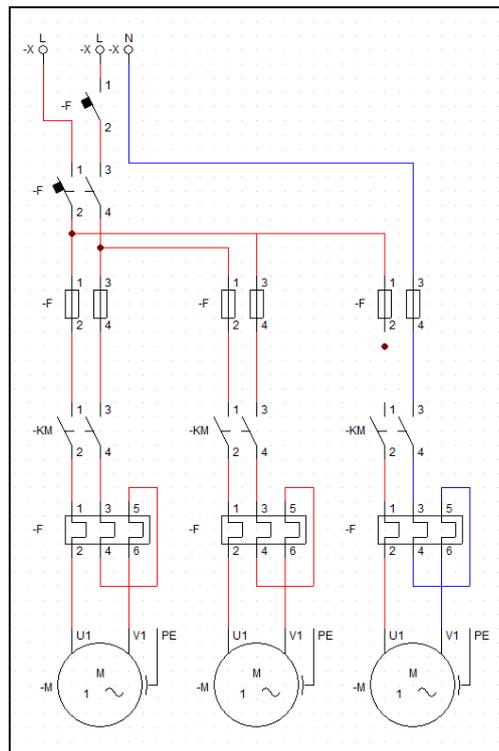


figura 32. Diagrama del sistema eléctrico

En la figura 33 se muestra la implementación física del sistema eléctrico dentro del tablero con los dispositivos antes mencionados.

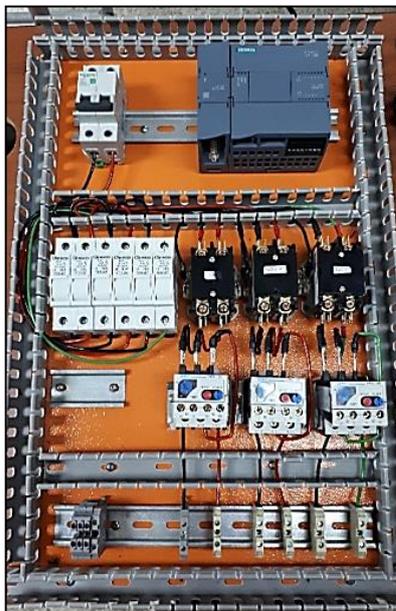


figura 33. Implementación del tablero Eléctrico

3.2.2.2 DIAGRAMA DE CONTROL

Para la parte de control, se utilizó un controlador lógico programable (PLC) y un controlador Full Gauge VX-950 plus, en donde se realizó el respectivo análisis y programación del sensor de temperatura, presión y abertura de la válvula de expansión implementado en la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración, además se realizó la comunicación con la interfaz Hombre – máquina (HMI DELTA) para el respectivo monitoreo del sistema mediante comunicación Ethernet y el HMI digital VX-950 mediante puerto USB para configuración de parámetros y funciones del controlador de Full Gauge.

Las figuras expuestas a continuación muestran los diagramas de conexiones realizados para ambos controladores

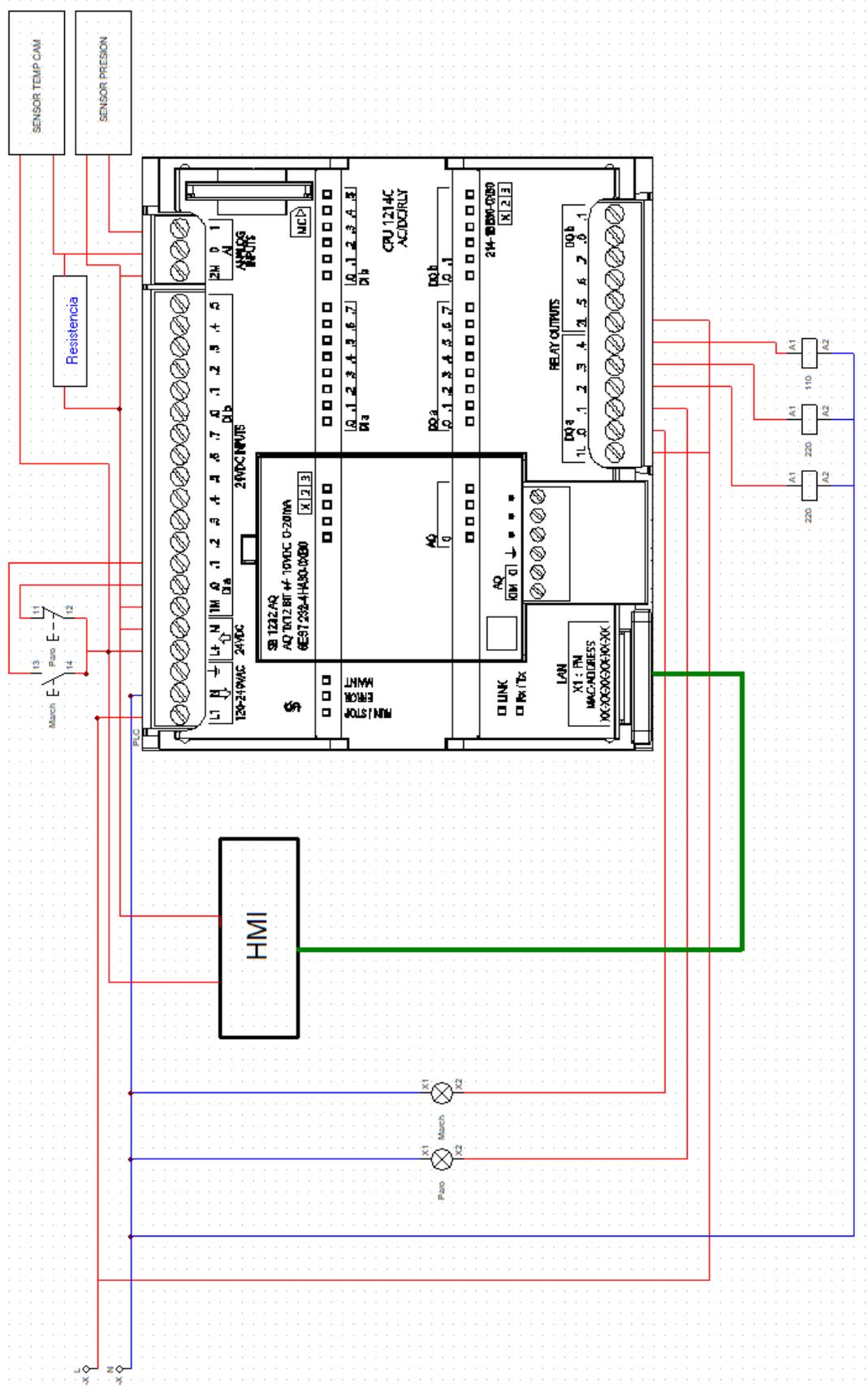


figura 34. Conexiones del controlador PLC

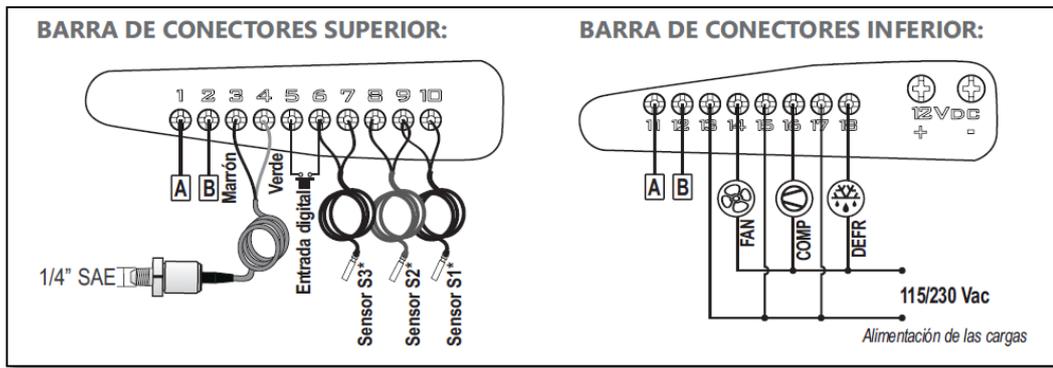


figura 35. Conexiones barra Superior e Inferior del controlador VX-950 plus, recuperada del datasheet

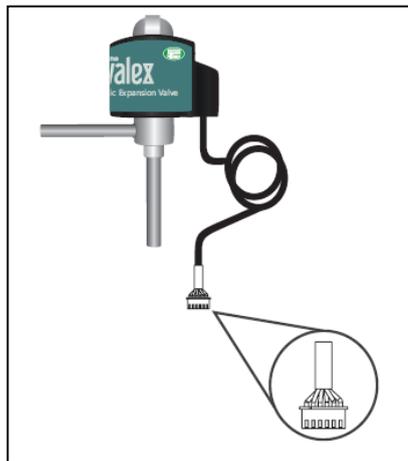


figura 36. Ranura dedicada para conexión de la válvula de expansión, recuperada del datasheet

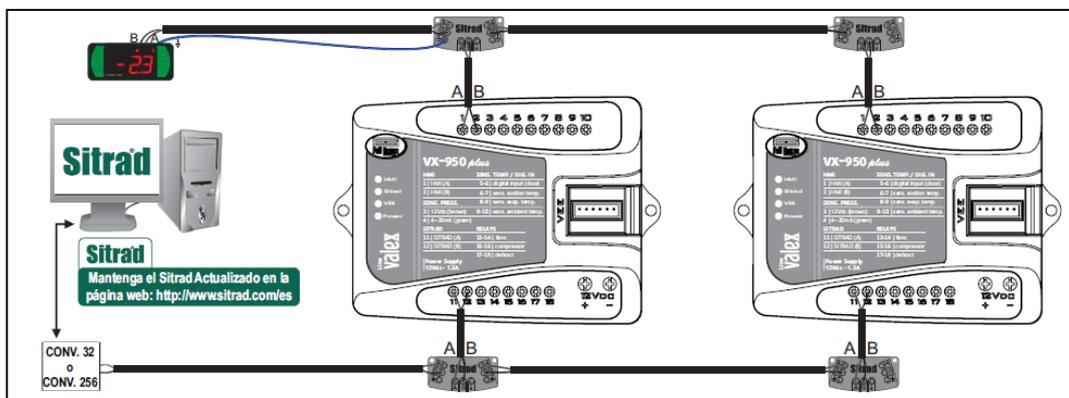


figura 37. Conexión para comunicación con HMI VX-950 y Software Sitrad simultáneamente, recuperada del datasheet

En la figura 38 y 39 se muestra la implementación física de los sistemas de control con PLC y VX-950 plus, además de los sistemas de monitoreo para ambos controladores.



figura 38. Sistema de control con PLC y VX-950 plus



figura 39. Sistema de monitoreo con HMI Delta y HMI VX-950

3.2.2.3 DIAGRAMA TOPOLÓGICO

La figura 40 muestra el diagrama topológico del sistema implementado, en el que se describe el tipo de comunicación entre la interfaz hombre – máquina HMI, PC y PLC, además, la entrada de la señal proveniente del sensor de temperatura y así

mismo la salida, que será el encendido y apagado de los compresores permitiendo el paso del refrigerante controlado por la válvula de expansión.

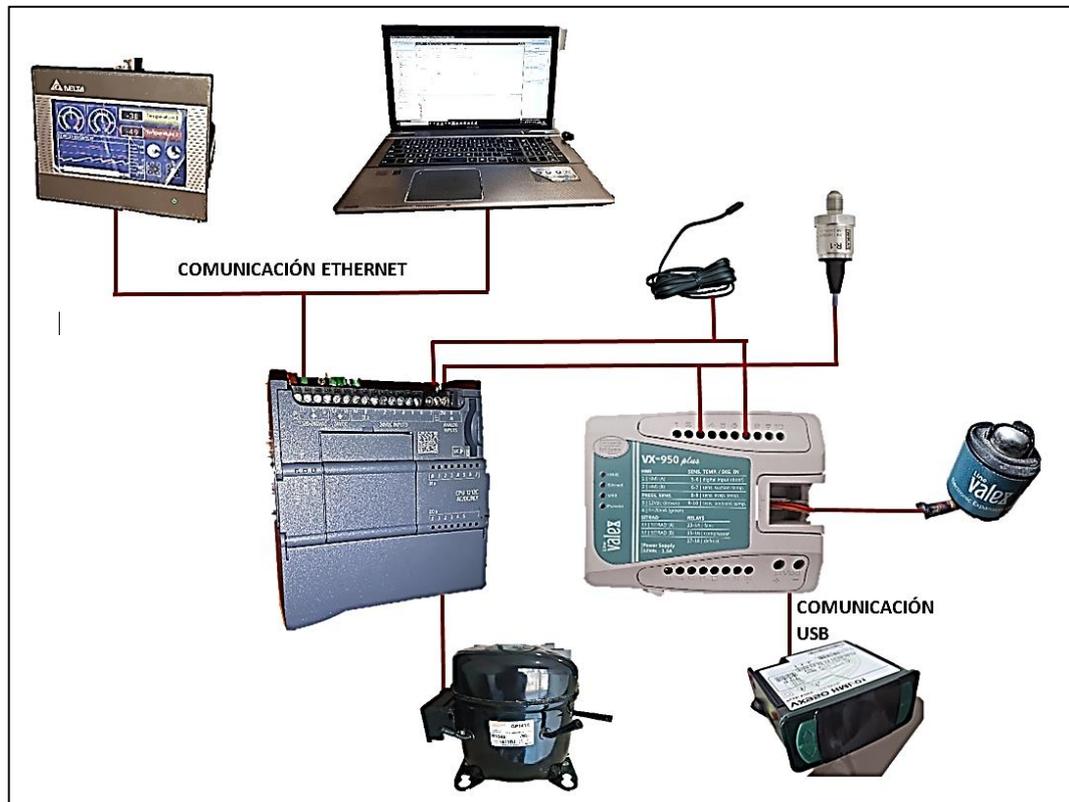


figura 40. Diagrama Topológico del sistema implementado

3.2.3 DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

3.2.3.1 IDENTIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA CÁMARA FRIGORÍFICA DEL PROTOTIPO DE REFRIGERACIÓN.

Para el diseño del controlador, en primer lugar, se obtiene la función de transferencia (TF) de la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración. Con ayuda del controlador VX-950 plus se hace la adquisición de los datos en tiempo real a través del software Sitrad, figura 41, luego se crea una base de datos, Anexo 3, los mismos que son importados desde el software Matlab en donde se realiza el análisis para la obtención de la función de transferencia en respuesta a la planta

prototipo y así establecer el control más adecuado para la optimización del sistema en la cámara de refrigeración.

The screenshot shows a software window titled 'Generador de Informes'. It has a menu bar with 'Archivo', 'Herramientas', 'Ventanas', and 'Ayuda'. Below the menu is a toolbar with icons for file operations. The main area is divided into two panes. The left pane, titled 'Banco de Datos', shows a tree view with 'Sitrad (padrón)' and 'Instrumentos'. The right pane displays a table with the following data:

Instrumento	Muestras	De	Hasta
Camara	220	14/11/2018 22:12:30	15/11/2018 22:19:50
vitrina	410	14/11/2018 20:20:39	15/11/2018 22:19:45

At the bottom of the window, it indicates 'Tamaño del banco de datos: 192 KB'.

figura 41. Adquisición de datos mediante el software Sitrad

Para la adquisición de la función de transferencia se toma como entrada al sistema la variable de abertura de la válvula de expansión y como variable de salida la temperatura, figura 42.

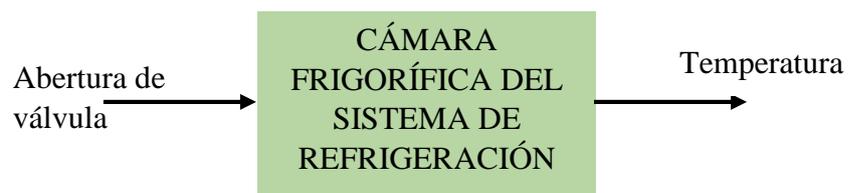


figura 42. Diagrama de entrada y salida del sistema

La figura 43. muestra el proceso de identificación y adquisición de la función de transferencia en respuesta a la planta prototipo mediante el software de Matlab.

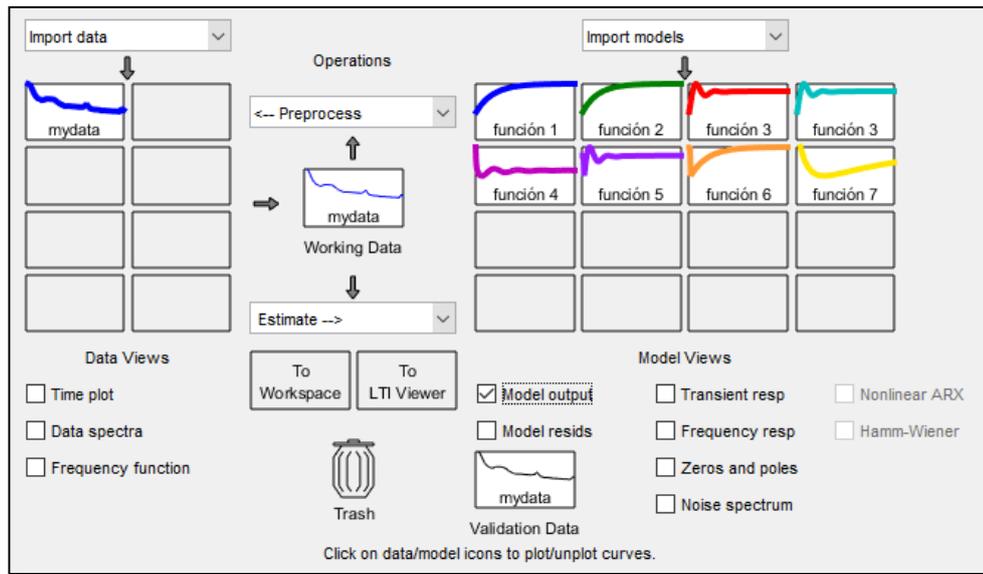


figura 43. Pruebas de Funciones de transferencia de la cámara frigorífica

Una vez realizada las pruebas con diversas funciones de transferencias agregando polos y zeros, se denotó la señal con mejor respuesta ante cámara de refrigeración de la planta prototipo, figura 44, la misma que se utilizará para el desarrollo del controlador PID y lógica difusa.

