REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

MÓDULO DE ENTRENAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA APLICADO A UNA CALDERA INDUSTRIAL CON PRE- CALENTAMIENTO USANDO ENERGÍA SOLAR.

Tesis presentada por el Bachiller:

Centy Zapana, Enrique

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Electrónico

Asesor: Mgter. Delgado Barra, Lucy Ángela

Arequipa – Perú

2019

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS

Los que suscriben:

ING. LUCY ÁNGELA DELGADO BARRA.

ING. HENRY CHRISTIAN ZEGARRA GAGO.

Jurado Dictaminador del Borrador de Tesis titulado:

"MODULO DE ENTRENAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL CASCADA APLICADO A UNA CALDERA INDUSTRIAL CON PRE-CALENTAMIENTO USANDO ENERGÍA SOLAR"

Nombrados con Decreto Nº: 001.DEPIE.2019, **de fecha:** 12 de abril, 2019

Presentado por el (la) los Bachiller (es):

1. *ENRIQUE CENTY ZAPANA*
2.

cumple con emitir su dictamen:

- No registra observaciones, **es procedente** (X)
- Registra observaciones que deben ser subsanadas, según hoja adjunta ( )

Arequipa, 15 de abril del 2019

Ing. Lucy Ángela Delgado Barra.
Código Nº *1546*

Ing. Henry Christian Zegarra Gago.
Código Nº *2465*

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

DEDICATORIA

A mis padres, Ubaldo y Gloria por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron.

A mi esposa María Gracia del Pilar Becerra Bueno por creer en mí y ser el apoyo incondicional en mi vida, que con su amor y respaldo, me ayuda alcanzar mis objetivos.

Un gran amigo Ing. Juan Manuel Vizcarra Rodríguez por haberme dado la oportunidad brindándome la confianza para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

De manera especial a mi tutor de tesis Mgter. Lucy Ángela Delgado Barra por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de mi carrera universitaria, por guiar esta investigación y formar parte de otro objetivo alcanzado.

Finalmente, a la persona que más amo en este mundo, mi hijo Benjamín.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

PRESENTACIÓN

El presente trabajo se centra en la implementación, construcción y programación de un módulo de entrenamiento de un sistema en cascada aplicado a una caldera industrial con pre-calentamiento usando energía solar, con la finalidad de que el estudiante de la Escuela profesional de Ingeniería Electrónica se familiarice con él y pueda tener más experiencia al egresar de la carrera, el estudiante podrá controlar la temperatura como primer factor y segundo la presión logrando obtener un control automatizado en cascada.

A lo largo de esta tesis se puede encontrar una gran variedad de trabajos que han aportado información acerca de la construcción de la caldera, cálculos matemáticos, formulas, imágenes de componentes, datasheet, etc.

La siguiente tesis pretende contribuir en el conocimiento de los diferentes tipos de sintonización para controladores, así como la variedad de sensores, actuadores, PLC que se están utilizando en este proyecto.

Con el fin de conseguir este objetivo, el siguiente trabajo se ha estructurado en cinco capítulos.

En el capítulo I, se presenta el planteamiento metodológico donde se encuentra la identificación y descripción del problema, así como la investigación del mismo, hipótesis y objetivos generales.

En el capítulo II, nos encontramos con el marco teórico como identificación de partes de una caldera, su clasificación según sus características, tipos de sensores y actuadores así también como diferentes tipos de controles.

En el capítulo III, encontraremos todos los datos, componentes e instrumentos que se usaron para llevar a cabo la implementación del proyecto.

En el capítulo IV, presentaremos los resultados que se obtuvieron al implementar el proyecto, graficas de comportamiento del proceso y simulación.

En el capítulo V y final se presentan las conclusiones, recomendaciones, anexos y planos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

RESUMEN

Las industrias actuales como son la industria alimenticia, de bebidas, petrolera, entre otras, suelen hacer uso de calderas dentro de sus procesos ya sea para la generación de energía eléctrica, esterilización, calefacción, etc. y para ello suelen usar combustibles fósiles generando un alto consumo del mismo y a su vez contaminando el medio ambiente.

Además, se requiere que el personal que se encarga del control del proceso en las calderas tenga un conocimiento del mismo para que haya un funcionamiento correcto y óptimo del proceso de modo que no ocurran daños a la salud del personal, en los equipos y por ende perjuicios económicos para las industrias.

Es por ello que, en la presente tesis se propone implementar un módulo de entrenamiento que permita conocer el principio fundamental del funcionamiento de las variables de control de presión y temperatura del proceso en las calderas y a su vez proponer el uso de la energía solar como fuente de energía para el pre-calentamiento de la caldera. Con el uso de la energía solar se busca obtener un mayor rendimiento en la generación de vapor y de ese modo evitar las caídas de presión que afectan a los procesos y a su adecuado funcionamiento. Así mismo se buscó optimizar el consumo energético a través el uso de la implementación de un sistema de control PID en cascada como lógica de control para el proceso de las variables de presión y temperatura, las cuales son fundamentales en su funcionamiento.

Por lo que, se construyó un sistema de generación de vapor compuesto por una caldera básica, se implementó un módulo de entrenamiento de un sistema de Control PID en cascada para el control de presión y temperatura para la caldera y adicionó un economizador con energía solar para mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor.

Se puso en funcionamiento el módulo de entrenamiento construido y logró el control de las variables de presión y temperatura del proceso a través del sistema PID en cascada consiguiendo un proceso más eficiente y amigable al medio ambiente.

Palabras clave: caldera, control cascada, sintonización.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ABSTRACT

Current industries such as the food industry, beverage, oil, among others, often make use of boilers in their processes either for the generation of electrical energy, sterilization, heating, etc. and for this, they tend to use fossil fuels generating a high consumption of it and in turn polluting the environment.

In addition, it is required that the personnel in charge of the control of the process in the boilers have knowledge of the same so that there is a correct and optimal functioning of the process so that no damage occurs to the health of the personnel, in the equipment and therefore economic damages for industries.

That is why, in this thesis is proposed to implement a training module that allows to know the fundamental principle of the operation of the pressure and temperature control variables in the boiler process and in turn propose the use of solar energy as a source of energy for the pre-heating of the boiler. With the use of solar energy, it is sought to obtain a higher performance in the generation of steam and in this way avoid pressure drops that affect the processes and their proper functioning. Likewise, we sought to optimize energy consumption through the use of the implementation of a cascade PID control system as a control logic for the process of pressure and temperature variables, which are fundamental in its operation.

Therefore, a steam generation system consisting of a basic boiler was built, a training module was implemented for a cascade PID control system for pressure and temperature control for the boiler and a solar energy economizer was added to improve the efficiency of the steam generation system.

The built training module was put into operation and the control of the pressure and temperature variables of the process was achieved through the PID system in cascade, achieving a more efficient and friendly process to the environment.