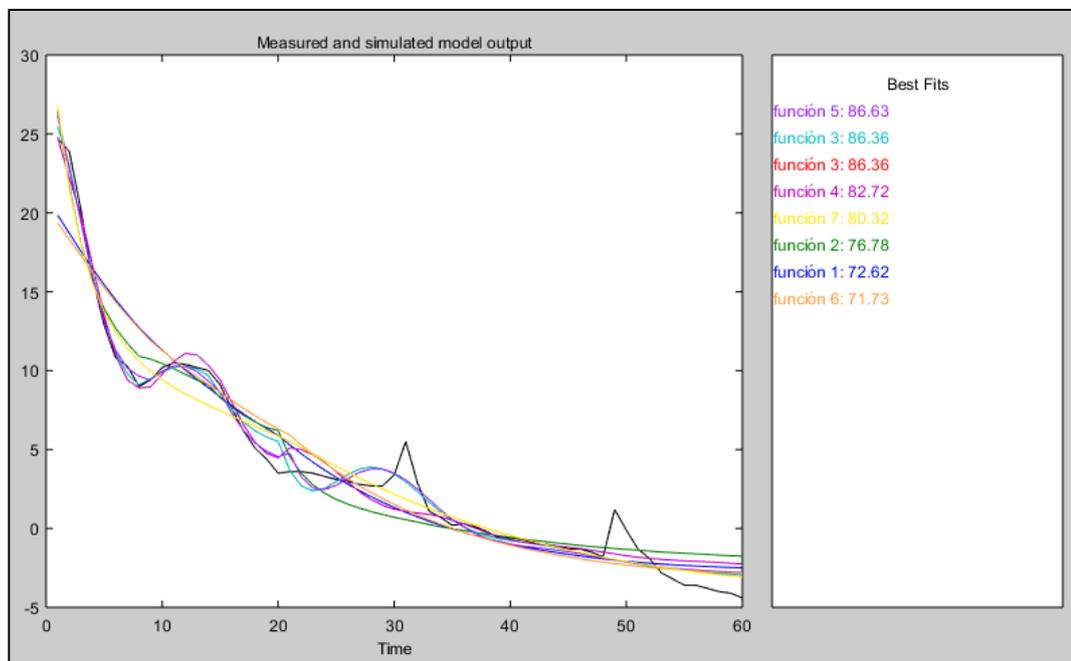


figura 44. Señales en respuesta a la cámara frigorífica

La siguiente tabla muestra los valores de los diferentes modelos de funciones de transferencias evaluadas en respuesta a la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración, se realizarán varias muestras de forma continua, discreta, en espacio de estado o agregando polos y zeros, luego se escogerá la señal que mejor responda, la misma que se usará para el diseño del controlador PID.

Modelo	Estimación	Tipo	Contenido	Aproximación
Función 1	Transfer Functions Models	Continuous	2 polos 1 zero	72.62%
Función 2	Transfer Functions Models	Continuous	2 polos 2 zeros	76.78 %
Función 3	Transfer Functions Models	Continuous	3 polos 2 zeros	86.36 %
Función 4	State Space Models	State Space	Orden 4	88.04 %
Función 5	Transfer Functions Models	Continuous	3 polos 3 zeros 1 retardo	86.63 %
Función 6	Transfer Functions Models	Continuous	2 polos 1 zero 1 retardo	71.73 %
Función 7	Transfer Functions Models	Discreto	2 polos 1 zero	80.32%

Tabla 7. Modelos de funciones de transferencia obtenidas para la cámara frigorífica

Se escogió la función de transferencia “función 1”, tabla 7, gracias a que es la señal que mejor responde ante la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración

por no presentar niveles de perturbación. Finalmente, será la función de transferencia que se utilizará para la implementación del controlador PID.

La figura 45 muestra la función de transferencia escogida en la tabla 7, la misma con la que se trabajará para el diseño del controlador.

```
>> tf1

tf1 =

From input "u1" to output "y1":
  -0.002739 s + 1.324e-05
  -----
  s^2 + 0.05942 s + 1.157e-08
```

figura 45. Función de transferencia de la cámara frigorífica

3.2.4 CONTROL PID PARA LA CÁMARA FRIGORÍFICA

Para la obtención de los parámetros del controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID), se utilizará la herramienta PID Tuner de Matlab, aquí se importará los datos de la función de transferencia obtenida anteriormente en respuesta a la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración, figura 45, y automáticamente detallará los valores P, I, D para el controlador brindando la mejor respuesta en la señal de salida con un tiempo de estabilidad mínima, tomando en cuenta que la variable de entrada al sistema es la abertura de la válvula de expansión y como variable de salida la temperatura del evaporador, figura 46.



figura 46. Variable de entrada y salida del sistema de control.

Una vez realizado el proceso de auto-tuning, los valores adquiridos para los parámetros proporcional, integral y derivativo son los que se detallan en la tabla a continuación.

Proporcional (KP)	13.0912
Integral (KI)	0
Derivativo (KD)	34.4156

Tabla 8. Valores de los parámetros P, I, D para el control de la cámara frigorífica.

3.2.5 DISEÑO DE CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA

3.2.5.1 PARÁMETROS Y VARIABLES

Para realizar el diseño de un control, es necesario definir parámetros y variables a utilizar dentro del sistema, y para ello se necesita conocer cómo están compuestos para luego poder detallar los parámetros.

El controlador de lógica difusa consta de cuatro parámetros como son: las funciones de membresía, las reglas de inferencia el rango de variables y las ganancias.

3.2.5.2 EL CONTROLADOR DIFUSO

Para el diseño del control de lógica difusa se tomará como entrada la temperatura y como salida la abertura de la válvula de expansión.

Los valores lingüísticos asignados a la variable de entrada y salida del sistema de control difuso fueron desarrollados de la siguiente manera:

Variable de entrada (temperatura)

- TMB: Temperatura muy baja.
- TB: Temperatura baja.
- TN: Temperatura normal.

- TA: Temperatura alta.
- TMA: Temperatura muy alta.

Variable de salida (abertura_válvula)

- TC: Totalmente cerrada.
- MC: Media cerrada.
- MA: Media abierta.
- A: Abierta.
- TA: Totalmente abierta.

A continuación, la tabla 9 muestra el rango de valores establecidos para cada función de membresía desarrollado en la variable de entrada al sistema(temperatura).

Función de Membresía	Nombre de la función	Rango establecido
TMA	Temperatura muy alta	$>20^{\circ}\text{C}$
TA	Temperatura alta	$15^{\circ}\text{C} < \text{TA} < 20^{\circ}\text{C}$
TN	Temperatura normal	$5^{\circ}\text{C} < \text{TN} < 15^{\circ}\text{C}$
TB	Temperatura baja	$-5^{\circ}\text{C} < \text{TB} < 5^{\circ}\text{C}$
TMB	Temperatura muy baja	$<0^{\circ}\text{C}$

Tabla 9. Funciones de membresía para variable de entrada "temperatura"

Por consiguiente, la tabla 10 muestra el valor de los rangos establecidos para cada función de membresía de la variable de salida (abertura_válvula).

Función de Membresía	Nombre de la función	Rango establecido
TC	Totalmente cerrada	$<17\%$
MC	Válvula media cerrada	$0\% < \text{MC} < 35\%$
MA	Válvula media abierta	$17\% < \text{MA} < 55\%$
A	Válvula Abierta	$35\% < \text{A} < 75\%$
TA	Totalmente abierta	$>60\%$

Tabla 10. Funciones de membresía para variable de salida "abertura_válvula"

Una vez desarrolladas las funciones de membresía con sus respectivos rangos de valores, se procede a realizar el análisis para la identificación de las reglas difusas, lo que permitirá realizar la acción de control sobre la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración, por lo cual se dedujo las reglas detalladas en la tabla 11.

Reglas para el sistema de control difuso	
1	Si (temperatura es TMB) entonces (abertura_válvula es TC)
2	Si (temperatura es TB) entonces (abertura_válvula es MC)
3	Si (temperatura es TN) entonces (abertura_válvula es MA)
4	Si (temperatura es TA) entonces (abertura_válvula es A)
5	Si (temperatura es TMA) entonces (abertura_válvula es TA)

Tabla 11. Reglas para el sistema de control difuso

Se realizará el diseño del control difuso con ayuda del software Matlab, dentro del cual se logrará establecer las funciones de membresías como también las reglas desarrolladas para el funcionamiento del control de temperatura sobre la cámara frigorífica de la planta prototipo de refrigeración.

Mediante la ejecución del comando **fuzzy** sobre la ventana Command Window de Matlab aparecerá la siguiente ventana como se muestra en la figura 47:

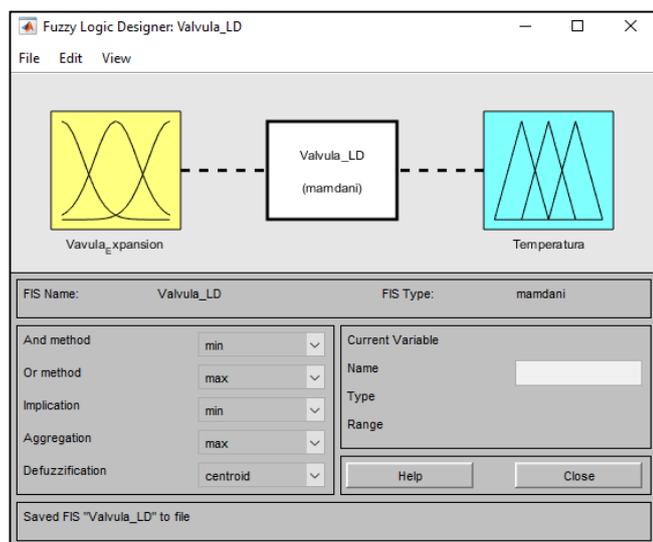


figura 47. Creación de sistema Fuzzy en Matlab

Una vez visualizada la ventana, se procederá a ingresar la variable de entrada y variable de salida según se requieran, esto se lo realizará en la pestaña **Edit**, en la opción **Add Variable** tal como se muestra en la figura 48.

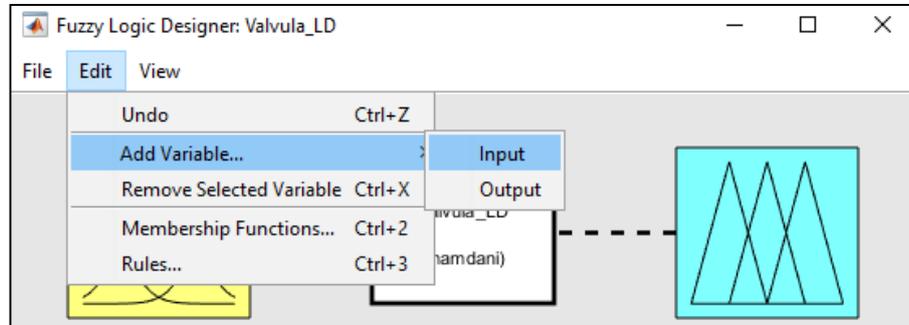


figura 48. Creación de variables Entrada, Salida

A cada variable se le estableció sus respectivas funciones de membresía, con los rangos y formas ya establecidas en la tabla 9 y 10. La figura 49 y 50 muestran la ejecución de las funciones de membresía para la variable de entrada y salida:

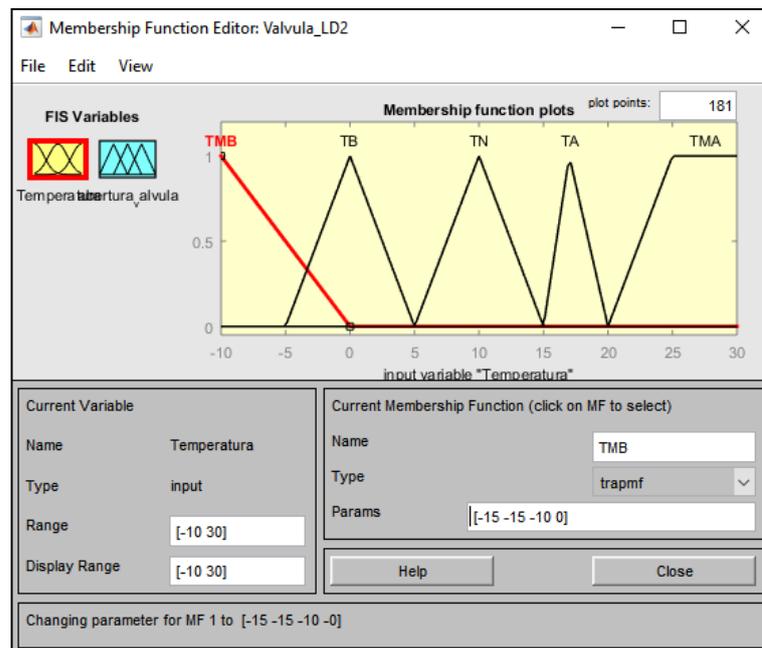


figura 49. Creación de funciones de membresía para la entrada temperatura

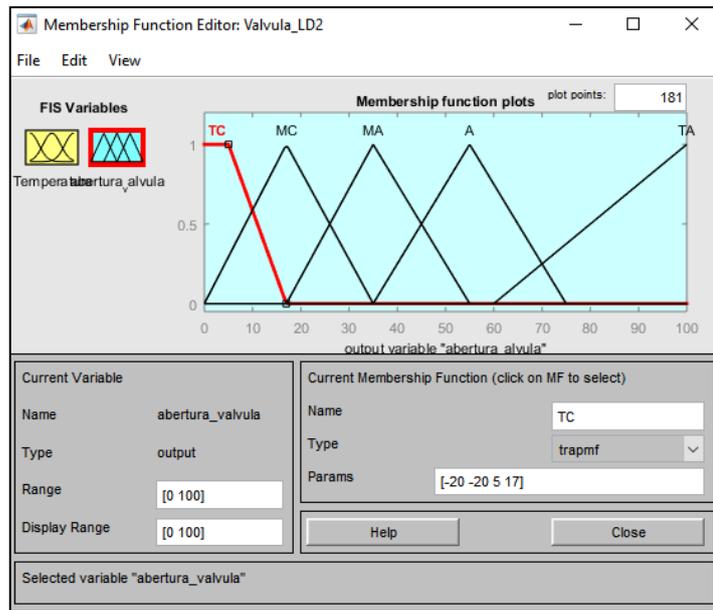


figura 50. Creación de funciones de membresía la para salida abertura_válvula

Para establecer las condiciones o reglas del sistema de control difuso, se utilizó los datos del análisis realizado en la tabla 11. Para implementar las reglas nos dirigimos a la pestaña **edit**, en la opción **rules**, en la figura a continuación se muestra la ejecución.

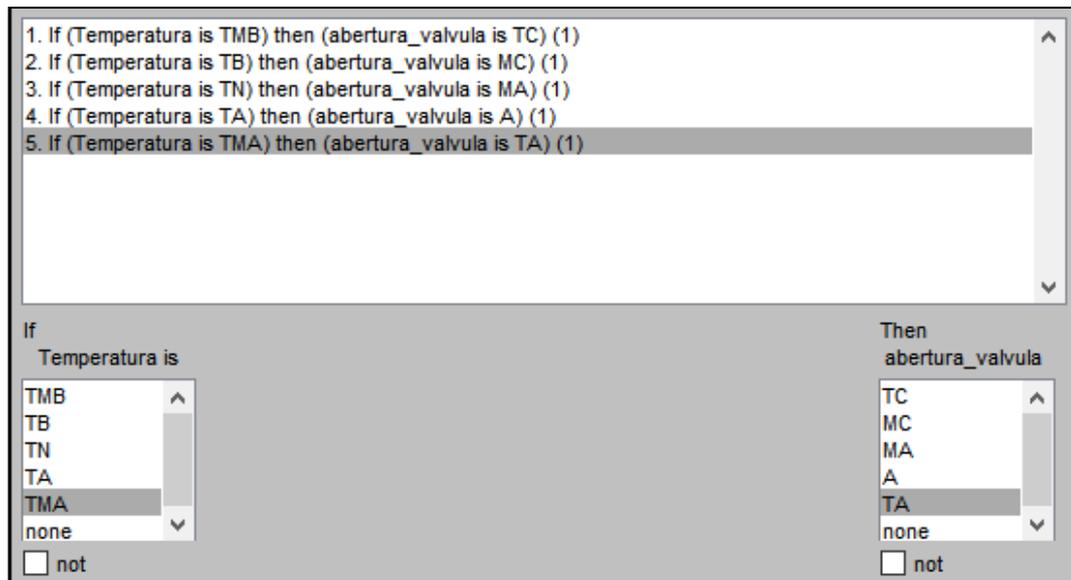


figura 51. Asignación de reglas al sistema

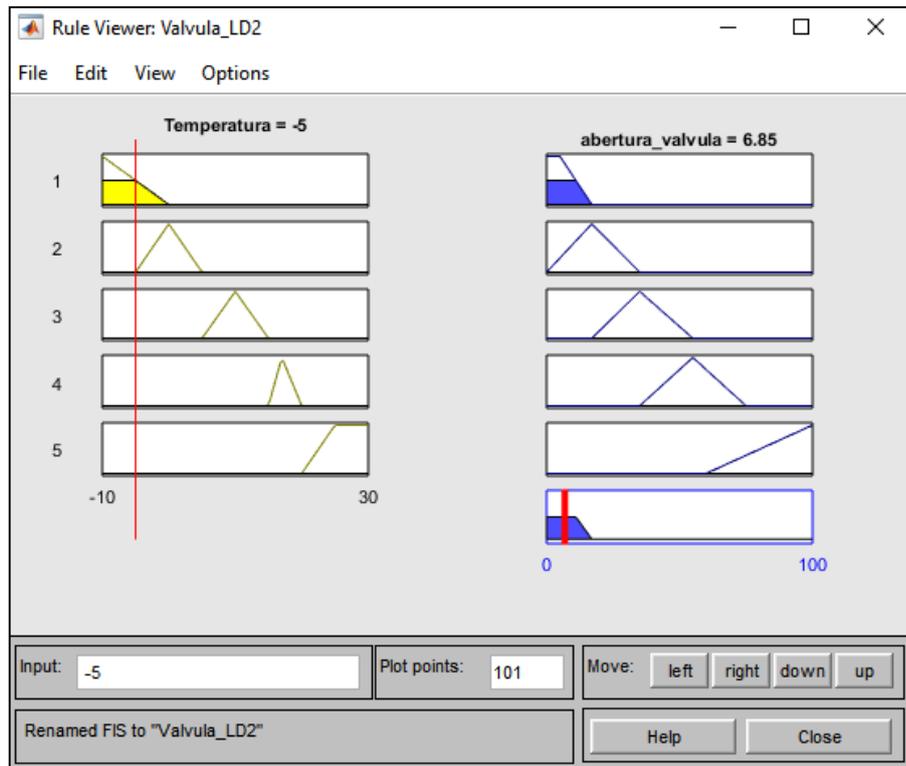


figura 52. Vista general de reglas implementadas

A continuación, en la figura 53 se muestra la curva de control difuso con respecto a la entrada Abertura_Válvula vs salida Temperatura.