Keywords: boiler, cascade control, tuning

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE

DEDICATORIA ii
PRESENTACIÓN iii
RESUMEN iv
ABSTRACT v
ÍNDICE vi
ÍNDICE DE FIGURAS xi
CAPITULO l 1
PLANTEAMIENTO METODOLOGICO 1
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA 1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 2
1.3. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN 3
1.4. OBJETIVOS 3
1.4.1. Objetivo principal 3
1.4.2. Objetivos específicos 3
1.5. VARIABLES 3
1.5.1 Variable independiente 3
1.5.2 Variables dependientes 3
1.6. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS 4
CAPITULO ll 5
MARCO TEORICO 5
2.1. CALDERA DE VAPOR 5
2.2. CLASIFICACIÓN DE CALDERAS 6
2.2.1. Según el uso 6
2.2.2. Según la presión de trabajo 6
2.2.3. Según la capacidad 7
2.2.4. Según el material de construcción 7
2.2.5. Según el tamaño 7
2.2.6. Según el volumen 7
2.2.7. Según la posición relativa del fluido a calentar y los gases de combustión: 7
2.3. PARTES PRINCIPALES DE UNA CALDERA 8
2.3.1. Alimentador: 8
2.3.2. Hogar: 8

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.3.3. Quemador: 8
2.3.4. Chimenea: 9
2.3.5. Tuberías: 9
2.4. ACCESORIOS 9
2.4.1. Válvulas de control 9
2.4.2. Intercambiador de calor 10
2.4.3. Trampas de vapor 10
2.4.4. Condensadores 10
2.5. CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE LA CALDERA 10
2.6. CONTROL 10
2.6.1. Control de presión de vapor 11
2.6.2. Control de temperatura 12
2.6.3. Control PI 12
2.6.4. Control PID 13
2.6.5. Control en cascada 15
2.6.5.1. Estructura del control en cascada 15
2.7. MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES EN CASCADA. 16
2.8. INSTRUMENTACIÓN 17
2.8.1. Sensores de nivel 17
2.8.2. Sensor de presión 18
2.8.2.1. Sensores de presión con tecnología de galgas extenso métricas 18
2.8.2.2. Sensores de presión capacitivos utilizan una cavidad de presión y una membrana para formar un condensador variable 19
2.8.2.3. Sensores de presión piezorresistivos 19
2.8.2.4. Sensores de presión resonantes 19
2.8.2.5. Sensores térmicos o de ionización 19
2.8.3. Sensor de temperatura 19
2.8.3.1. PT 100 20
2.8.4. Fuentes de poder 20
2.8.5. Válvulas 21
2.9. INGRESO DE GAS 21
2.10. ECONOMIZADORES PARA CALDERAS 21
2.11. ALIMENTACIÓN DE AGUA A LA CALDERA 22

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.12. VÁLVULAS DE SEGURIDAD PARA LIBERACIÓN DE PRESIÓN. 24
2.13. TWIDO SUITE 25
2.14. PLC.....25
2.14.1. Elementos principales del PLC.....25
2.14.1.1. Unidad central de proceso (CPU) 25
2.14.1.2. Entradas: 26
2.14.1.3. Módulos de salida 27
2.14.1.4. Fuente de alimentación 27
2.14.1.5. Memoria del PLC:.....27
2.15. CALENTADOR SOLAR.....28
CAPITULO III.....29
DESARROLLO DE INGENIERIA.....29
3.1. MEMORIA DESCRIPTIVA.....29
3.1.1. Diseño en cajetín de medidas de la caldera, grosor de lámina de metal, ubicación de niples para instalación de sensores y diseño de soporte de la caldera y quemador de alimentación de gas.....29
3.1.2. Prueba e instalación de sensores en la caldera (sensores de nivel, presión, temperatura) 29
3.1.3. Ubicación de equipos de control (PLC) y seguridad contactores, relay fuente de alimentación, dimensionamiento de cajetín y cableado. 29
3.1.4. Pruebas hidráulicas para detección de fugas en presión de tanque. 29
3.1.5. Instalación de tuberías y válvulas de control manual y automáticas. 29
3.1.6. Instalación de equipos de medición y registro visual de presión, válvula de escape de gas y agua caliente. 30
3.1.7. Instalación de economizador (terma solar) 30
3.1.8. Desarrollo de programa de control, así como lazos de control PI y PID en cascada. 30
3.1.9. Sintonización de bloques de control en cascada según procedimiento de Ziegel and Nichols 30
3.1.10. Registro e inicio de pruebas de funcionamiento. 30
3.1.11. Registro de niveles de producción de vapor de agua, medición de autonomía del módulo educativo. 30
3.1.12. Pruebas finales y puesta a punto. 30

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.2. DISEÑO DE LA CALDERA....30
3.3. ACTUADORES....36
3.4. SENSORES DE NIVEL:....38
3.5. SENSOR DE TEMPERATURA....40
3.6. TRASDUCTOR Pt 100....41
3.7. SENSOR DE PRESION....41
3.8. TERMA SOLAR....43
3.9. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL....46
3.10. DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL SECUNDARIO – CONTROL DE PRESIÓN....46
3.11. DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL PRIMARIO – CONTROL DE TEMPERATURA....55
3.12. USO Y CONFIGURACION DE TWIDO SUITE....58
3.13. PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE CALDERA....75
3.14. DESCRIPCION DE TABLERO....79
3.14.1 Pulsadores....79
3.14.2 PLC TWIDO....80
3.14.3 Módulo de expansión de PLC TWIDO....81
3.14.4 Transductor PT100....81
3.14.5 Interruptor termo magnético....82
3.14.6 Relé....82
3.14.7 Fuente de alimentación....83
3.14.8 Borneras o borne de paso....83
3.15. NORMAS DE TABLERO....84
3.16. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL....86
3.17. MODELAMIENTO MATEMÁTICO....87
3.18. CÁLCULO DE LA FUERZA DE LA VÁLVULA DE SEGURIDAD....88
3.19. GRAFCET DEL PROGRAMA....89
3.20. FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA EN LADDER DE LA CALDERA DE VAPOR....93
3.21. TABLA DE ASIGNACIÓN....95
CAPITULO lV....96
RESULTADOS....96

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.1. PRUEBAS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA 96
4.2. COMPORTAMIENTO DE LOS PROCESOS INDEPENDIENTES 101
4.2.1. Sintonización del Lazo interno – Presión – Control PI 101
4.2.2. Sintonización del Lazo externo – Temperatura – Control PID 103
4.2.3. Sintonización del Proceso de control completo en cascada PID – PI 105
4.3. PARAMETROS HALLADOS VS PARAMETROS MANIPULADOS 108
CONCLUSIONES 111
RECOMENDACIONES 114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 116
ANEXOS 118
ANEXO 1. PLANO P&D 118
ANEXO 2. PLANOS ELECTRICOS 120
ANEXO 3. DATA SHEET 129
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS 133
ANEXO 4. EJERCICIOS PRACTICOS 134
ANEXO 5. MANUAL DE OPERACIÓN DE CALDERA 153
ANEXO 6. GASTOS DE CONSTRUCCIÓN DE CALDERA 159