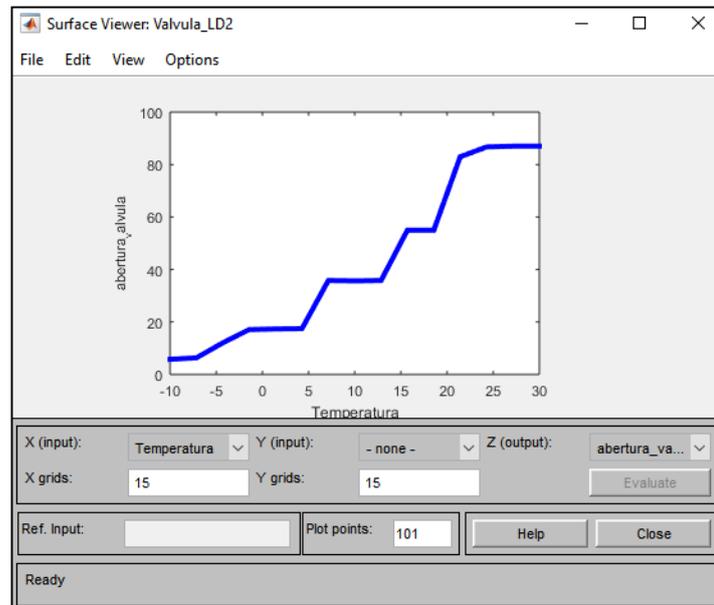


figura 53. Gráfica de la señal de Entrada: temperatura vs Salida: abertura_válvula

3.2.6 PROGRAMACIÓN DEL PLC S7 1200 AC/DC EN TÍA PORTAL PARA CONTROL DE COMPRESORES.

La programación del sistema de control para compresores se la realiza con ayuda del software Tía Portal V14, figura 26. Se procede a crear un nuevo proyecto y agregar un nuevo dispositivo, en este caso el **PLC S7 1200 AC/DC (6ES7 212-1BE40-0XB0)**, una vez hecho esto se procede a configurar el hardware PLC con la respectiva dirección de red y luego se realiza la creación de un nuevo bloque de datos en donde se procederá a realizar la respectiva programación del controlador.

A continuación, se muestran las figuras de cómo realizar dicha configuración.

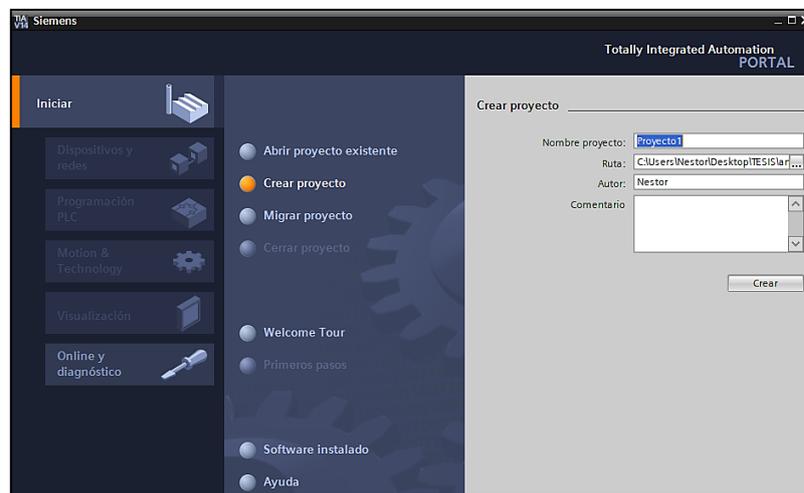


figura 54. Creación de nuevo proyecto en Tía Portal V14

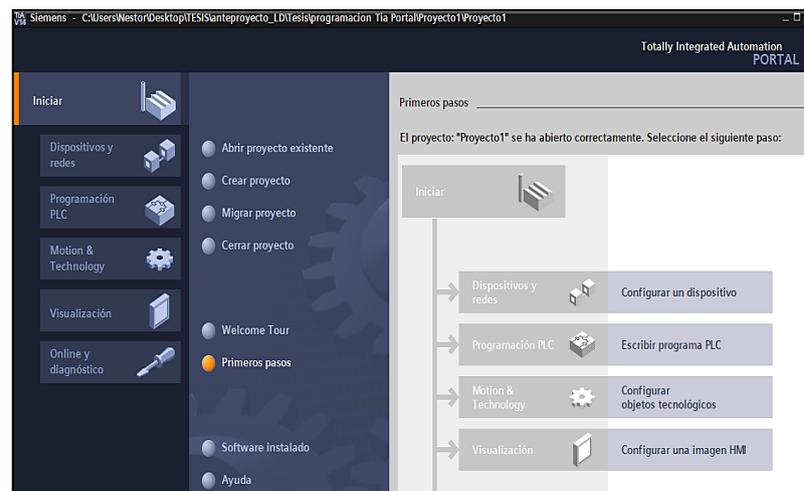


figura 55. Configuración de nuevo Dispositivo

Una vez realizada la correcta asignación del dispositivo PLC utilizado, se procede a configurar las direcciones de red de los dispositivos a vincular con el PLC, se debe tener en cuenta que todos los dispositivos deben estar conectados dentro de la misma red para que exista la comunicación entre sí, caso contrario no existirá el intercambio de datos entre dispositivos.

La siguiente tabla muestra las direcciones IP y máscara de subred asignadas a los dispositivos utilizados.

Dispositivo	Máscara de Subred	Dirección IP
PLC S7 1200 AC/DC	255.255.255.0	192.168.0.10
Interfaz HMI	255.255.255.0	192.168.0.20
Pc Portatil	255.255.255.0	192.168.0.30

Tabla 12. Asignación de IP a dispositivos

A continuación, en la figura 56 se muestran las variables asignadas para la inicialización del sistema de control, el cual consiste en accionar un pulsador de marcha para poner en funcionamiento el sistema, esta variable de encendido está asignada a la entrada %I0.0 del PLC, de la misma manera un pulsador de paro para detener el funcionamiento del sistema, esta variable fue asignada a la entrada %I0.1 del PLC.

A su vez se dispone de indicadores de paro y marcha los cuales muestran cuando el sistema está en funcionamiento y cuando no, para esto se le asignó las salidas %Q0.0 para el indicador de marcha y %Q0.1 para el indicador de paro.

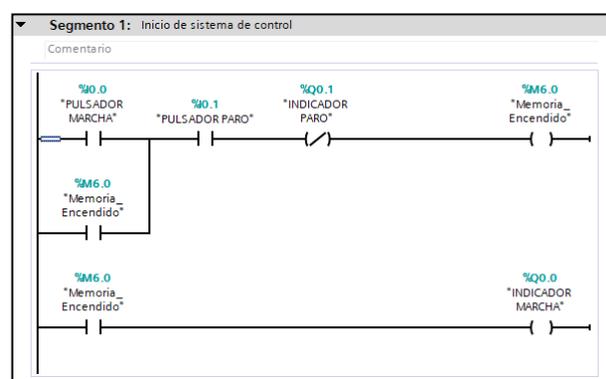


figura 56. Programación de paro y marcha del sistema

La figura 57 muestran la programación para la entrada analógica del PLC, en donde se proporciona la lectura del sensor de temperatura y sensor de presión al cual se le asigno la variable %IW64 para la temperatura y %IW66 para la presión, y mediante bloques realizar la normalización de los datos obteniendo valores en la salida entre 0 y 1, aquel valor es almacenado en la variable %MD20 para la temperatura y %MD30 para la presión, luego realizar la escala obteniendo valores entre 0 y 100 en el caso de la temperatura y 0 a 200 en caso de la presión, y así obtener el dato real que está ingresando de ambos sensores almacenándolos en la variable %MD24 y %MD34 .

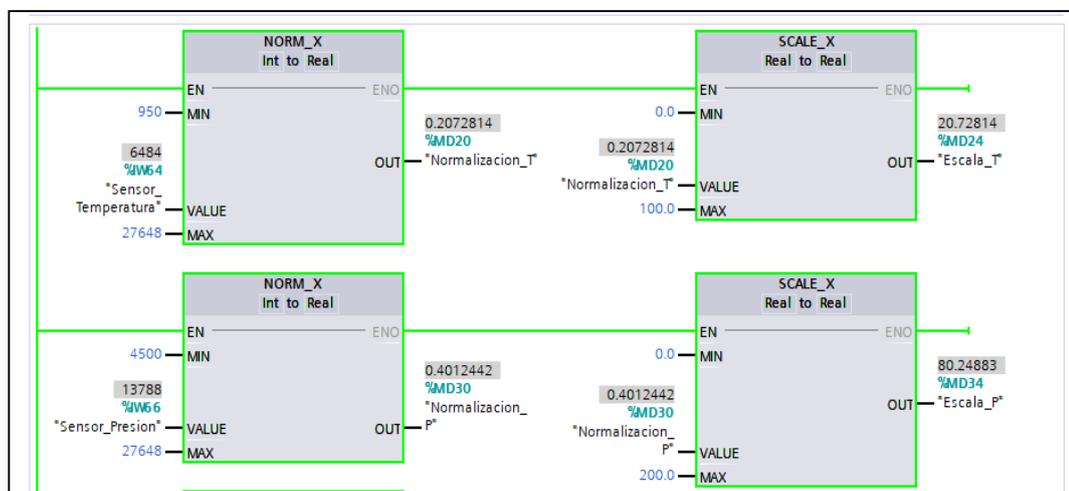


figura 57. Bloques para lectura del sensor de Temperatura y Presión

Una vez adquirido los datos de los sensores de temperatura y presión, se procede a insertar el bloque de control PID, figura 58, para establecer los valores de los parámetros proporcional, integral y derivativo en relación a las medidas del sensor de temperatura de la cámara frigorífica, a su vez se realiza la normalización del valor de salida del bloque PID seguido de la escala, almacenando el valor escalado en la variable %MD46, la misma que se utilizará para realizar las acciones de encendido y apagado de compresores, figura 59.

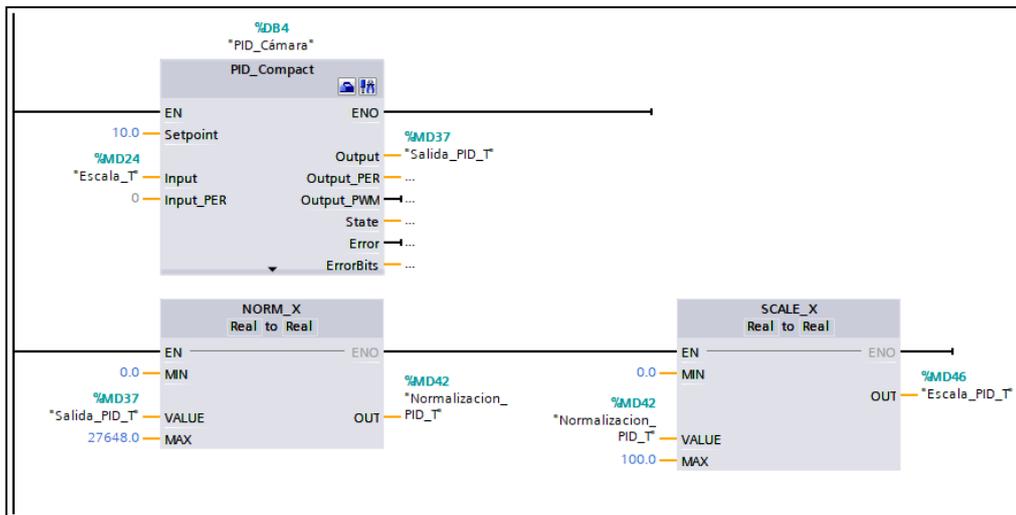


figura 58. Bloque de control PID, normalización y escalado

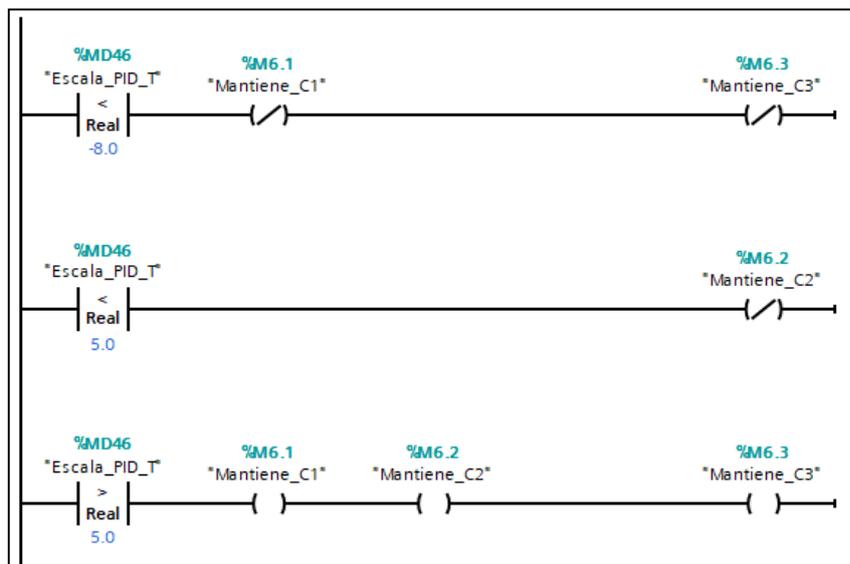


figura 59. Control de encendido y apagado de compresores

En el apartado de la figura 60 se muestra mediante un diagrama de flujo las operaciones realizadas en la programación del PLC para el control de encendido y apagado de los compresores, desde el inicio hasta el fin.

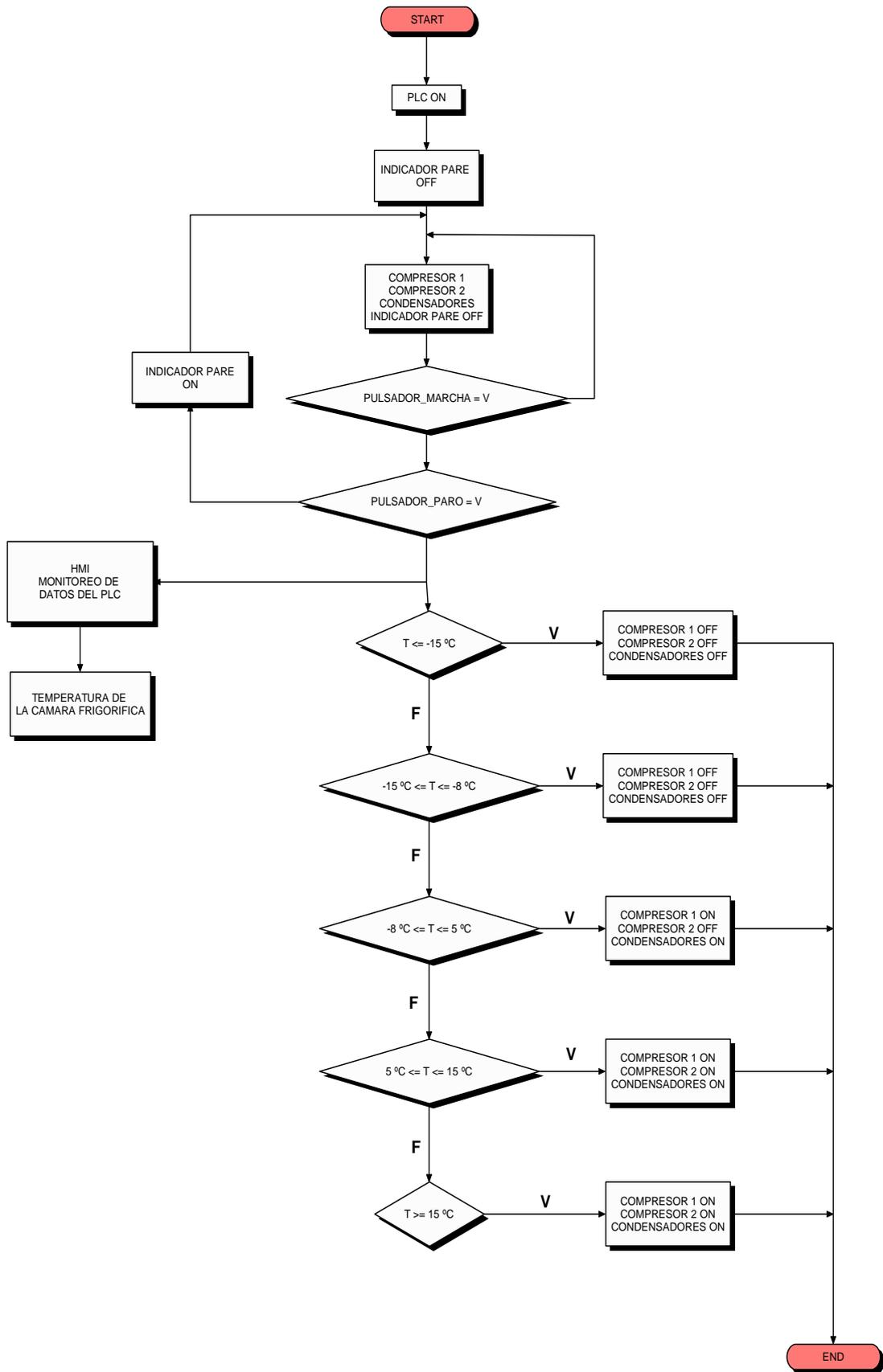


figura 60. Diagrama de Flujo del Sistema de control

3.2.7 DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE PANTALLA HMI EN EL SOFTWARE DOPSOFT V2

Se crea un nuevo proyecto y se selecciona el tipo de modelo de interfaz que se esté utilizando, es este caso un HMI modelo B03E211 figura 61, luego seleccionamos el tipo de comunicación ethernet y finalizamos figura 62.

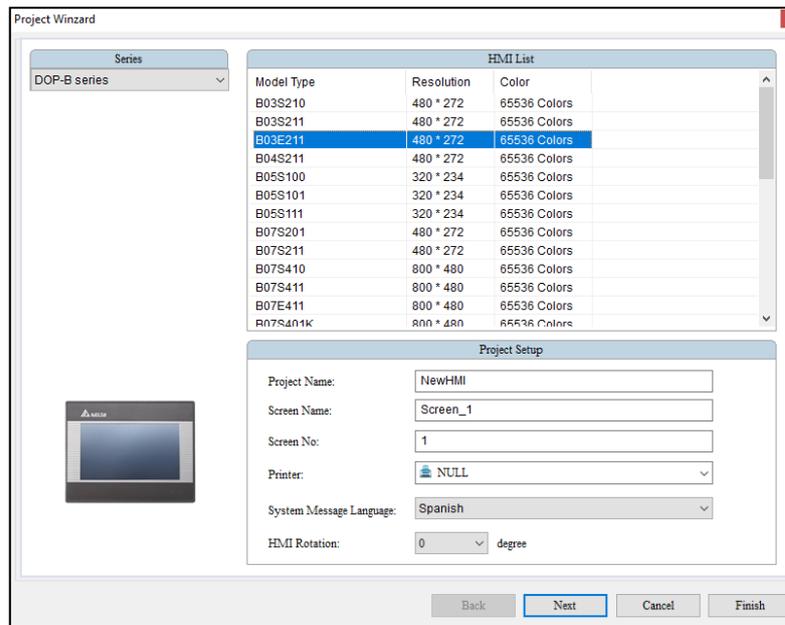


figura 61. Creación de nuevo proyecto en DOPSOFT

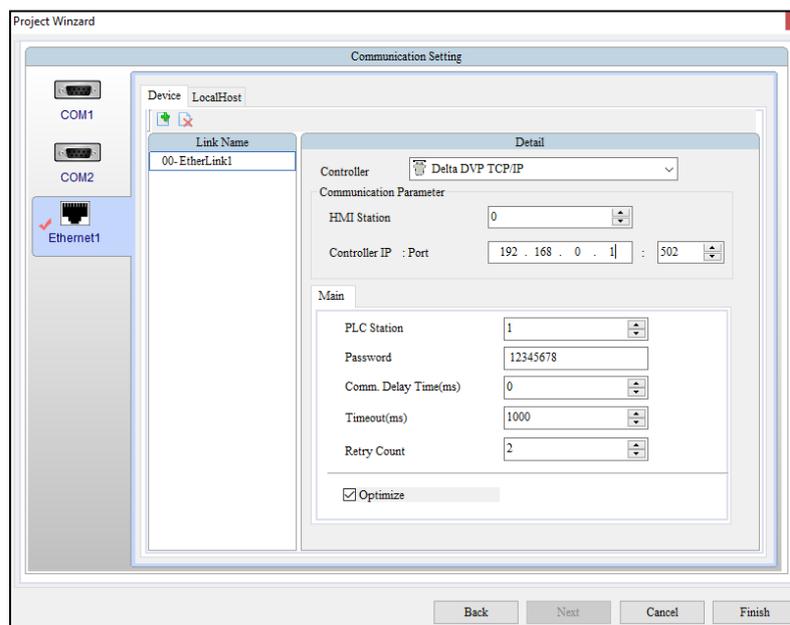


figura 62. Configuración para comunicación Ethernet

En la figura 63 se muestran las configuraciones realizadas en el programa DOPSoft para el monitoreo del sistema de control, mostrando en la interfaz HMI mediante indicadores si el sistema está en funcionamiento o no, además, mostrar el nivel de temperatura al que se encuentra la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración y su respectiva señal, de igual manera con la presión del gas que circula sobre las cañerías.

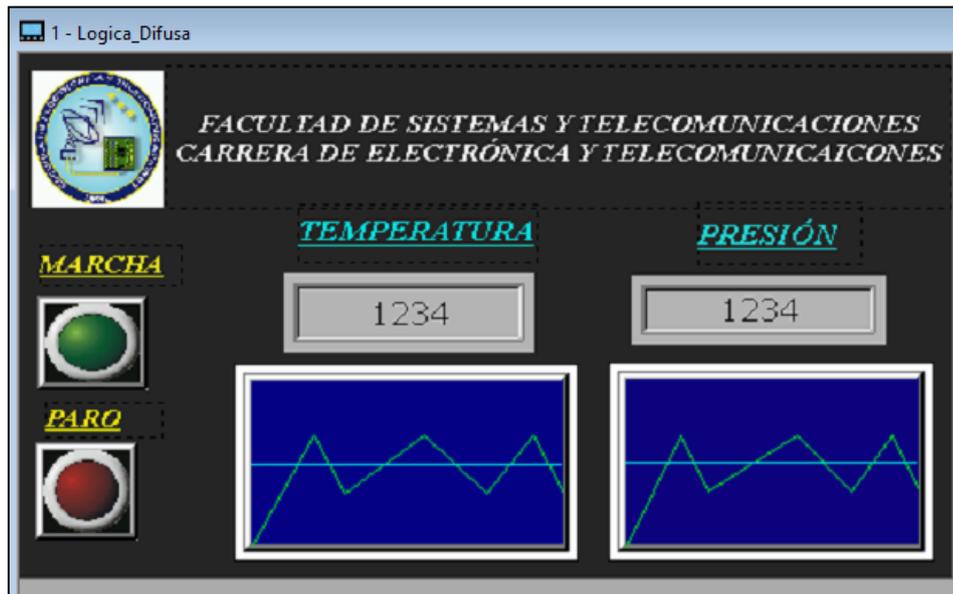


figura 63. Diseño de interfaz HMI para monitoreo del sistema de control

3.3 CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN KWH Y COSTOS MENSUALES.

Para obtener el consumo eléctrico en KWH se realiza en primera instancia la adquisición de datos de corriente de la planta en general con ayuda de un amperímetro de gancho, para luego calcular el valor de potencia (W), multiplicando el valor de la corriente ideal obtenida en la medición con el voltaje de entrada al sistema (220V), tal como muestra la ecuación.

$$P = V * I$$

(5)

Para calcular el consumo eléctrico mensual (CM) en KWH, se aplica la siguiente ecuación:

$$CM = \frac{P * \text{promedio de horas de uso al día} * \text{días de uso mensual}}{1000} \text{ [KWH]} \quad (6)$$

Una vez que se obtiene el valor del consumo eléctrico general de la planta prototipo, podemos calcular el costo generado a pagar mensualmente, calculándolo mediante la ecuación (7), conociendo que el costo por KWH se considera de acuerdo al consumo mensual que se obtenga, tabla 13.

$$\text{Valor mensual por pagar} = \text{consumo mensual} * \text{valor por KWH} \quad (7)$$

CONSUMO MENSUAL (KWH)	VALOR POR KWH
130 KWH	\$0.04
De 131 a 500 KWH	\$0.10
De 131 a 700 KWH	\$0.10
De 501 a 700 KWH	\$0.13
De 701 a 1000 KWH	\$0.15
De 1001 a 1500 KWH	\$0.17
De 1501 a 2500 KWH	\$0.27

Tabla 13. Costos por consumo de KWH, recuperada de CNEL EP.

3.4 ANÁLISIS DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Realizar el estudio de factibilidad financiera con la finalidad de determinar los costos de inversión para la implementación de un sistema de control difuso y un sistema de control PID en una planta prototipo de refrigeración.

COSTO DE EQUIPOS

A continuación, se detalla el costo de equipos de control similares a los manejados dentro de la propuesta, cotizados con equipos siemens por ser los más utilizados a nivel industrial tabla 14.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
PLC Siemens S7-1200 CPU 1212 AC 6ES7212-1BE40- 0XB0	1	\$497.00	\$497,00
HMI Siemens KTP300	1	\$450,00	\$450,00
Sensor de temperatura	3	\$127,00	\$127,00
Sensor de presión	2	\$352,00	\$352,00
Total			\$1408,00

Tabla 14. Precio de equipos Siemens

El costo total de equipos para el desarrollo e implementación del sistema de control sobre la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración es de \$1291.80, tabla 15.

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
PLC Siemens S7-1200 CPU 1212 AC 6ES7212- 1BE400XB0	1	\$497.00	\$497.00
Controlador Full Gauge VX – 950 plus	1	\$128.41	\$128.41
VX – 950 HMI-01	1	\$93.73	\$93.73
Fuente de alimentación MEAN WELL RS 15-12	1	\$38.87	\$38.87
Conv 32 USB RS-485	1	\$96.29	\$96.29
HMI Delta DOP-B03E211	1	\$400.00	\$400.00
Sensor de temperatura	3	\$7.50	\$22.50
Sensor de presión	2	\$7.50	\$15.00
Total			\$1291.80

Tabla 15. Precios de equipos utilizados

COSTOS DE MANO DE OBRA

A continuación, se detallan los costos de implementación del sistema de control PID y del sistema de control de lógica difusa, tabla 16 y 17.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Diseño del sistema de control PID	1	\$ 2.500,00	\$ 2.500,00
Implementación del sistema de control PID	1	\$ 2.500,00	\$ 2.500,00
Gastos varios	1	\$1000,00	\$1000,00
TOTAL			\$ 6000,00

Tabla 16. Costos de mano de obra de implementación del sistema de control PID

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Diseño del sistema de control difuso	1	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00
Implementación del sistema de control difuso	1	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00
Gastos varios	1	\$1000,00	\$1000,00
TOTAL			\$ 7000,00

Tabla 17. Costos de mano de obra de implementación del sistema de control difuso

COSTO FINAL

El presente valor representa al gasto generado por la adquisición de los equipos de control y mano de obra que son empleados para la implementación del sistema de control difuso y sistema de control PID respectivamente, obteniendo como valor total de inversión para el primer sistema de control (lógica difusa) \$8291,80 y \$7291,80 para el sistema de control PID, tabla 18.

	CONTROL PID	CONTROL DIFUSO
EQUIPOS	\$1291,80	\$1291,80
MANO DE OBRA	\$6000,00	\$7000,00
TOTAL DE INVERSIÓN	\$7291,80	\$8291,80

Tabla 18. Costos totales de implementación.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 PRUEBAS

4.1.1 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PID DE LA CÁMARA FRIGORÍFICA EN SIMULINK

Para la simulación del sistema se utilizará el complemento Simulink de Matlab, en donde se insertarán bloques de señales y bloques de control.

La figura 64 muestra el diagrama de bloques realizado para el sistema de control PID. Se desarrollará un sistema en lazo cerrado insertando un bloque Step como entrada del sistema, seguido del bloque de control PID, luego se inserta un bloque para agregar el modelo matemático de la planta (TF) adquirida anteriormente, figura 43, y finalmente un bloque de Scope que nos ayudará a visualizar la señal de salida obtenida.

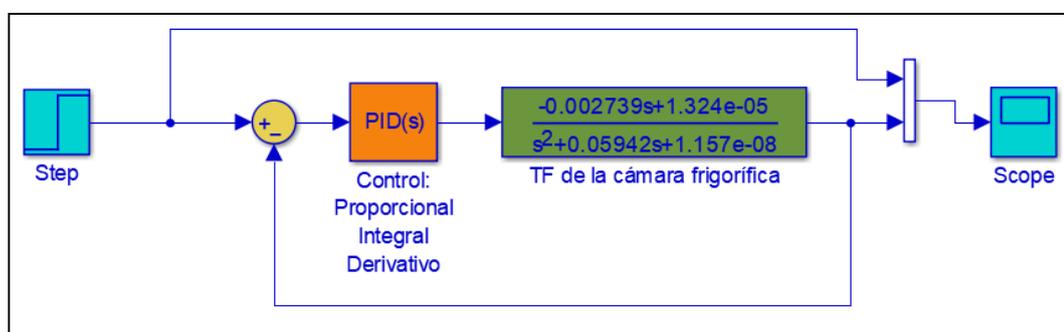


figura 64. Diagrama de control PID en Simulink para el control de la cámara frigorífica

En el bloque de control PID se ingresa los valores de los parámetros proporcional, integral y derivativo obtenidos durante el diseño del controlador, tabla 8. La figura 65 muestra la señal de salida una vez que se ha aplicado el controlador, se agregó un valor inicial de 25 considerando que la planta inicialmente esta a una temperatura de 25 grados centígrados, un tiempo de step de 800 segundos para

visualizar como el controlador estabiliza el sistema en 600 segundos y luego comenzar nuevamente desde el valor inicial agregado de 25, estabilizando el sistema después de 600 segundos más.

a) Azul: señal de salida (temperatura), b) amarillo: setpoint (temperatura).

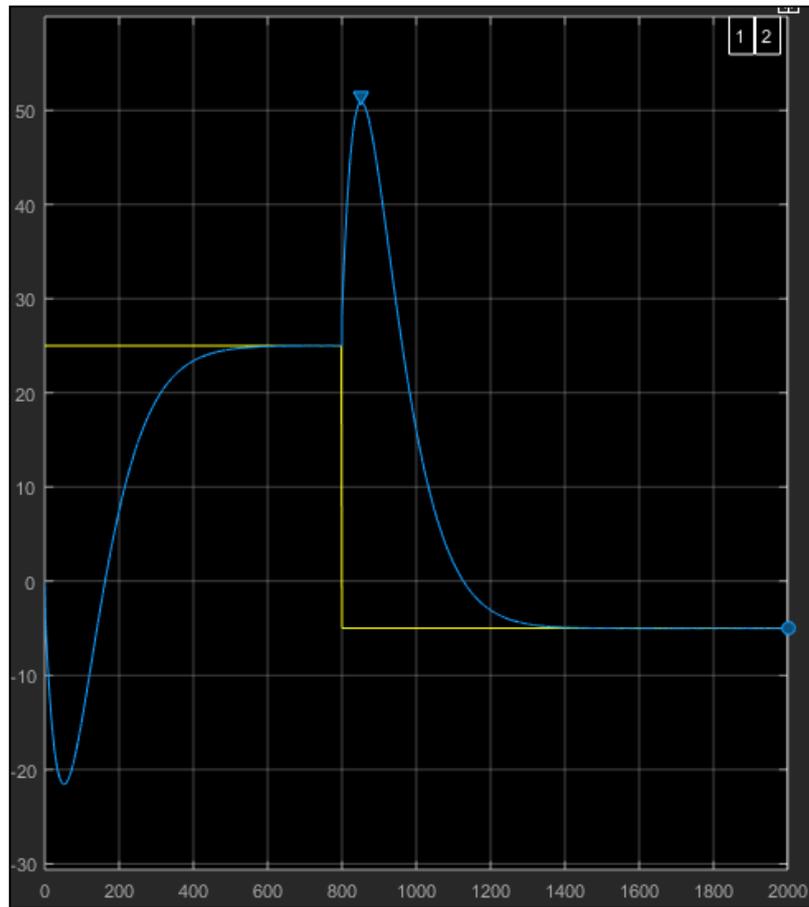


figura 65. Señal de salida aplicando el control PID a la cámara frigorífica

Valor Pico a Pico	72.442
Valor de Overshoot %	2.010 %

Tabla 19. Valores pico a pico y overshoot de la señal de salida (1)

A continuación, se presenta el diagrama de bloque en donde se puede visualizar la señal de error de estado estacionario que existe en el sistema, producida por la división entre la señal de salida (Temperatura) con respecto a la señal de entrada

(Abertura de la válvula) una vez que se ha aplicado un control PID al sistema, figura 66.

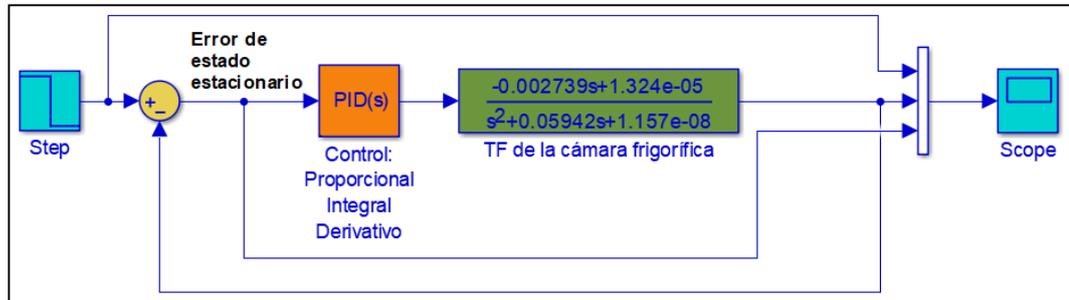


figura 66. Error de estado estacionario existente en el sistema de control PID.

La figura 67 mostrada a continuación, presenta la gráfica de la señal de error de estado estacionario, a) azul: señal de salida (temperatura), b) naranja: señal de error de estado estacionario, c) amarillo: setpoint (temperatura).

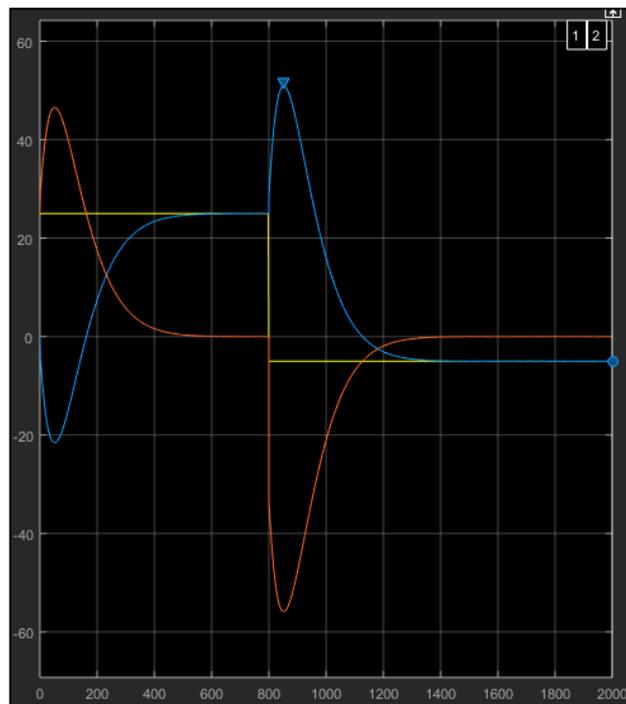


figura 67. Gráfica de la señal de error de estado estacionario con la aplicación de un control PID

A continuación, se agrega como señal de perturbación al sistema de control el valor de la temperatura ambiente el cual es generada por el producto ya almacenado manteniendo una temperatura de 1°C mientras que la temperatura del evaporador se mantiene en el valor del setpoint de -5°C, figura 68.