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Caldera acuotubular 8
Figura N° 2: Partes principales de una caldera 9
Figura N° 3: Ejemplo de bloques de producción de vapor de agua. 11
Figura N° 4: Diagrama de bloque de control PI 13
Figura N° 5: Comparación temporal de un controlador proporcional con un PI 13
Figura N° 6: Esquema de control PID 14
Figura N° 7: Diagrama de bloques de un control en cascada 15
Figura N° 8: Diagrama de bloques de sistema de medición y controladores básicos 16
Figura N° 9: Componentes de un colector plano para calentamiento solar de agua 22
Figura N° 10: Generador de vapor sin economizador 23
Figura N° 11: Generador de vapor con economizador 23
Figura N° 12: Disco de cierre 24
Figura N° 13: Tipos de válvulas de seguridad 24
Figura N° 14: Esquema básico de caldera de vapor 30
Figura N° 15: Relación para la construcción de un recipiente de presión 32
Figura N° 16: Relación para hallar el tipo de acero CS-1 33
Figura N° 17: Diseño de caldera de vapor 34
Figura N° 18: Modelo terminado de caldera de vapor 36
Figura N° 19: Válvula proporcional 37
Figura N° 20: Curvas de apertura de válvulas proporcionales 38
Figura N° 21: Medidas y diametros del sensor 39
Figura N° 22: Instalación de sensor de nivel 39
Figura N° 23: Funcionamiento de sensor de nivel 39
Figura N° 24: Pt100 41
Figura N° 25: Trasductor PT 100 41
Figura N° 26: Curva característica del sensor de presión 42
Figura N° 27: Trasmisor de presión 43
Figura N° 28: Medidas del cilindro 44
Figura N° 29: Medidas del panel solar 45
Figura N° 30: Sistema de pre-calentamiento 45
Figura N° 31: Diagrama de bloques de caldera con economizador 46
Figura N° 32: Sintonización por la ganancia critica en lazo cerrado 48
Figura N° 33: Fórmulas para hallar los parámetros de sintonización 48
Figura N° 34: Datos exportados de TWIDO a Excel 49
Figura N° 35: Creación de variables en MATLAB(R) 49
Figura N° 36: Ventana del comando IDENT 50
Figura N° 37: Importar datos 50
Figura N° 38: Ingreso de valor de entrada y salida 51
Figura N° 39: Obtención de la función de transferencia 51
Figura N° 40: Ingreso de cantidad de ceros y polos 52
Figura N° 41: Estimación en proceso 52

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura N° 42: Graficas de salida 53
Figura N° 43: Datos en el workspace 53
Figura N° 44: Función de transferencia de lazo interno 53
Figura N° 45: Características bloque PID 54
Figura N° 46: Autotuning de lazo interno 54
Figura N° 47: Función de transferencia lazo externo 55
Figura N° 48: Diagrama de bloques en simulink de control en cascada 55
Figura N° 49: Autotuning del sistema de control en cascada 56
Figura N° 50: Simulación de control PID en cascada con el paso del tiempo 57
Figura N° 51: Diagrama de bloques de control en cascada 57
Figura N° 52: Símbolo de TWIDO SUITE 58
Figura N° 53: Elección de idioma y programación 58
Figura N° 54: Primera interface de TWIDO SUITE 59
Figura N° 55: Ingreso de nombre del proyecto 59
Figura N° 56: Opciones de configuración 59
Figura N° 57: Primera opción DESCRIBE 60
Figura N° 58: Selección de modulo a usar 60
Figura N° 59: PLC en pantalla de trabajo 60
Figura N° 60: Elección de módulos de expansión usados en proceso 61
Figura N° 61: PLC y módulos de expansión en espacio de trabajo 61
Figura N° 62: Opción programa 61
Figura N° 63: Opción configure 62
Figura N° 64: Configuración de TWDAMM3HT 62
Figura N° 65: Cambio de parámetro en TWDAMM3HT 62
Figura N° 66: Opción programa 63
Figura N° 67: Selección de sección 63
Figura N° 68: Creación de sección 63
Figura N° 69: Selección de entradas y salidas 63
Figura N° 70: Diagrama de bloques de control en cascada 63
Figura N° 71: Selección de sensores de nivel bajo y alto 64
Figura N° 72: Selección de bloque PID 64
Figura N° 73: Creación de bloque PID 64
Figura N° 74: Configuración de primera parte del programa 65
Figura N° 75: Configuración de segunda parte del programa 65
Figura N° 76: Configuración PID0 65
Figura N° 77: Configuración PID0 opción general 66
Figura N° 78: Configuración PID0 opción input 66
Figura N° 79: Configuración PID0 opción PID 66
Figura N° 80: Configuración PID0 opción AT 67
Figura N° 81: Configuración PID0 opción output 67
Figura N° 82: Configuración PID1 67
Figura N° 83: Configuración PID1 opción input 68
Figura N° 84: Configuración PID1 opción PID 68

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 85: Configuración PID1 opción AT 68
Figura N° 86: Configuración PID1 opción output 69
Figura N° 87: Ingreso de opción DEBUG 69
Figura N° 88: Traspaso de programa de PC a PLC 69
Figura N° 89: Ventana RUN y STOP del programa 70
Figura N° 90: Opciones del programa 70
Figura N° 91: Opciones de programa en pantalla 70
Figura N° 92: Configuración DEBUG opción disconnect 71
Figura N° 93: Configuración DEBUG opción animación del programa 71
Figura N° 94: Configuración DEBUG opción tablas de animación 72
Figura N° 95: Configuración DEBUG opción ver PLC 72
Figura N° 96: Configuración DEBUG opción monitorear configuración de hardware 73
Figura N° 97: Configuración DEBUG opción monitorear configuración de software 73
Figura N° 98: Configuración DEBUG opción monitorear configuración descrita 74
Figura N° 99: Configuración DEBUG opción monitorear el comportamiento 74
Figura N° 100: Soporte y tanque de caldera 75
Figura N° 101: Instalacion de quemador y chispero 75
Figura N° 102: Casquete de PT100 76
Figura N° 103: Manometro de visualizacion de presión. 76
Figura N° 104: Trasductor de PT 100 76
Figura N° 105: Instalacion en caldera del Pt 100 77
Figura N° 106: Esquema de instrumentacion de sensores y actuadores. 77
Figura N° 107: Estructura y caldera en construccion 78
Figura N° 108: Montado final de sensores y equipos de caldera. 78
Figura N° 109: Tablero de control 78
Figura N° 110: Tablero de control de caldera parte externa 79
Figura N° 111: Pulsadores CHINT 79
Figura N° 112: Tablero de control de caldera parte interna 80
Figura N° 113: PLC TWIDO TWDLCAA24DRF 80
Figura N° 114: Módulo de expansión TWDAMM3HT 81
Figura N° 115: Conversor RTD PT100 a 4-20 mA 81
Figura N° 116: Interruptor temo magnético 82
Figura N° 117: Relé camsco 82
Figura N° 118: Fuente de alimentación 83
Figura N° 119: Borne de paso 83
Figura N° 120: Norma NEMA 250 84
Figura N° 121: Norma IEC 60529 85
Figura N° 122: Diagrama de bloques de control en cascada 86
Figura N° 123: Mapa conceptual de Instrumentos usados 87
Figura N° 124: Esquema de control de encendido de la caldera 88
Figura N° 125: Programa en lenguaje ladder 92
Figura N° 126: Prueba con Kp=5000 en 30 minutos con zoom 97
Figura N° 127: Prueba con Kp=5000 en 30 minutos sin zoom 97

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura N° 128: Prueba con Kp=6000 en 30 minutos con zoom 98
Figura N° 129: Prueba con Kp=6000 en 30 minutos sin zoom 98
Figura N° 130: Prueba con Kp=7000 en 30 minutos con zoom 99
Figura N° 131: Prueba con Kp=7000 en 30 minutos sin zoom 99
Figura N° 132: Prueba con Kp=8000 en 30 minutos con zoom 100
Figura N° 133: Prueba con Kp=8000 en 30 minutos sin zoom 100
Figura N° 134: Ingreso de valores de sintonizacion PI a programa TWIDO 102
Figura N° 135: Comportamiento de la salida PI en TWIDO en 45 min.....102
Figura N° 136: Comportamiento de la salida PI en TWIDO en 60 min.....102
Figura N° 137: Comportamiento de salida PI en TWIDO de 60 min con zoom 103
Figura N° 138: Ingreso de valores de sintonizacion PID a programa TWIDO 104
Figura N° 139: Comportamiento de salida PID en TWIDO en 30 min.....104
Figura N° 140: Comportamiento de salida PID en TWIDO en 60 min.....105
Figura N° 141: Comportamiento de salida PID en TWIDO en 60 min.....105
Figura N° 142: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de temperatura en 45 min 106
Figura N° 143: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de temperatura en 60 min 106
Figura N° 144: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de presión 106
Figura N° 145: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de presión en 45 min .107
Figura N° 146: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de presión en 60 min .107
Figura N° 147: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de presión 107
Figura N° 148: Tiempo de demora en llegar al Set Point de temperatura 108
Figura N° 149: Respuesta proceso de temperatura con parámatros recomendados 1 108
Figura N° 150: Respuesta proceso de temperatura con parámatros recomendados 2 109
Figura N° 151: Respuesta proceso de temperatura con parámatros recomendados 3 109
Figura N° 152: Respuesta proceso de temperatura con parámatros manipulados 1.....109
Figura N° 153: Respuesta proceso de temperatura con parámatros manipulados 2.....110
Figura N° 154: Respuesta proceso de temperatura con parámatros manipulados 2.....110

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPITULO I.

PLANTEAMIENTO METODOLOGICO

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Las principales industrias como son las industria alimentaria, hospitalaria, para la producción de bebidas alcohólicas, petrolera, entre otros [1], hacen uso de calderas dentro de sus instalaciones ya sea para calefacción, limpieza o en procesos petroquímicos. Así como también en la generación de corriente eléctrica considerando que actualmente se requiere del uso de tecnologías más amigables con el medio ambiente y a su vez rentables.

En la utilización de las calderas es esencial optimizar su consumo energético para lo cual se debe tener un control de las variables de presión y temperatura, ya que si no hay un debido control de dichas variables pueden acarrear desde elevados costos de producción hasta accidentes en las plantas; por lo tanto, pérdidas económicas para las industrias.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Es por ello que, es importante que las personas encargadas de operar calderas tengan un conocimiento de las variables que intervienen en los procesos que ocurren dentro de una caldera. Es así que, el principio fundamental de este proyecto de tesis es implementar un módulo de entrenamiento de las variables de control de presión y temperatura para un sistema de control en cascada, logrando un mejor desenvolvimiento en el uso del sistema de control, y a su vez conseguir una optimización de la energía que se utiliza para el calentamiento del agua con la finalidad de no tener desperdicio de combustible y conseguir un proceso más amigable con el medio ambiente.

Por lo que, se propone utilizar un pre-calentamiento para lograr un mayor rendimiento en la generación de vapor y así evitar caídas de presión mediante el uso de energía solar siendo un sistema mucho más ecológico y por ende, minimizando el impacto al medio ambiente.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para conseguir optimizar el consumo energético en la generación de vapor utilizando una caldera industrial, es necesario conocer sus principales parámetros de trabajo, así como los tipos de control implementados en la industria. Uno de esos tipos implementados es el control en cascada donde la salida de un controlador de realimentación es el punto de ajuste para otro controlador de realimentación.

La capacitación del personal encargado del control del proceso es un punto importante para el correcto funcionamiento de las calderas, es por eso que se hace necesario implementar un módulo de entrenamiento para el sistema de control del mismo.

La utilización de este módulo de entrenamiento permitirá conocer los parámetros más importantes y el procedimiento a seguir para tener una rápida respuesta de las acciones que se deben tomar para corregir las condiciones del proceso. Es por ello que se plantea usar un PID en cascada como lógica de control para el proceso.

Para mejorar el rendimiento de la caldera se está considerando que el agua de alimentación sea previamente calentada para evitar fluctuaciones en el proceso de generación de vapor; es por ello que para el pre-calentamiento se utilizará un proceso de calentamiento mediante el uso de un panel solar. De ese modo se obtendrá una mayor eficiencia de los recursos y un proceso más amigable con el medio ambiente.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

1.3. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente tesis se pretende implementar un Módulo de Entrenamiento para el Control de las Variables de Presión y Temperatura a Través de un Sistema de Control en Cascada de una Caldera que posee un Pre-Calentamiento del Agua Utilizando Energía Solar. Se toma la propuesta de hacer un módulo de entrenamiento con la finalidad que los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica de Santa María tengan a su disposición dicho módulo y adquieran experiencia en procesos reales y de esa forma que conozcan el fundamento de la implementación de sensores y control de calderas.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo principal

Implementar un módulo de entrenamiento de un sistema de control en cascada aplicado a una caldera industrial con pre-calentamiento usando energía solar.

1.4.2. Objetivos específicos

- Construir un sistema de generación de vapor.
- Implementar un módulo de entrenamiento de un sistema de Control PID en cascada para el control de presión y temperatura para la caldera.
- Implementar un economizador con energía solar para mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor.

1.5. VARIABLES

1.5.1 Variable independiente

Módulo de entrenamiento para el sistema de control en cascada.

1.5.2 Variables dependientes

Presión : Rango de 0 a 16 Bar

Salida de 4 a 20 mA

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Temperatura : Rango de 0 a 200 ℃

Salida de 4 a 20 mA

1.6. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Se mencionan a continuación algunos antecedentes a la presente investigación:

Según la cita [2] nos muestra el diseño y automatización de una caldera realizando controles PID utilizando un PLC SIEMENS, modelo SIMATIC S7-224U, realizando un control sobre la temperatura del agua de alimentación, temperatura del petróleo, nivel de agua, presión, válvulas y velocidad del motor soplador, en la Universidad Pedro Ruiz Gallo en la ciudad de Lambayeque – Perú. Se simularon los resultados y se mostró que era factible este tipo de control.