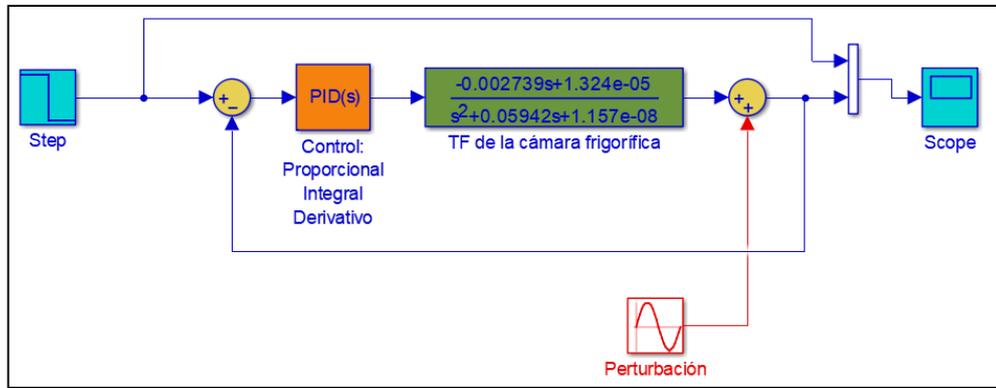


figura 68. Diagrama de control PID con perturbación.

La figura 69 muestra la gráfica de la señal de salida del control PID con perturbación, a) azul: señal de salida con perturbación (temperatura), b) amarillo: setpoint (temperatura).

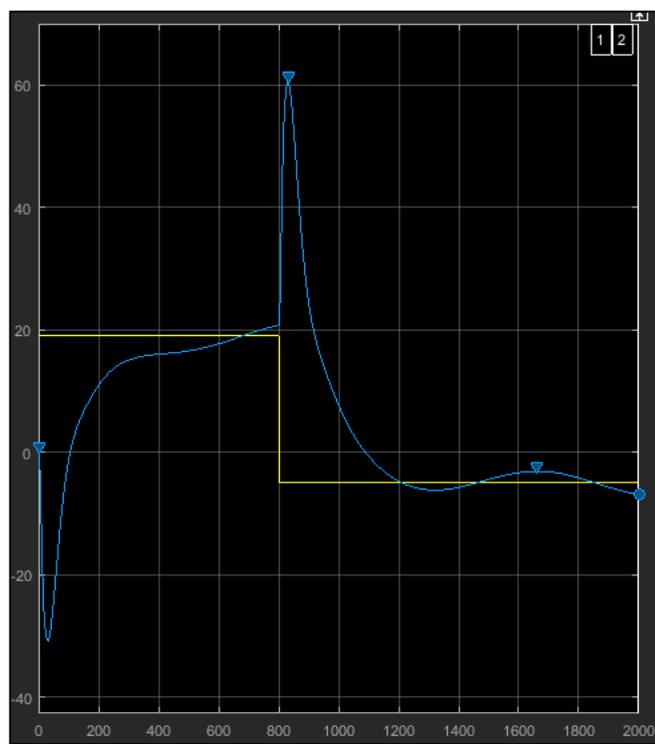


figura 69. Gráfica del controlador PID aplicando perturbación.

4.1.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO EN SIMULINK

Mediante diagramas de bloques se realizó el diseño del sistema de control a implementar, adjuntando las funciones de membresías y reglas ya establecidas anteriormente sobre el bloque “Fuzzy” verificando que se cumpla lo establecido en los objetivos del proyecto.

La figura 70 muestra el esquema desarrollado para la simulación del sistema de control difuso que consta de un bloque de entrada escalón, un bloque para el controlador de logica difusa, un bloque de función de transferencia que indica el modelo de la planta y un osciloscopio para visualización de la señal de salida.

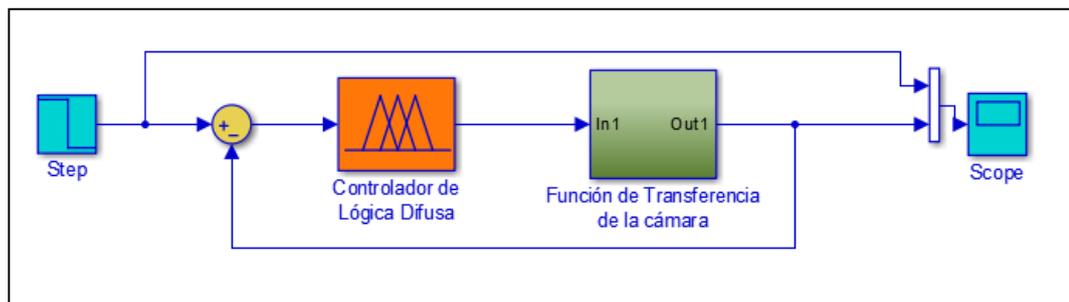


figura 70. Diagrama de control difuso en Simulink

Los datos para el bloque de control de lógica difusa son exportados de la ventana Fuzzy Logic Designer, en donde se realizó las funciones de membresía como también las reglas para el sistema, estos datos son exportados a la ventana Workspace de Matlab y a su vez se hace el llamado de estos datos desde el bloque fuzzy logic controller de simulink ingresando el nombre con el cual fue exportado.

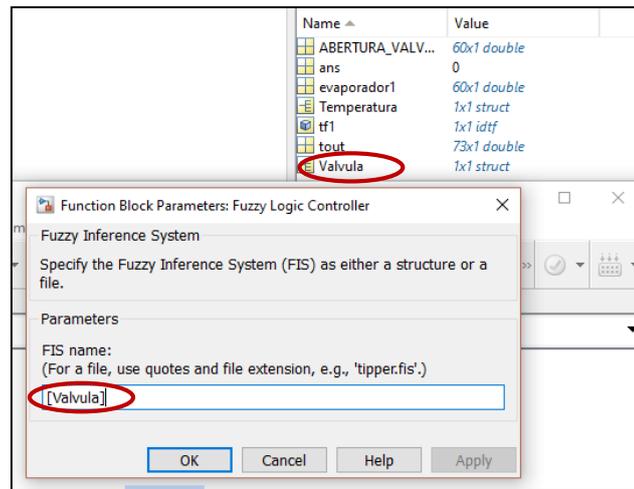


figura 71. Exportar e Importar datos del controlador

Como señal de salida aplicando el control de lógica difusa a la cámara frigorífica del sistema de refrigeración se obtiene como resultado la señal mostrada en la siguiente figura, agregando un valor inicial de 25, considerando que la temperatura inicial de la planta es de 25 grados centígrados, además se agregó un step inicial de 400 segundos para lograr visualizar como el controlador estabiliza el sistema en 250 segundos, para luego iniciar nuevamente desde el valor de temperatura de 5 grados y ver como el sistema se estabiliza 250 segundos después.

a) azul: señal de salida (temperatura), b) amarillo: setpoint (temperatura)

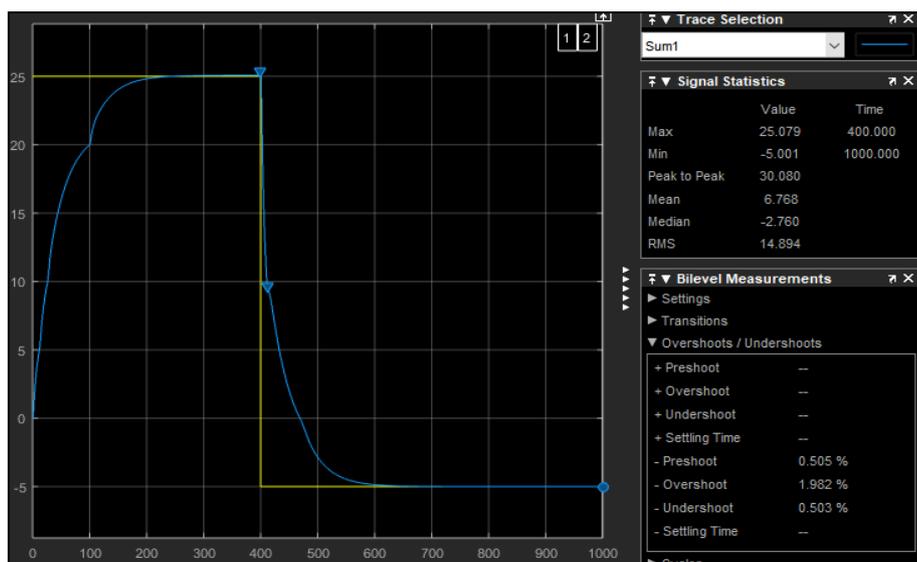


figura 72. Señal de salida en respuesta al controlador difuso

Valor Pico a Pico	30.080
Valor de Overshoot %	1.982 %

Tabla 20. Valores pico a pico y overshoot de la señal de salida (2)

La figura 73 presenta el diagrama de bloque en donde se visualiza la señal de error de estado estacionario que existe en el sistema, producida por la división entre la señal de salida (Temperatura) con respecto a la señal de entrada (Abertura de la válvula) una vez que se ha aplicado el control difuso al sistema.

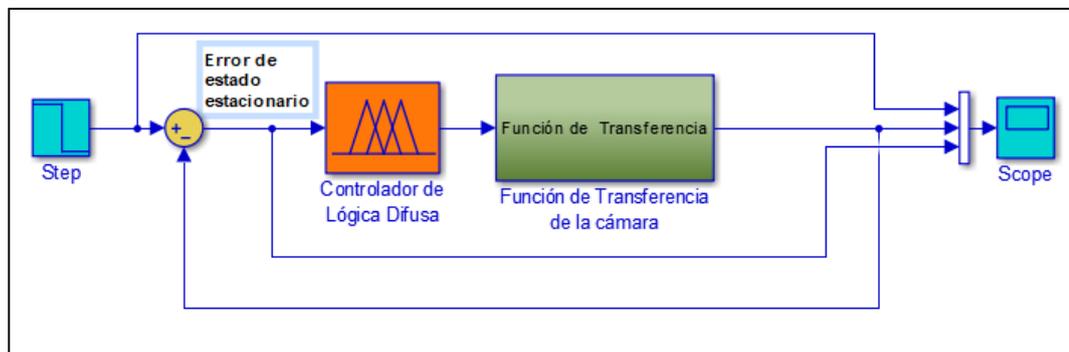


figura 73. Error de estado estacionario existente en el sistema de control Difuso.

La figura 74 muestra la gráfica de la señal del error de estado estacionario producida por la división entre la señal de salida (Temperatura) con respecto a la señal de entrada (Abertura de la válvula) una vez que se ha implementado un control de lógica difusa al sistema.

- a) azul: señal de salida (temperatura), b) naranja: señal de error de estado estacionario, c) amarillo: setpoint (temperatura)

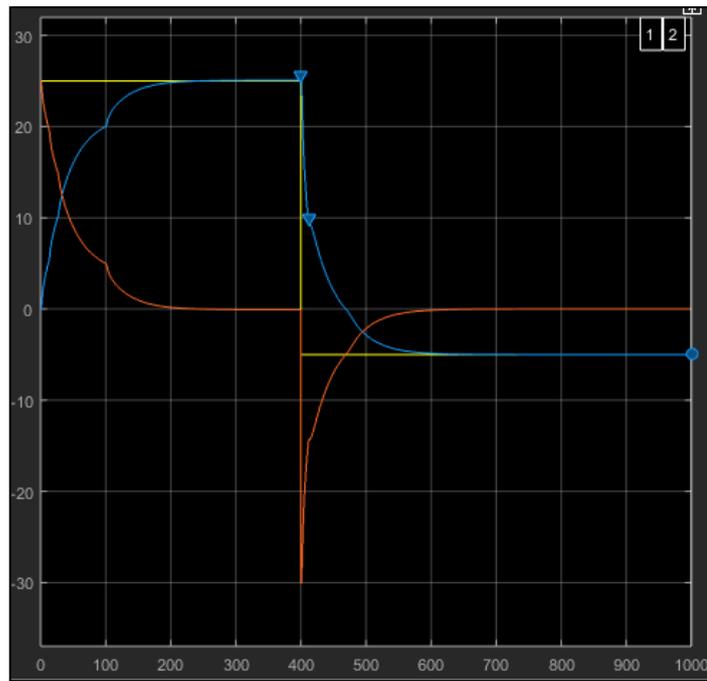


figura 74. Gráfica de la señal de error de estado estacionario con la implementación de un control difuso.

La figura 75 presenta el diagrama de bloque del control difuso, añadiendo como señal de perturbación al sistema de control el valor de la temperatura ambiente el cual es generada por el producto ya almacenado manteniendo una temperatura de 1°C mientras que la temperatura del evaporador se mantiene en el valor del setpoint de -5°C .

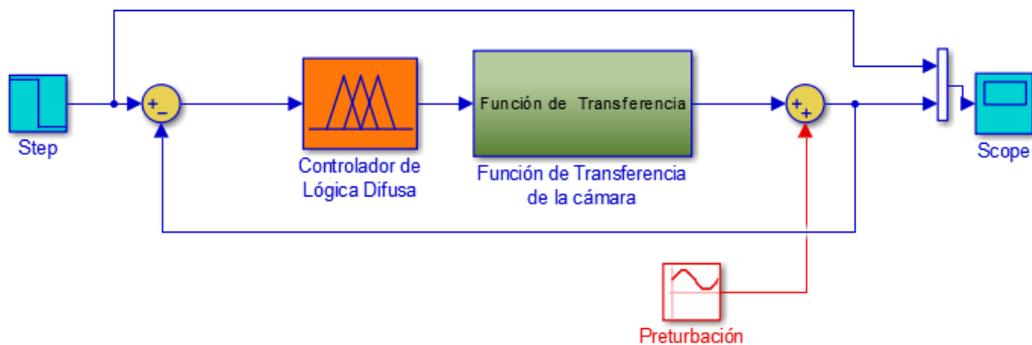


figura 75. Diagrama de control Difuso con perturbación.

La figura 76 muestra la gráfica de la señal de salida del controlador difuso con perturbación.

a) azul: señal de salida (temperatura), b) amarillo: setpoint (temperatura)

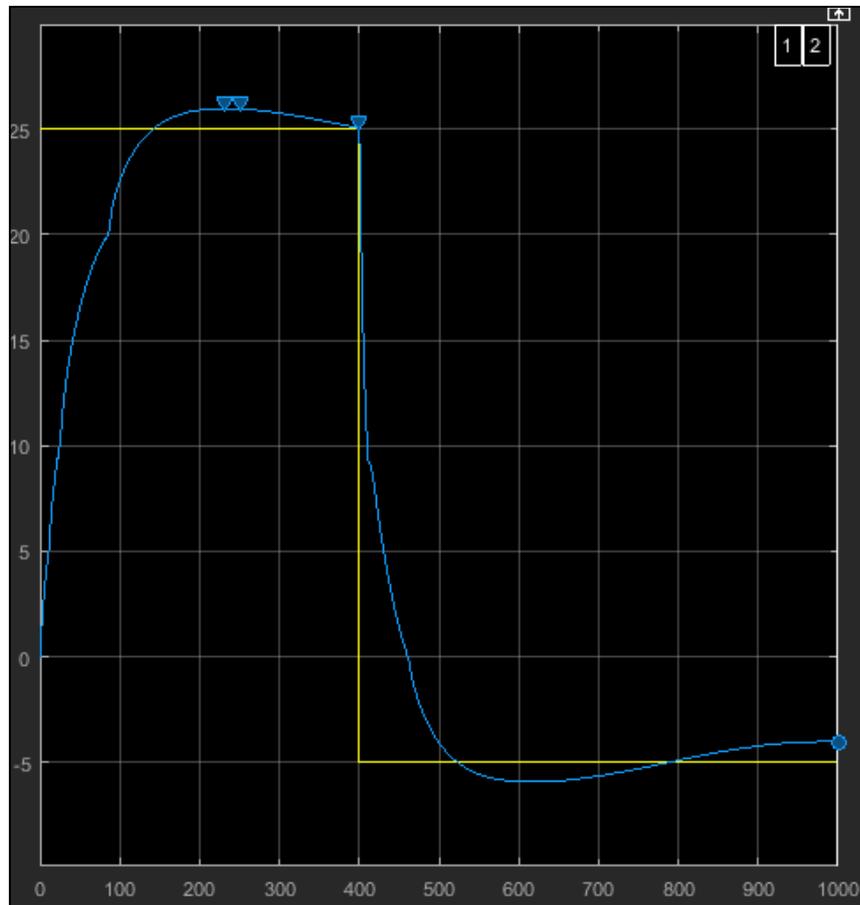


figura 76. Gráfica del controlador difuso aplicando perturbación.

4.1.3 PRUEBAS DEL CONTROL DE TEMPERATURA APLICANDO LÓGICA DIFUSA EN EL SOFTWARE TÍA PORTAL.

Durante el funcionamiento del sistema se pudo notar una desactivación brusca por parte de los contactores, por lo cual se optó por agregar un bloque de control PID en función a los valores de temperatura de la cámara frigorífica, el mismo que ayudaría a evitar la desactivación brusca de los contactores, sin dejar de lado las condiciones establecidas para el control de lógica difusa ya desarrollados.