Según la cita [3] nos muestra el diseño y construcción del sistema de control para una caldera realizando control PID en cascada y difuso siendo monitorizado por el interfaz LABVIEW, realizando un control sobre la temperatura, presión, válvulas de control, en el Instituto Politécnico Nacional en el País de México D.F. Se simularon los resultados y se mostró que era factible este tipo de control.

Según la cita [4] nos muestra el control y automatización de los sistemas de un caldero realizando un control PID sobre la temperatura usando un PLC MODICON, también realiza mediciones sobre la presión y el nivel de la caldera, en la Universidad Nacional de Ingeniería Lima – Perú. Se simularon los resultados y se mostró que este tipo de control redujo costos, tiempo y calidad del productor por lo cual era factible este tipo de control.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPITULO ll.

MARCO TEORICO

2.1. CALDERA DE VAPOR

Las calderas son dispositivos utilizados con la finalidad de calentar agua o generar vapor a una presión muy superior a la atmosférica [5]. Las calderas industriales suele poseer un compartimiento donde el combustible es depositado y consumido y además un segundo compartimiento donde el agua es depositada que luego se transformará en vapor [5] a través de la transferencia de calor del combustible al agua [1], [5], [6]. Estos equipos se emplean principalmente en la rama industrial para la generación de energía eléctrica, como intercambiadores de calor, esterilización, industria alimentaria, fermentaciones, etc. [6], [1].

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Una máquina de vapor pertenece a la familia de los convertidores de energía química (caldera de vapor) el calor es transformado en energía mecánica. En la mayor parte de los casos la producción de calor se efectúa por combustión. Las máquinas de vapor se clasifican como una máquina de motor térmico de combustión externa, ya que el combustible se quema fuera del cuerpo de la máquina. Las máquinas de combustión externa utilizan un fluido (en este caso vapor de agua) para transmitir la energía calorífica producida. En la caldera la energía calorífica calienta el agua hasta convertirla en vapor, el cual se expande y genera presión.

Cabe indicar que el vapor es uno de los estados del agua pura, que se encuentra en forma de gas. Cuando éste se enfría y condensa se le considera agua pura y es denominado condensado. Cuando se va produciendo el condensado este contiene una considerable cantidad de calor, el cual puede ser aprovechado.

2.2.CLASIFICACIÓN DE CALDERAS

Una caldera o generador de vapor es un equipo destinado a la producción de vapor a partir de agua líquida. La energía necesaria para producir el vapor de agua se obtiene de las reacciones de combustión de un combustible sólido, líquido o gaseoso con el oxígeno presente en el aire [7].

Los diferentes tipos de calderas pueden ser clasificadas según diversos puntos de vista como: [1], [6]

2.2.1. Según el uso

Pueden ser:

- Móviles: Como las locomotoras o buques.
- Fijas: Pueden ser industriales, domiciliarias o comerciales.

2.2.2. Según la presión de trabajo

Pueden ser:

- Calderas de baja presión: De 0 a 450 psi
- Calderas de mediana presión: De 450 a 950 psi
- Calderas de alta presión: >950 psi

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.2.3. Según la capacidad

Estas se dividen según la categoría en:

- Categoría A: Las que generan más de 7500 kg./h de vapor o tenga una superficie de calefacción > 200 m^2
- Categoría B: Las que generan más de 2000 kg./h de vapor o tenga más de 60 m^2
- Categoría C: Generen más de 70 kg./h o superficie de calefacción sea superior a 2 m^2.
- Categoría D: Calderas que generen menos de 70 kg/h y tenga menos de 2 m^2 de superficie de calefacción.

2.2.4. Según el material de construcción

Pueden ser de cobre, acero, bronce, hierro, acero común, acero inoxidable, aceros especiales.

2.2.5. Según el tamaño

Pueden ser pequeñas, medianas, livianas, grandes e industriales.

2.2.6. Según el volumen

- De gran volumen de agua (más de 150 L) por metro cuadrado de superficie de calefacción.
- De mediano volumen de agua (entre 70 y 150 L por m^2).
- De pequeño volumen de agua (menos de 70 L por m^2).

2.2.7. Según la posición relativa del fluido a calentar y los gases de combustión:

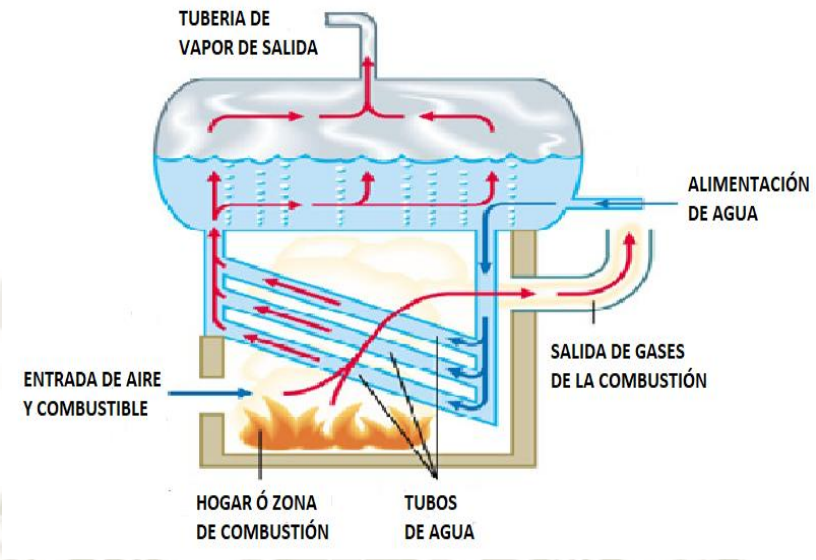
- Pirotubulares: Conocidas como calderas de tubos de fuego ya que los gases combustibles fluyen dentro de los tubos y el agua circula por el exterior de dichos tubos.
- Acuotubulares: Conocidas como tubos de agua, en este caso el agua circula por dentro de los tubos y los gases por el exterior de los mismos. Este tipo es el que más se asemeja en el presente proyecto de tesis.

  En la Figura N° 1 se presenta el funcionamiento de una caldera acuotubular para la producción de vapor.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 1: Caldera acuotubular



Fuente: http://calacutubular.blogspot.pe

2.3.PARTES PRINCIPALES DE UNA CALDERA

Las calderas en general presentan las siguientes partes:

2.3.1. Alimentador:

Es el lugar o zona específica para el abastecimiento de combustible a la caldera. Los combustibles pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos como por ejemplo se suele usar el carbón, combustible o gas.

2.3.2. Hogar:

Es una cámara donde se efectúa la combustión, la cámara confina el producto de la combustión y puede resistir las altas temperaturas que se presentan y las presiones que se utilizan en el proceso.

2.3.3. Quemador:

Es el componente encargado de la mezcla y de dirigir el flujo de combustible y aire de tal forma que se asegure el encendido y la combustión completa.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

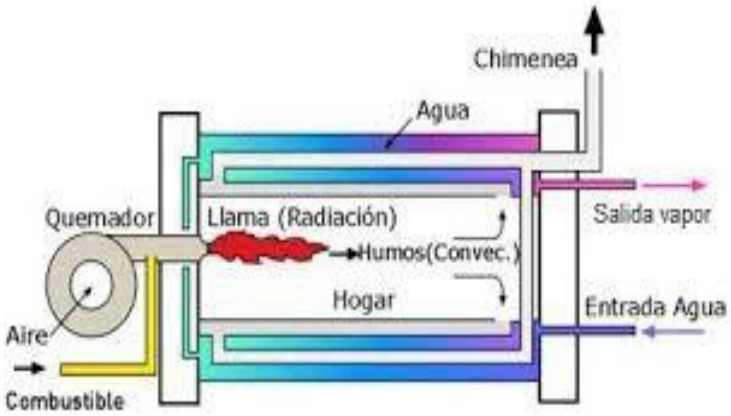
2.3.4. Chimenea:

Es el conducto vertical por el cual se expulsan los humos producto del proceso de la combustión. La salida de humo ocurre por la diferencia de peso entre los humos y el aire lo que ocasiona la salida de los mismos a una determinada velocidad.

2.3.5. Tuberías:

Es todo el sistema de redes de tubos por donde circula el agua y el vapor, estas deben estar convenientemente aisladas y el agua que circula en ellas debe estar tratada para evitar fallas o roturas.

Figura N° 2: Partes principales de una caldera



Fuente: http://boilersvalves.blogspot.com/2010/04/partes-de-una-caldera.html

2.4.ACCESORIOS

Las máquinas de vapor utilizan distintos tipos de válvulas para controlar mejor los ingresos y salida de agua, gas y vapor. Estos equipos se denominan accesorios, entre los principales son:

2.4.1. Válvulas de control

Estos dispositivos se encargan de controlar los niveles de agua y vapor que se requieren y producen en la caldera.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.4.2. Intercambiador de calor

Este dispositivo sirve para controlar, transferir y distribuir la temperatura de los fluidos, siendo un apoyo esencial en la producción y distribución de vapor, agua sobrecalentada y agua condensada.

2.4.3. Trampas de vapor

Estos dispositivos permiten descargar condensados sin que escape vapor vivo.

2.4.4. Condensadores

Estos dispositivos sirven para capturar y recircular el vapor que se condensa (agua) hacia la caldera o en determinados usos hacia alguna parte del proceso.

2.5.CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE LA CALDERA

Existen diversos tipos de control para el funcionamiento de las calderas, los cuales deben ser elegidos de acuerdo a la función que realizará la caldera.

Para realizar el control de la caldera se suele utilizar instrumentos eléctricos y electrónicos; dentro de estos se tiene a los actuadores, sensores, motores, variadores de velocidad, y diferentes equipos que entran en la clasificación de instrumentos.

2.6.CONTROL

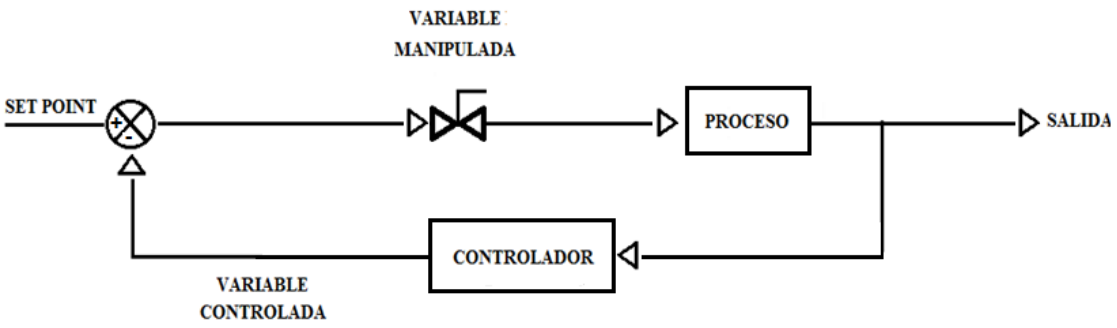
Existen diferentes formas de realizar el control en un proceso, depende de las características del proceso, que en nuestro caso es obtener un flujo de vapor calentado en un envase cerrado sometido a presión y calentado de forma externa.

Para realizar el control nos apoyaremos en la siguiente grafica que indica los bloques que intervienen en el proceso de producción de vapor de agua caliente.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 3: Ejemplo de bloques de producción de vapor de agua.



Fuente: Elaboración propia

Se tiene un valor de consigna o un SET POINT, el cual es el valor al que se desea llegar, desde allí ingresa a un bloque sumador que toma una muestra de la salida del proceso y la resta del valor de consiga. El resultado debe llegar nuevamente al proceso pasando por la variable manipulada que regulará el ingreso de un fluido (gas para nuestro caso) que incrementa o disminuye el calor en el sistema, el porcentaje de apertura de la Variable Manipulada es verificada por el controlador.

Para realizar este trabajo existen controladores en lazo abierto o lazo cerrado, en este caso utilizaremos un lazo cerrado, el bloque controlador puede ser un control PID o algún otro tipo de control no clásico como control optimo, control adaptativo, inteligente o uno basado en redes neuronales.

2.6.1. Control de presión de vapor

Por lo general en calderas de vapor, la presión del vapor a la salida suele ser la variable controlada y esta actúa directamente sobre la operación del mecanismo proporcional, accionando dispositivos de apertura de válvulas, parada o arranque de motores o bombas en el proceso.

Los controladores de presión para vapor pueden ser de posición proporcional o proporcional más flotación. En nuestro caso por ser una caldera que opera a bajas presiones y que tiene un volumen de almacenamiento considerable de agua y vapor, el tipo proporcional es el más recomendable.

En el controlador, el movimiento es directamente proporcional al cambio de presión (en los límites de alta y baja presión). El controlador proporcional más flotación se utiliza en calderas de presión alta y pequeña capacidad [8].

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.6.2. Control de temperatura

En este control, la presión final de vapor se utiliza como variable de proceso del regulador secundario y una medición de la temperatura a la alimentación de la caldera se utiliza como la variable de proceso del regulador primario.

Con esta nueva medición, las modificaciones en la temperatura de la alimentación en la caldera tendrán un reflejo más inmediato en el control, por lo que, el ajuste del regulador secundario puede hacerse para proporcionar una respuesta bastante rápida. Como en todo lazo en cascada, el ajuste del regulador primario deberá ser más lento y así brindar un mayor tiempo a la correcta regulación en el secundario y evitar que se sature.

Como la temperatura es necesaria normalmente hasta una determinada carga de caldera, suele ser habitual que exista una válvula de corte aguas arriba de la válvula de control para evitar que ésta trabaje como tal.