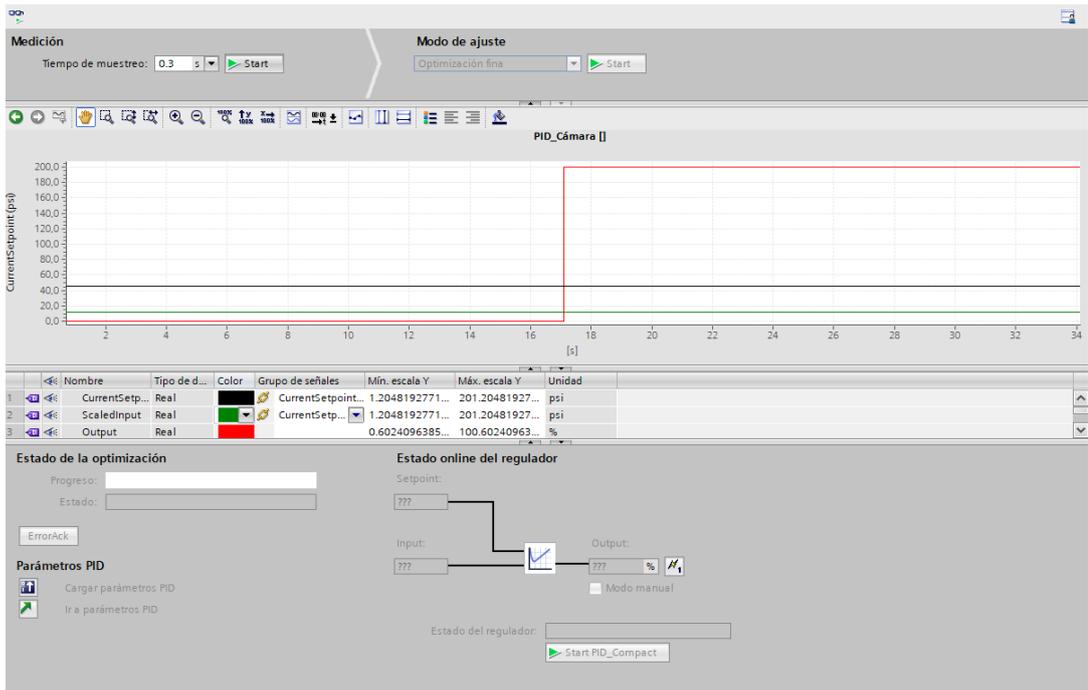


figura 77. Adquisición de parámetros del controlador PID en función a la temperatura (1)

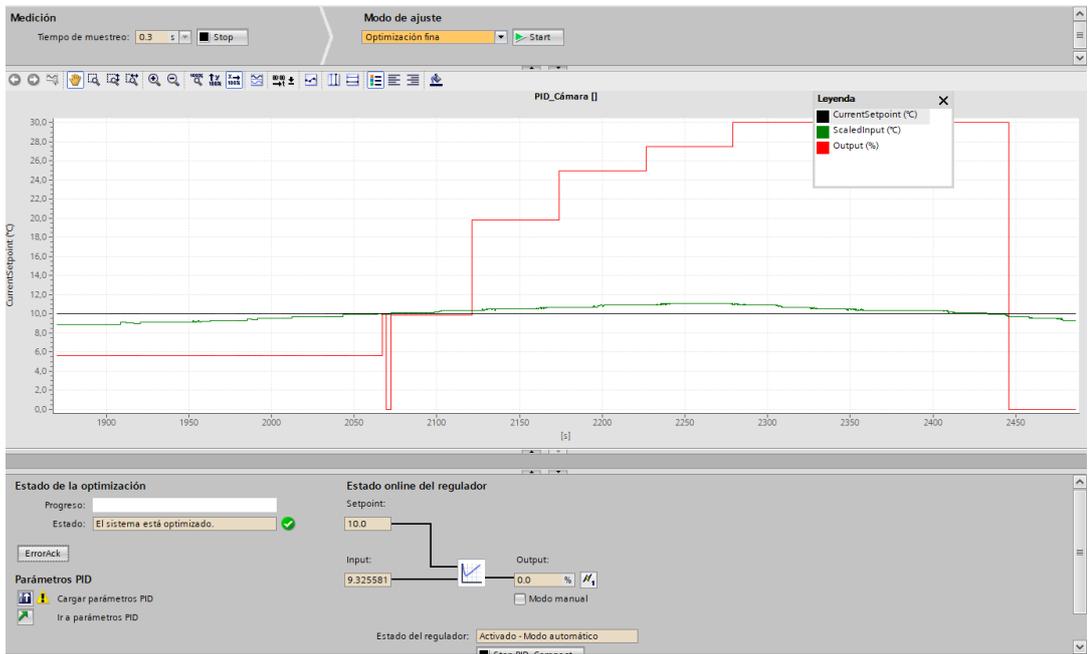


figura 78. Adquisición de parámetros del controlador PID en función a la temperatura (2)

4.1.4 PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA.

Se desarrollaron pruebas para la calibración del sensor de temperatura, puesto que no se conocía el datasheet del sensor se procedió a realizar una calibración convencional, ajustando los valores de normalización para obtener una lectura aproximada a la mostrada en la cámara frigorífica.

La tabla 21 muestra los valores de normalización empleados para la calibración del sensor de temperatura.

Valor mínimo de normalización	Valor de máximo de normalización	Lectura del sensor de la cámara frigorífica	Lectura sensor de temperatura
0	27648	26.7	83.53
0	15400	26.7	16.35
0	20000	26.7	60.57
0	8750	26.7	26.5

Tabla 21. Normalización del sensor de temperatura

4.1.5 PRUEBAS DEL TIEMPO DE ESTABILIDAD DE LA CÁMARA FRIGORÍFICA DEL PROTOTIPO DE REFRIGERACIÓN.

Se realizaron pruebas para denotar el tiempo que tarda la planta prototipo para alcanzar una temperatura deseada de -5°C en la cámara frigorífica para mantenimiento del producto. Inicialmente se realizó la adquisición de datos manteniendo la planta prototipo en funcionamiento durante un tiempo de 30 minutos continuos, tiempo en el que se alcanzó el nivel de temperatura deseada.

La siguiente tabla muestra los valores de temperatura del evaporador y temperatura ambiente alcanzados de forma mecánica, sin aplicar un control a la planta prototipo.

Cámara Frigorífica sin Controlador	
Tiempo de funcionamiento	1800 segundos
Temperatura de Evaporador	-5°C

Tabla 22. Tiempo de estabilidad de la planta actual

La tabla 23 muestra los valores de temperatura del evaporador y temperatura ambiente aplicando el control de lógica y controlador PID.

Cámara Frigorífica con Controlador		
	Control PID	Control Difuso
Tiempo	600 segundos	250 segundos
Temperatura de Evaporador	-5°C	-5°C

Tabla 23. Tiempo de estabilidad con control PID y control difuso

4.1.6 PRUEBAS DE APLICACIÓN DE CONTROL PID Y LÓGICA DIFUSA A LA CÁMARA FRIGORÍFICA DEL PROTOTIPO DE REFRIGERACIÓN

Como pruebas de la implementación del sistema de control PID y control difuso a la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración se realizó la adquisición de datos, Anexo 4 y 5, para verificar el comportamiento de la señal una vez que se aplicó el controlador.

A continuación, las figuras 79 describe el valor del tiempo de estabilidad al momento en el que la temperatura de la cámara frigorífica alcanza el valor del setpoint de -5°C con la implementación de un sistema de control PID, teniendo en cuenta que la planta inicialmente se encuentra a una temperatura ambiente de 20

°C, además se le agrega una perturbación generada por la apertura de la puerta de la cámara frigorífica en el tiempo de 990 segundos y se mantiene abierta durante 30 segundos, produciendo un aumento de la temperatura de -5°C a 1°C, sin embargo el sistema de control actúa sobre tal, intentando alcanzar el valor del setpoint, reduciendo la temperatura nuevamente y alcanzando los -5°C en un tiempo de 240 segundos.

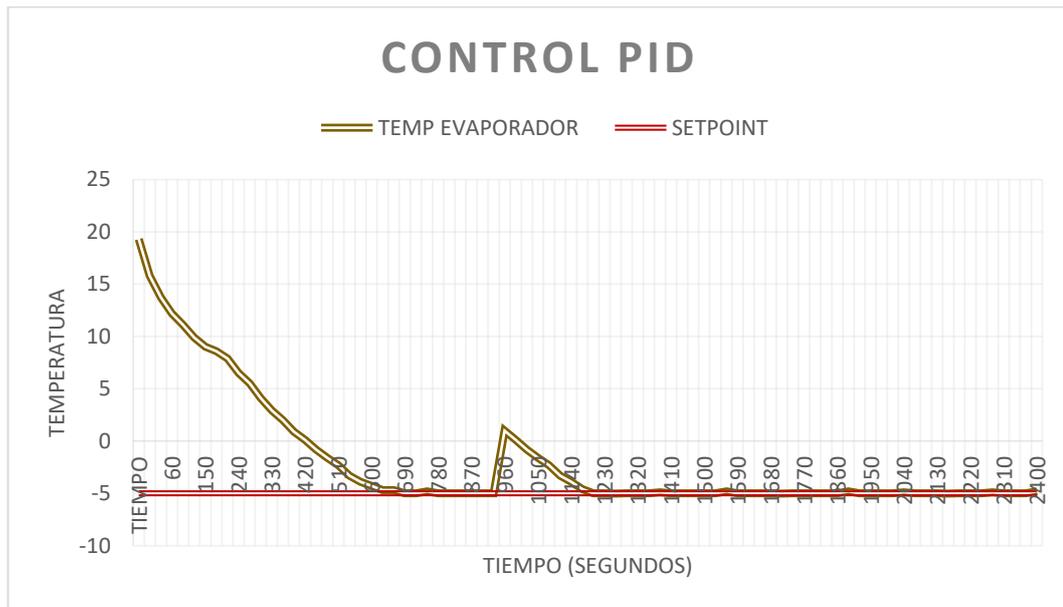


figura 79. Implementación del controlador PID

La tabla 24 detalla el valor del tiempo de estabilidad en el momento en el que la temperatura de la cámara frigorífica alcanza el valor del setpoint con la implementación de un control PID.

Controlador PID	
Tiempo de estabilidad	720 segundos
Temperatura de Setpoint	-5°C

Tabla 24. Tiempo de estabilidad del controlador PID

La figura 80 muestra la señal en respuesta al controlador de lógica difusa implementado, mostrando el tiempo de estabilidad en el momento en que la

temperatura de la cámara frigorífica alcanza el valor de setpoint de -5°C , iniciando el proceso de enfriamiento desde una temperatura ambiente inicial de 20°C , además agregando como perturbación la apertura de la puerta de la cámara frigorífica en el tiempo de 600 segundos, manteniéndose abierta durante un tiempo de 60 segundos, la acción del controlador será de estabilizar el sistema alcanzando el valor del setpoint de -5°C , logrando llegar al valor de temperatura deseado en un tiempo de 120 segundos.

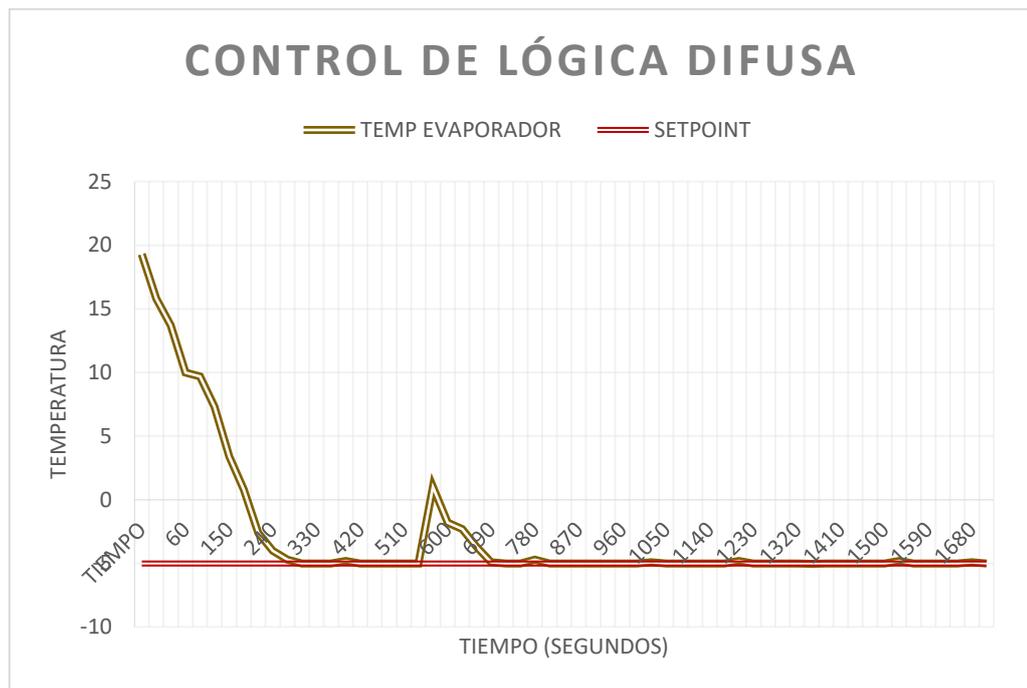


figura 80. Implementación del controlador de lógica difusa

La tabla 25 detalla el valor del tiempo de estabilidad al momento de alcanzar el valor del setpoint con la implementación de un control PID en la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración.

Controlador Difuso	
Tiempo de estabilidad	330 segundos
Temperatura de Setpoint	-5°C

Tabla 25. Tiempo de estabilidad del controlador difuso

4.1.7 PRUEBAS DE SIMULACIÓN DE ABERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN APLICANDO CONTROL PID.

Tomando en cuenta que la variable de entrada y salida del sistema son apertura de la válvula y temperatura, se presenta la siguiente gráfica en donde se muestra las señales de ambas variables y así adquirir los datos del porcentaje de apertura de la válvula en función a la temperatura, figura 81.

a) azul: señal de apertura de la válvula, b) amarillo: señal de temperatura.

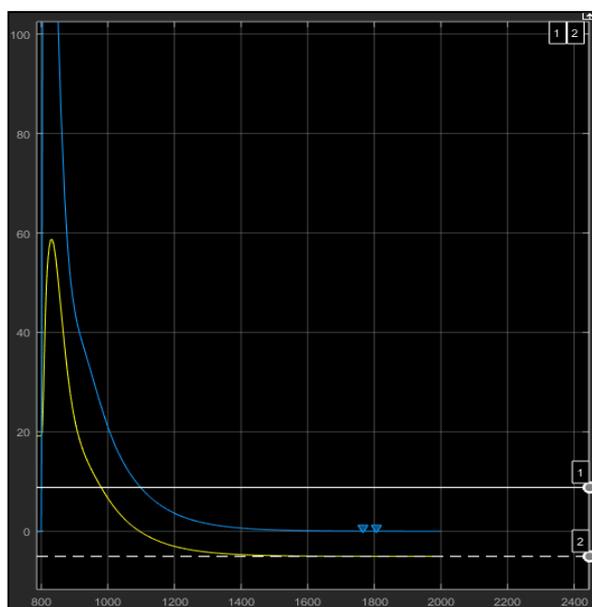


figura 81. Gráfica para adquisición de datos de apertura de la válvula en función a la temperatura

TEMPERATURA	ABERTURA DE LA VÁLVULA
20°C	85%
15°C	42%
10°C	33%
5°C	21%
0 C	11%
-5°C	2%

Tabla 26 Porcentaje de apertura de la válvula de expansión en función a la temperatura, valores por simulación de un controlador PID..

4.1.8 PRUEBAS DE SIMULACIÓN DE ABERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN APLICANDO CONTROL DIFUSO.

Como prueba de simulación con relación a la apertura de la válvula de expansión, se tiene la lectura de datos adquiridos desde la ventana Rule Viewer, figura 52, tomando ciertos valores en función a la temperatura, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

TEMPERATURA	ABERTURA DE LA VÁLVULA
20°C	80%
15°C	50%
10°C	60%
5°C	35%
0 C	19%
-5°C	1%

Tabla 27. Porcentaje de apertura de la válvula de expansión en función a la temperatura, valores por simulación de un controlador Difuso.

4.1.9 PRUEBAS DE ABERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN CON LA IMPLEMENTACION DEL CONTROLADOR PID.

La válvula de expansión de full gauge utilizada dentro del proyecto, al ser un dispositivo dedicado exclusivamente para sistemas de refrigeración y por ser nuevo en el mercado, no se ha logrado extraer la lectura de datos con el equipo de control PLC y al no existir equipos que permitan la comunicación entre válvula y PLC, se procedió a realizar la extracción de los datos generados por la válvula con equipos del mismo fabricante, en este caso el controlador VX-950 plus y con ayuda del software Sitrad.

Para el accionamiento de la válvula de expansión se usan las funciones mostradas a continuación:

F11 Inicia apertura de la válvula: Esta función define la apertura de la válvula de expansión cuando empieza el control y acción junto con la función 12.

F12 Tiempo de retardo para el control de sobrecalentamiento: Tiempo durante el cual la válvula de expansión permanecerá abierta como se define en la función 11.

Ahora bien, la válvula de expansión entrará en funcionamiento una vez que se cumpla la siguiente fórmula.

$$\text{accionamiento de válvula} = F05(\text{lectura de sobrecalentamiento} - F13) \quad (8)$$

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
F05	Ganancia proporcional (Kp).
F13	Setpoint de sobrecalentamiento.
Lectura de sobrecalentamiento	Lectura por sensor.

Tabla 28. Funciones utilizadas para accionamiento de válvula de expansión.

El controlador VX-950 plus de full gauge permite ingresar valores de P, I, D, utilizando las siguientes funciones, tabla 29.

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
F05	Ganancia proporcional (Kp).
F06	Tiempo integral (Ki).
F07	Tiempo derivativo (Kd).

Tabla 29. Funciones utilizadas para ingreso de parámetros P,I,D.

La tabla a continuación detalla ciertos valores de abertura de la válvula obtenidos en función a la temperatura.

TEMPERATURA	ABERTURA DE LA VÁLVULA
20°C	100%
15°C	80%
10°C	60%
5°C	50%
0 C	20%
-5°C	2%

Tabla 30. Porcentaje de apertura de la válvula de expansión en función a la temperatura, valores por implementación de un controlador PID.

4.1.10 PRUEBAS DE ABERTURA DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO

Sabiendo que no contamos con la posibilidad de realizar la lectura de datos de la válvula de expansión mediante el equipo de control PLC, y conociendo que el controlador de full gauge VX-950 plus utiliza una fórmula para el funcionamiento de la válvula, se realiza un análisis de las funciones comprendidas en el controlador de full gauge para asimilar las reglas difusas establecidas en la simulación y poder establecer el control de lógica difusa sobre la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración.