2.6.3. Control PI

Los controladores PI actúan únicamente con acción integral, siempre en combinación con reguladores de una acción proporcional, complementándose los dos tipos de reguladores, primero entra en acción el regulador proporcional (instantáneamente) mientras que el integral actúa durante un intervalo de tiempo (Ti= tiempo integral).

La función de transferencia del bloque de control PI responde a la ecuación:

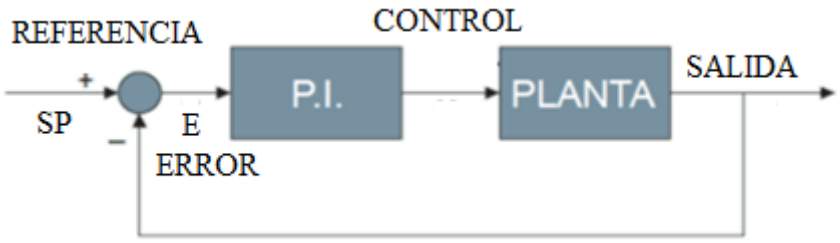
$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = Kp * (\frac{1}{Ti*s} + 1) \qquad (2.1)$$

Donde Kp y Ti son parámetros que se pueden modificar según las necesidades del sistema. Si Ti es grande la pendiente de la rampa, correspondiente al efecto integral será pequeña y, su efecto será atenuado, y viceversa.
A continuación, tenemos un diagrama de bloques incluyendo el controlador PI

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

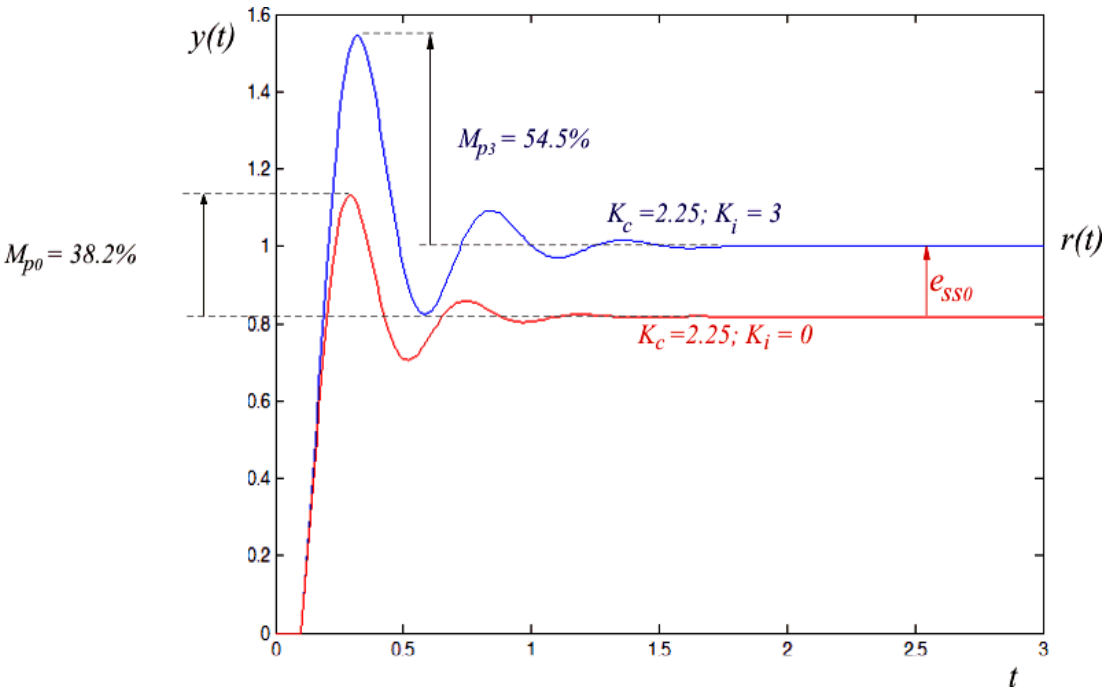
Figura N° 4: Diagrama de bloque de control PI



Fuente: Elaboración Propia

En la figura N° 5 realizamos la comparación de la respuesta del sistema con parámetros de k_c=2, ambos con ganancia proporcional de k_c= 2.25 pero con ganancias de k_i=0 y otra de k_c=3, ambos casos frente a una señal escalón unitario.

Figura N° 5: Comparación temporal de un controlador proporcional con un PI



Fuente: [9]

2.6.4. Control PID

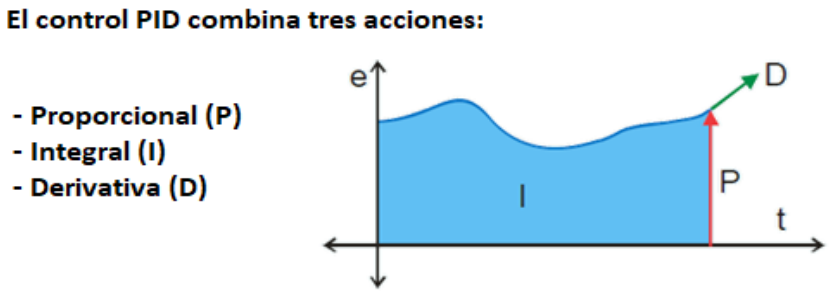
El controlador PID es una estructura de control para la cual la señal de control en el proceso se expresa en función del error, por la expresión estándar.

$$e(t) = y_{ref}(t) - y(t) \tag{2.2}$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 6: Esquema de control PID



Fuente: [10]

En la Figura 6 se muestra el esquema de Control PID, ésta es la estructura de control más usada en el medio industrial. Las letras PID corresponden a las acciones: Proporcional, Integral y Derivativa

PID es un sistema de regulación que trata de aprovechar las ventajas de cada uno de los controladores de acciones básicas. De tal modo que, si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral; mientras que, si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa.
Tiene la ventaja de ofrecer una respuesta muy rápida y una compensación de la señal de error inmediata en el caso de perturbaciones. Presenta el inconveniente de que este sistema es muy propenso a oscilar y los ajustes de los parámetros son mucho más difíciles de realizar.

El regulador viene dado por la siguiente ecuación:

$$y(t) = Kp * e(t) + Kp * t_d * \frac{de(t)}{dt} + Kp * \frac{1}{t_i} * \int e(t)\,dt \qquad (2.3)$$

Que en el dominio de Laplace, será:

$$Y(s) = Kp * E(s) + Kp * Td * s * E(s) + Kp * \frac{1}{T_i * s} * E(s) \qquad (2.4)$$

Y por tanto la función de transferencia del bloque de control PID será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = Kp\,(\alpha + T_d * s + \frac{1}{T_i * s}) \qquad (2.5)$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Donde Kp, Ti y Td son parámetros ajustables del sistema.

2.6.5. Control en cascada

Se define como la configuración donde la salida de un controlador de realimentación es el punto de ajuste para otro controlador de realimentación, por lo menos. Es decir, el control de cascada involucra sistemas de control de realimentación o circuitos que estén ordenados uno dentro del otro.