A continuación, se detalla la función utilizada para la asimilación de las reglas difusas para la implementación del sistema de control.

F05 Ganancia proporcional (Kp): Actúa directamente en la apertura y cierre de la válvula de expansión en relación a la variación de la temperatura de sobrecalentamiento en forma proporcional.

Para realizar la asimilación de valores para el control difuso se utiliza la fórmula vista anteriormente, ecuación 8, realizando un despeje de la variable Ganancia proporcional como se muestra a continuación.

$$GP = \frac{\text{abertura válvula}}{\text{lectura sobrecalentamiento} - \text{setpoint de sobrecalentamiento}} \quad (9)$$

Abertura válvula: este valor es obtenida desde la simulación realizada en Matlab, figura 82.

Lectura sobrecalentamiento: el valor de lectura de sobrecalentamiento se extrae de los datos que se adquirieron inicialmente de la planta, figura 83, en relación al valor de temperatura de la simulación en Matlab, figura 82.

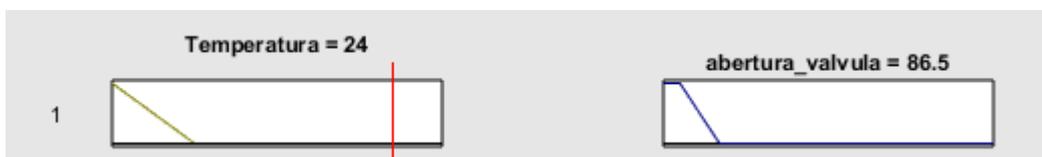


figura 82. Datos de temperatura y abertura de válvula extraídos de la simulación.

TEMP EVAPORADOR	TEMP SUCCION	SOBRECALENTAMIENTO
24,1	3,7	23,7
24,2	14	23,8
23,8	54,9	22,7
22,2	56,7	21,7

figura 83. Valores de sobrecalentamiento extraídos de los datos adquiridos inicialmente.

Setpoint de sobrecalentamiento: el valor del setpoint de sobrecalentamiento se deja en 60°C, el valor máximo establecido por el software Sitrad, figura 84.

F13	Setpoint de sobrecalentamiento	0.0	60.0	°C
-----	--------------------------------	-----	------	----

figura 84. Setpoint de sobrecalentamiento.

A continuación, en la siguiente tabla se detallan ciertos valores de abertura de la válvula en función a la temperatura con la implementación del control de lógica difusa sobre la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración.

TEMPERATURA	ABERTURA DE LA VÁLVULA
20°C	85%
15°C	55%
10°C	38%
5°C	36%
0 C	25%
-5°C	9%

Tabla 31. Porcentaje de apertura de la válvula de expansión en función a la temperatura, valores por implementación de un controlador Difuso

La siguiente figura muestra el diagrama de control on/off para los compresores, inicialmente inicia encendiendo los 2 y a su vez el nivel de apertura de la válvula de expansión aumenta según el control implementado, una vez que llega al valor del setpoint se apagan ambos compresores y la válvula de expansión comienza a cerrar, entonces el nivel de temperatura comenzará aumentar levemente dentro de la cámara frigorífica, es ahí donde el controlador reaccionará al notar que la temperatura no es igual al setpoint, por lo cual nuevamente comenzará el proceso de enfriamiento pero esta vez solo con un compresor en funcionamiento manteniendo la temperatura estable a el valor del setpoint.

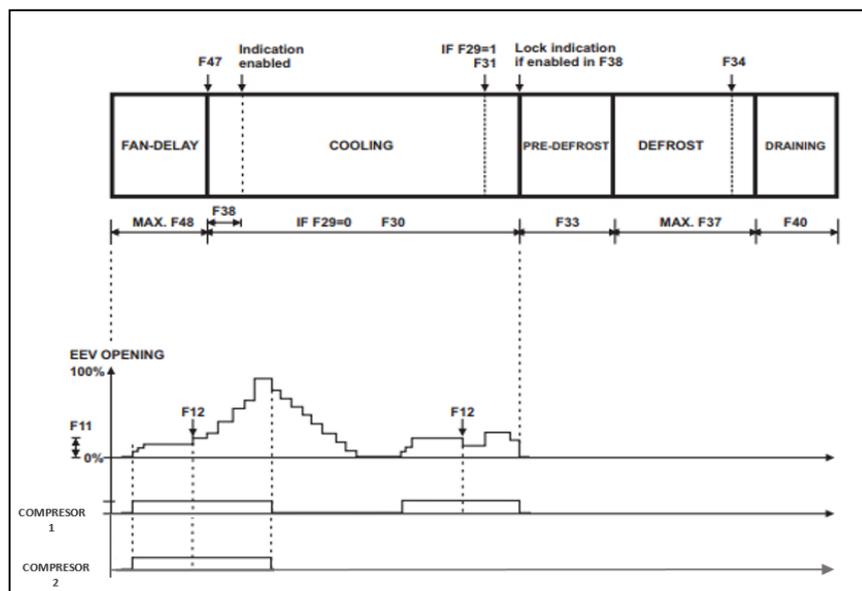


figura 85. Diagrama de control on/off de compresores.

4.2 RESULTADOS

4.2.1 COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN ENTRE VALORES DE SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA ACTUAL, LA PLANTA CON SISTEMA DE CONTROL DIFUSO Y LA PLANTA CON SISTEMA DE CONTROL PID.

En base a las pruebas realizadas, la tabla 32 muestra la comparación entre los valores de simulación con respecto a los valores de implementación de la planta actual, la planta con sistema de controlador PID y la planta con sistema de control Difuso, especificando el tiempo de estabilidad del sistema para determinar cuál de los dos controladores alcanza su temperatura deseada más rápido y así elegir el controlador que mejor resulta para cumplir con el objetivo propuesto.

DESCRIPCIÓN	PLANTA	CONTROL PID		CONTROL DIFUSO	
	ACTUAL	VALOR DE SIMULACIÓN	VALOR DE IMPLEMENTACIÓN	VALOR DE SIMULACIÓN	VALOR DE IMPLEMENTACIÓN
VALOR DE SETPOINT	-5°C	-5°C	-5°C	-5°C	-5°C
TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN (SEGUNDOS)	1800	600	720	250	330

Tabla 32. Comparación del tiempo de estabilidad entre la planta actual y la planta con controladores

4.2.2 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA.

Una vez realizadas las pruebas de calibración del sensor de temperatura, se realizó un análisis de precisión la cual se detalla en la siguiente tabla, la misma que fue de gran ayuda para el diseño del sistema de control PID y lógica difusa para el encendido y apagado de los compresores.

Sensor de la cámara frigorífica	Sensor de temperatura	de Precisión	de Porcentaje de error
26.7	83.53	31.96 %	68.04 %
26.7	16.35	163.3 %	63.3 %
26.7	60.57	44.08 %	55.92 %
26.7	26.5	100.7 %	0.7 %

Tabla 33. Valores de precisión y porcentaje de error de la normalización del sensor de temperatura

4.2.3 COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO ENTRE LA PLANTA ACTUAL Y LA PLANTA CON LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES.

Basados en las pruebas desarrolladas en la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración, se realiza la comparación del consumo energético entre la planta sin la aplicación de controlador, la planta con un control PID y la planta con control de lógica difusa.

Para definir los valores del consumo eléctrico de la planta prototipo en general, se realiza el cálculo correspondiente descrita en el capítulo 3 literal 3.3, estimando que la planta se encuentra en funcionamiento durante un tiempo de 10 horas. Las figuras 86 y 87 muestran la comparación de los valores del consumo eléctrico y costos por pagar mensualmente entre la planta actual, la planta con la implementación de un control PID y la planta con la implementación de un control difuso.

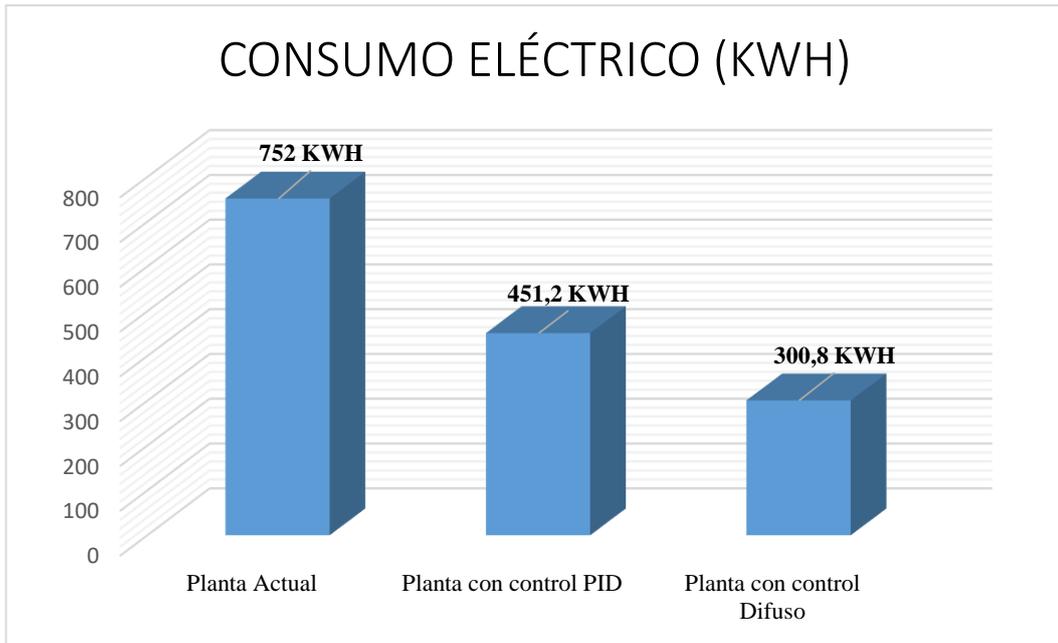


figura 86. Comparación del consumo eléctrico entre la planta actual y la planta con la implementación de controladores

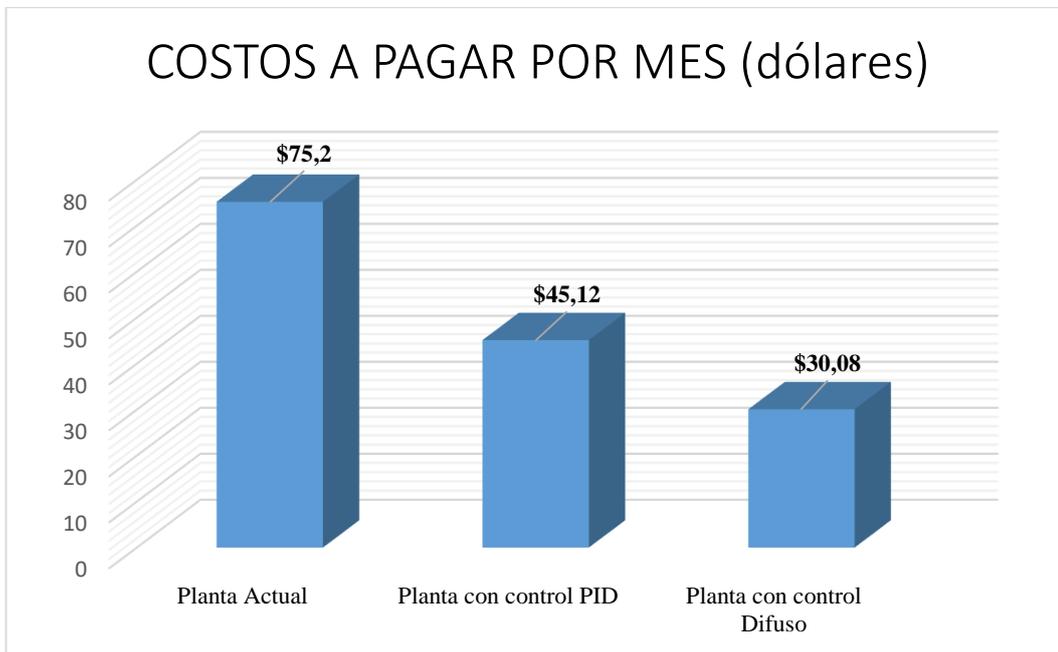


figura 87. Comparación de los costos por pagar mensualmente entre la planta actual y la planta con la implementación de controladores

Podemos notar que el consumo actual de la planta es muy elevado en comparación al consumo que se obtiene con la implementación de cualquiera de los controladores desarrollados en la propuesta.

Con el fin de determinar que controlador es más eficiente para la optimización de la cámara frigorífica de la planta prototipo de refrigeración, se toma en cuenta los valores del consumo eléctrico en ambos controladores, por lo cual se denota que cualquiera resultaría útil, sin embargo, existe una diferencia considerable en los valores de consumo entre el controlador difuso y el controlador PID.

A continuación, la tabla 34 muestra la comparación del consumo eléctrico y el costo monetario entre el controlador PID y el controlador de lógica difusa.

COMPARACION DEL CONSUMO ELÉCTRICO		
	CONTROL PID	CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA
CONSUMO (KWH/MES)	451.2 KWH	300.8 KWH
COSTOS MONETARIOS (\$)	\$45.12	\$30.08

Tabla 34. Comparación del consumo eléctrico y costos monetarios entre controlador PID y controlador de lógica difusa.

Finalmente, se puede deducir en base a la tabla mostrada anteriormente que sistema de control resulta ser más eficaz, teniendo en cuenta el consumo en KWH de la planta prototipo además de los costos a pagar por mes, por lo cual se demuestra que el sistema desarrollado con un controlador de lógica difusa resulta ser más eficiente que un control PID, puesto que el sistema de control difuso brinda un tiempo de estabilidad mejor, disminuyendo el nivel de consumo eléctrico de la planta prototipo y su vez la reducción en el costo monetario a pagar mensualmente.

4.2.4 COMPARACIÓN ENTRE DATOS DE SIMULACIÓN Y DATOS REALES DE LA IMPLENETACIÓN DEL CONTROL PID Y CONTROL DE LÓGICA DIFUSA.

En base a las pruebas desarrolladas de los sistemas de control de forma simulada y con la implementación de la planta real, se obtiene una diferencia considerable entre sus valores como el tiempo de estabilización de la planta, consumo eléctrico en kWh y por ende los costos a pagar mensualmente.

A continuación, la tabla 35 y 36 detallan el porcentaje de error en función al tiempo de estabilización que existe entre los valores de simulación con respecto a los valores de implementación obtenidos del controlador PID y lógica difusa.

CONTROL PID			
	VALOR DE SIMULACIÓN	VALOR DE IMPLEMENTACIÓN	PORCENTAJE DE ERROR %
TIEMPO DE ESTABILIDAD (SEGUNDOS)	600	720	16.66%

Tabla 35. Porcentaje de error entre valores de simulación y valores de implementación del controlador PID

CONTROL DE LÓGICA DIFUSA			
	VALOR DE SIMULACIÓN	VALOR DE IMPLEMENTACIÓN	PORCENTAJE DE ERROR %
TIEMPO DE ESTABILIDAD (SEGUNDOS)	250	330	24.24%

Tabla 36. Porcentaje de error entre valores de simulación y valores de implementación del controlador de lógica difusa

En la tabla a continuación, se realiza la comparación de la abertura de la válvula de expansión entre valores de simulación y valores de implementación para ambos controladores.

TEMPERATURA	ABERTURA_VÁLVULA (CONTROL PID)			ABERTURA_VÁLVULA (CONTROL DIFUSO)		
	Valor Simulado	Valore de Implementación	Error %	Valor Simulado	Valore de Implementación	Error %
20°C	80%	85%	5.8%	80%	85%	5.8%
15°C	38%	42%	9.5%	50%	55%	9.1%
10°C	30%	33%	9.09%	35%	38%	7.8%
5°C	18%	21%	14.2%	35%	36%	2.7%
0 C	10%	11%	9.09%	17%	25%	32%
-5°C	2%	2%	0%	7%	9%	22%

Tabla 37. Comparación entre valores de simulación e implementación y porcentaje de error en relación a la apertura de la válvula de expansión.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Para identificar y establecer las reglas necesarias para el controlador difuso, fue necesario establecer valores lingüísticos para la variable de entrada y salida del sistema, además del rango de valores para cada función de membresía y gracias a esto se pudo definir 5 reglas difusas por lo cual se llega a la conclusión que para el control de temperatura de la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración, la implementación de 5 reglas difusas basadas en las funciones de membresía resultaría suficiente para el diseño del controlador y así lograr mantener el producto en un rango de temperatura estable.

Para la implementación del sistema de control difuso en la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración, se realizó el ajuste de valores mediante el cálculo de la ganancia proporcional en la fórmula de abertura de válvula expresada por el fabricante de full gauge para asimilar las reglas difusas establecidas en la simulación.

La implementación de la interfaz hombre - máquina HMI nos da la posibilidad de brindar al operario una interfaz en la que se puede visualizar y monitorear en tiempo real la lectura de datos generado por el sensor de temperatura.

Una vez realizadas las estimaciones necesarias, podemos deducir que ambos sistemas de control reducen considerablemente los niveles de consumo eléctrico de la cámara frigorífica del prototipo de refrigeración, sin embargo, según los resultados obtenidos se llega a la conclusión que el controlador de lógica difusa resulta ser más eficiente que el controlador PID, ya que brinda un tiempo menor de estabilidad y además un menor consumo de KWH por lo cual también genera un ahorro en los costos a pagar por mes.

RECOMENDACIONES

Antes de establecer las reglas difusas para el sistema de control, se recomienda tener previos conocimientos sobre los sistemas de refrigeración para así lograr establecer las reglas y condiciones necesarias para la implementación de un sistema de control difuso óptimo, ya que la lógica difusa se basa en conocimientos de expertos en el área a implementar.

Para el diseño e implementación del control difuso sobre la cámara frigorífica, se recomienda obtener la mayor cantidad de datos posibles para la identificación del modelo de la planta (función de transferencia), con el fin de obtener un mejor resultado durante el diseño e implementación del controlador.

Es muy importante tener en cuenta las configuraciones de red para la comunicación entre equipos (PC - PLC - HMI), verificando que se encuentren conectadas dentro de la misma red y así evitar errores durante el cambio de información.

Es necesario revisar que las funciones de membresía y reglas difusas estén establecidas en base a la lógica del funcionamiento de la planta, asegurando que verdaderamente estén actuando sobre ella realizando su acción de control y estabilización del sistema, caso contrario se presentarán dificultades en el que el control no esté actuando sobre la planta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Carmona Toboada, F. Casas García y C. Salazar Zarsa, Diseño de un sistema de control de temperatura basado en lógica difusa para la caldera eléctrica de Labinthap, México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- [2] I. I. C. Jiménez, "Lógica Difusa" Sistemas de información General, Localidad PAITA: Escuela de Educación Superior UNP, 2015.
- [3] INEC, «Estadísticas Económicas,» http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Estadisticas_economicas/descarga_INEC/Clasificaci%F3n+de+actividad+CIU+4.0.pdf, Ecuador.
- [4] V. Pachuco y K. Rodrigo, Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y software Labview, Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2017.
- [5] W. B. Tipanluisa Sarchi, Implementación de un módulo didáctico para control difuso de temperatura y caudal, Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.
- [6] J. C. Avilés Cortez, El control difuso de temperatura de una incubadora, La Paz - Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- [7] C. Yuliana, «La Lógica Difusa,» 28 Mayo 2001.
- [8] T. Recursos, «Control Automático,» Foro de Tecnología "Picuino".
- [9] C. Digitales, «Capítulo 3 "Lógica Difusa",» Universidad de la América Puebla, 2008 - 2018.
- [1] E. D. R. Villamar Garcés, EVALUACIÓN DE DOS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN EN PARALELO PARA REFRIGERACIÓN: CONTROL DIFUSO Y CONTROL DISCRETO EN ESPACIOS DE ESTADOS, Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral,

2014.

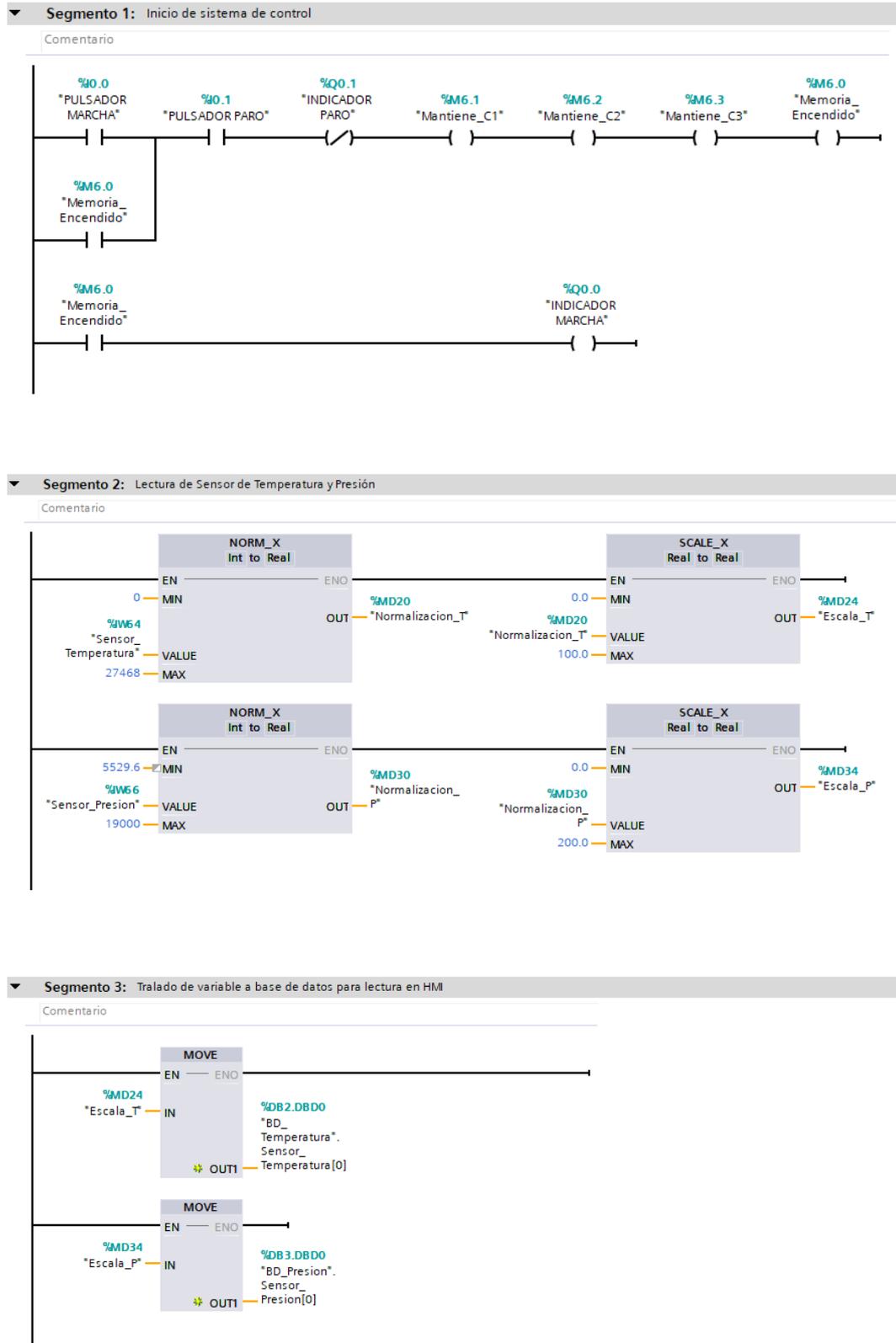
- [1 A. Aramburú y P. Figueroa, Diseño y simulación de control avanzado para un
1] sistema de refrigeración aplicado a la industria agroalimentaria, Piura:
Universidad de Piura, 2017.
- [1 V. H. Martínez Rojas, CONTROL DIFUSO DE UN SISTEMA DE
2] REFRIGERACIÓN PARA EL HOGAR, México D.F: Instituto Politécnico
Nacional, 2010.
- [1 S. Á. Caccire Melgarejo, Diseño del sistema de control PID para un
3] evaporador de leche, Lima - Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2010.
- [1 M. Fernández de Castillo, «Automatización de cámaras frigoríficas,»
4] *Manutención & Almacenaje.com (Revista de Logística)*, p. Opinión, 2018.
- [1 P. A. Gómez Neira, Estrategia para la implementación de un controlador
5] basado en lógica difusa en un PLC, Ciudad Bolívar - Bogotá D.C: Universidad
Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [1 J. A. Malagón Maldonado, Diseño e implementación de un sistema de
6] supervisión basado en control difuso para planta de temperatura T5553
ubicada en el laboratorio de control de la facultad tecnológica, Bogotá -
Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.

ANEXOS

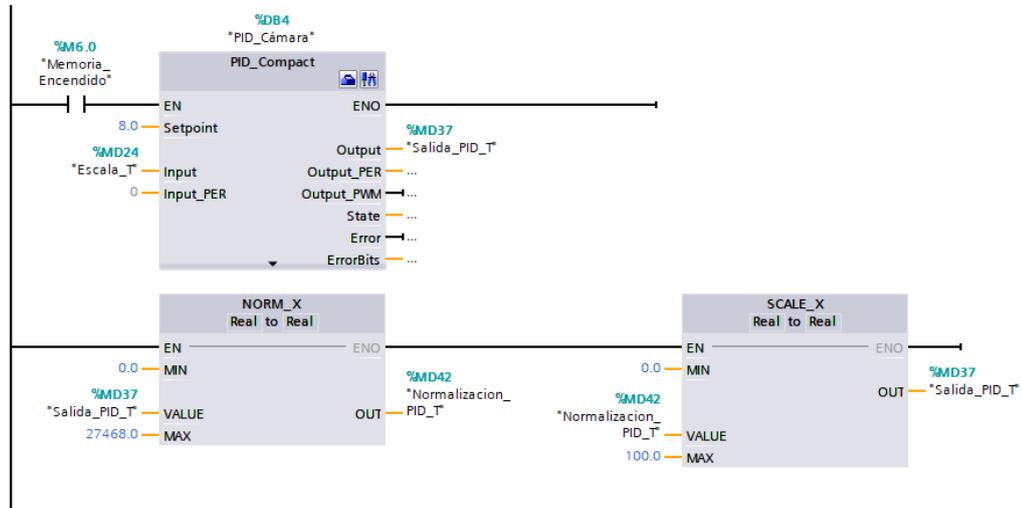
Anexos 1: Variables utilizadas durante la programación en el software TIA Portal.

Nombre	Tipo de dato	Dirección
Pulsador Marcha	Bool	%I0.0
Pulsador Paro	Bool	%I0.1
Indicador Marcha	Bool	%Q0.0
Indicador Paro	Bool	%Q0.1
Normalización_T	Real	%MD20
Escala_T	Real	%MD24
Sensor_Temperatura	Int	%IW64
BobinaContactor_1(220)	Bool	%Q0.2
BobinaContactor_2(220)	Bool	%Q0.3
BobinaContactor_3(110)	Bool	%Q0.4
Salida_PID_T	Real	%MD37
Normalizacion_PID_T	Real	%MD42
Escala_PID_T	Real	%MD46
Memoria_Encendido	Bool	%M6.0
Mantiene_C1	Bool	%M6.1
Mantiene_C2	Bool	%M6.2
Mantiene_C3	Bool	%M6.3
Normalizacion_P	Real	%MD30
Escala_P	Real	%MD34
Sensor_Presion	Int	%IW66
Salida_PID_P	Real	%MD68
Normalizacion_PID_P	Real	%MD70
Escala_PID_P	Real	%MD72

Anexos 2: Programación para el encendido y apagado de los compresores en el software TIA Portal.

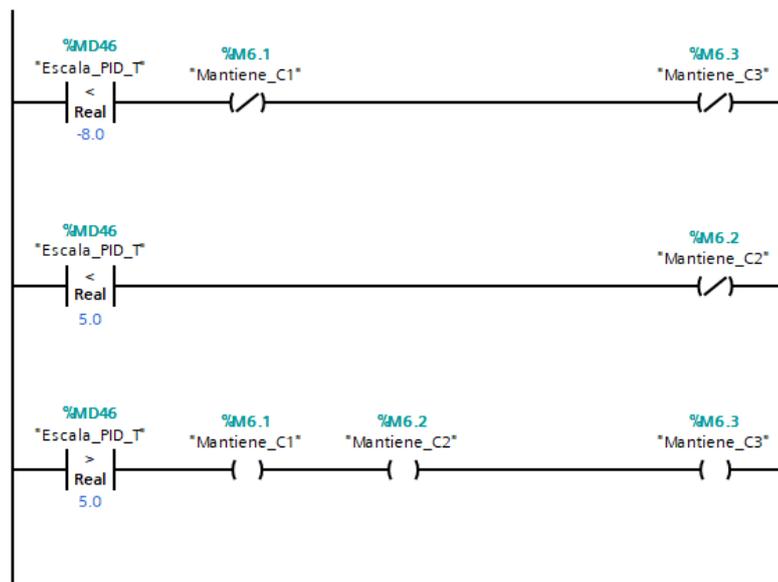


Segmento 1: Control PID de Temperatura



Segmento 2: Condiciones para encendido y apagado de compresores

Comentario



Anexos 3: Datos adquiridos para la función de transferencia de la cámara frigorífica y compresores.

TIEMPO	evaporador	ambiente	SOBRECALENT	TEMP_SUI	PRESION	
0	24,7	24,9		67,2	25,2	3
0,3	23,9	24,6		50,7	25,1	21
0,6	20,2	22,9		49,3	25	23
0,9	15,9	20,2		49,2	24,9	23
1,2	12,9	17,6		49,4	25,1	23
1,5	10,8	15,6		50,8	22,6	17
1,8	10,3	14,3		50,5	20,8	15
2,1	9	13		51,4	19,2	12
2,4	9,4	12,5		54	17,8	8
2,7	10,2	12,5		54,4	17	7
3	10,5	12,6		54,1	16,7	7
3,3	10,4	12,5		52,8	16,6	8
3,6	10,2	12,4		52,9	16,7	8
3,9	10	12,1		49,9	16,9	11
4,2	9,1	11,6		45,6	16,8	16
4,5	7,6	10,7		44,5	16,3	17
4,8	6,2	9,5		43,5	15,3	17
5,1	5,1	8,6		41,9	13,1	16
5,4	4,4	7,7		39,5	10,7	16
5,7	3,5	7		21,9	9,2	43
6	3,6	6,5		19,7	8,5	46
6,3	3,6	6,3		19,1	7,9	46
6,6	3,5	6,1		18,7	7,5	46
6,9	3,3	5,8		18,4	7,2	46
7,2	3,1	5,6		18,3	7,1	46
7,5	3	5,4		17,8	7,1	47
7,8	2,8	5,3		17,8	7,1	47
8,1	2,7	5		17,9	7,2	47
8,4	2,7	4,9		17,8	7,1	47
8,7	3,4	5,3		16,8	7,1	49
9	5,5	6,6		17,7	8	49
9,3	2,9	6,6		18,5	8,3	48
9,6	1,1	6,2		18,2	8	48
9,9	0,7	5,9		17,4	7,7	49
10,2	0,2	5,5		18,6	7,9	47
10,5	0,3	5,3		17,6	7,9	49
10,8	0,1	4,9		18	7,8	48
11,1	-0,2	4,7		17,9	7,7	48
11,4	-0,6	4,5		18,5	7,8	47
11,7	-0,6	4,2		18,4	7,7	47
12	-0,7	4		18,3	7,6	47
12,3	-0,9	3,8		18,3	7,6	47
12,6	-1	3,5		18,2	7,5	47
12,9	-1,1	3,4		18,7	7,5	46
13,2	-1,3	3,3		18,7	7,5	46
13,5	-1,3	3		18,6	7,4	46
13,8	-1,5	2,9		18,9	7,2	45
14,1	-1,8	2,7		18,9	7,2	45
14,4	1,2	4,2		19,3	7,6	45
14,7	-0,1	4		17,8	8,1	49
15	-1,3	3,6		19,4	8,2	46
15,3	-1,9	3,3		20,1	7,9	44
15,6	-2,8	2,9		20,4	7,7	43
15,9	-3,2	2,6		20,2	7,5	43
16,2	-3,6	2,3		21	7,3	41
16,5	-3,6	2		20,3	7,1	42
16,8	-3,8	1,9		20,5	6,8	41
17,1	-4	1,5		20,3	6,6	41
17,4	-4,1	1,4		20,2	6,5	41
17,7	-4,4	1,1		20	6,3	41

Anexos 4: Datos de control PID implementado.

TIEMPO	TEMP EVAPOR.	SETPOINT	valvula
0	19,3	-5	84,7
30	15,8	-5	45,2
60	13,7	-5	41,6
90	12,2	-5	37,9
120	11,1	-5	34,4
150	9,9	-5	32,7
180	9	-5	30,8
210	8,6	-5	28,4
240	7,9	-5	26,8
270	6,5	-5	24,6
300	5,5	-5	22,3
330	4,1	-5	19,4
360	2,9	-5	16,7
390	2	-5	14,8
420	0,9	-5	12,6
450	0,1	-5	11,5
480	-0,8	-5	10,3
510	-1,6	-5	9,5
540	-2,3	-5	7,3
570	-3,3	-5	6,4
600	-3,9	-5	6,1
630	-4,3	-5	5,7
660	-4,7	-5	5,3
690	-4,7	-5	4,7
720	-5	-5	2,4
750	-5	-5	2,1
780	-4,8	-5	2,2
810	-5	-5	2,7
840	-5	-5	2,9
870	-5	-5	2,9
900	-5,002	-5	3,1
930	-5	-5	2,6
960	-5	-5	2,2
990	1	-5	37,6
1020	0,1	-5	20,9
1050	-0,8	-5	14,5
1080	-1,6	-5	10,2
1110	-2,3	-5	8,9
1140	-3,3	-5	7,7
1170	-3,9	-5	6,5
1200	-4,6	-5	4,2
1230	-5	-5	2,9
1260	-5	-5	2,5
1290	-5,02	-5	2,8
1320	-5	-5	2,4
1350	-5	-5	2,4
1380	-5	-5	2,1
1410	-4,9	-5	1,8
1440	-5	-5	2,3
1470	-5	-5	2,6
1500	-5	-5	2,8
1530	-5	-5	2,7
1560	-5	-5	2,8
1590	-4,8	-5	2,3
1620	-5	-5	2,1
1650	-5	-5	2,5
1680	-5	-5	2,3
1710	-5	-5	2,6
1740	-5,03	-5	3,1
1770	-5	-5	2,8
1800	-5	-5	2,8
1830	-5	-5	2,7
1860	-5	-5	2,8

Anexos 5: Datos de control difuso implementado.

TIEMPO	TEMP EVAPORAI	SETPOINT	valvula
0	19,3	-5	84,6
30	15,8	-5	56,2
60	13,7	-5	45,4
90	10	-5	38,3
120	9,7	-5	34,6
150	7,3	-5	30,7
180	3,4	-5	28,9
210	0,8	-5	26,4
240	-2,6	-5	20,9
270	-4	-5	14,7
300	-4,7	-5	10,6
330	-5	-5	9,4
360	-5	-5	9,1
390	-5	-5	8,9
420	-4,8	-5	8,6
450	-5	-5	9,2
480	-5	-5	9,5
510	-5	-5	10,1
540	-5,002	-5	10,7
570	-5	-5	9,7
600	1	-5	28,4
630	-1,8	-5	24,9
660	-2,3	-5	22,5
690	-3,7	-5	17,6
720	-4,9	-5	13,3
750	-5	-5	10,5
780	-5	-5	9,9
810	-4,7	-5	9,1
840	-5	-5	8,6
870	-5	-5	8,6
900	-5	-5	9,2
930	-5,02	-5	9,9
960	-5	-5	10,2
990	-5	-5	9,4
1020	-5	-5	8,7
1050	-4,9	-5	7,9
1080	-5	-5	8,6
1110	-5	-5	8,8
1140	-5	-5	9,3
1170	-5	-5	8,9
1200	-5	-5	8,1
1230	-4,8	-5	7,3
1260	-5	-5	8,6
1290	-5	-5	9
1320	-5	-5	9,3
1350	-5	-5	9,6
1380	-5,03	-5	10,4
1410	-5	-5	10
1440	-5	-5	9,1
1470	-5	-5	8,8

Anexos 6: Elaboración de tablero eléctrico y de control.