Existen dos propósitos para usar control cascada:

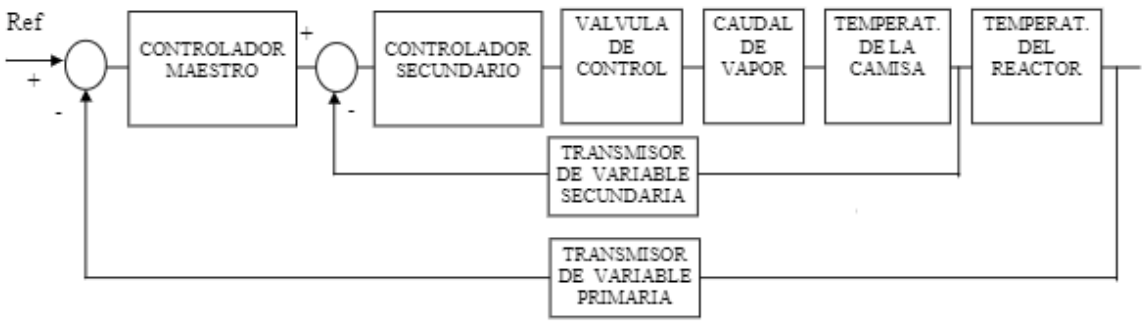
- Eliminar el efecto de algunas perturbaciones haciendo la respuesta de regulación del sistema más estable y más rápido.
- Mejorar la dinámica del lazo de control.

2.6.5.1. Estructura del control en cascada

La estructura de control en cascada tiene dos lazos: un lazo primario con un controlador primario también llamado "maestro" K1(s) y un lazo secundario con un controlador secundario también denominado "esclavo" K2(s).

Siendo la salida del primario el punto de consigna del controlador secundario y la salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso.

Figura N° 7: Diagrama de bloques de un control en cascada



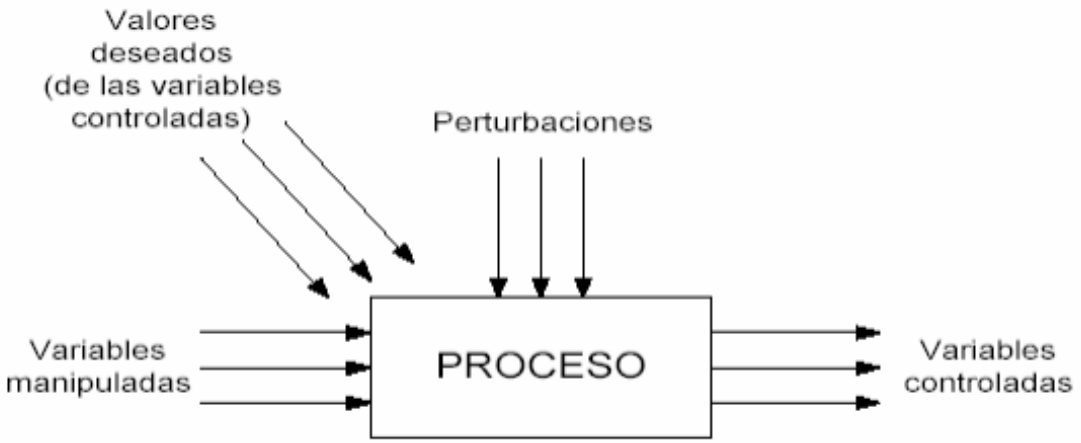
Fuente: Estructuras de Control

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 8: Diagrama de bloques de sistema de medición y controladores básicos



Fuente: Gonzalo Reyes, Academia de Instrumentación

2.7.MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES EN CASCADA

El control en cascada se utiliza frecuentemente en el control de procesos, porque permiten obtener un mejor desempeño en comparación con un lazo de control realimentado simple en procesos lentos y en donde la perturbación afecta principalmente a la variable manipulada.

- Las perturbaciones en el lazo interno, son corregidas antes de que tengan efecto sobre la variable controlada.
- Esta corrección es mucho mayor, cuando la respuesta del lazo interno es más rápida que el lazo primario.
- La velocidad de respuesta del sistema se mejora, si el lazo secundario tiene una respuesta más rápida que la planta interna.
- Las variaciones en los parámetros de la planta interna se corrigen en su propio lazo.

En Alfaro et al. (2008) se presenta un método de sintonización analítica utilizando controladores PI/PID de dos grados de libertad, de manera que se garantiza una respuesta no oscilatoria, tanto del lazo interno como del lazo externo.

Así mismo, no requiere de una prueba intermedia usual en la sintonización de los controladores de un esquema de control en cascada.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.8.INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación se encarga de mantener funcionando el proceso de manera óptima a través de elementos que sirven para medir, convertir, transmitir, controlar o registrar las variables.

Los componentes principales de la instrumentación son:

- Transmisor: sirve para recibir la señal del sensor y convertirla a un estándar de 4-20 mA.
- Registrador: Registra el estatus del proceso.
- Salida del controlador: Controla la señal de salida para poder mandarla al actuador de manera que mantenga la variable a controlar lo más cercano posible al Set Point.

Los sensores son dispositivos que miden una magnitud física y la transforma en una señal, como por ejemplo miden la temperatura, la longitud, la fuerza, presión, etc. En la mayoría de los casos la señal es eléctrica, aunque también puede ser óptica.

Entre los sensores de interés se tiene:

2.8.1. Sensores de nivel

Un sensor de nivel flotante permite detectar el nivel de un líquido que ha llegado a la altura en donde éste se encuentra. Está constituido internamente por un interruptor magnético tipo Reed Switch y un elemento magnético tipo imán (ubicado en el brazo móvil flotante).

Cuando el nivel del líquido se aproxima a la ubicación del sensor (montaje lateral), el brazo flotante se comienza a mover siguiendo la elevación del líquido, llegando al punto de alinearse y activar el Reed Switch, el cual pasará de un estado Normalmente Abierto (NA o NO) a uno Normalmente Cerrado (NC).

El sensor está compuesto enteramente por material de tipo polímero, siendo apto para diferentes medios ácidos o alcalinos, por lo que puede ser utilizado como detector de niveles máximos o mínimos, para la protección contra el rebalse o vaciado en tanques con agua o con productos líquidos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Las características de los sensores de nivel son:

- Tensión Máxima de trabajo: 220 VAC o 110VDC
- Corriente Máxima: 0.1 A
- Impedancia de Contacto: < 100 m Ω
- Capacidad de potencia: 10 W
- Temperatura de operación -10 a 50 °C
- Presión de trabajo: < 1.0 MPA
- Material de construcción: Polipropileno (PP)

2.8.2. Sensor de presión

Para medir la presión se usan los sensores de presión que son instrumentos compuestos por un elemento detector de presión con el que se determina la presión real aplicada al sensor (utilizando distintos principios de funcionamiento) y por otros componentes que convierten esta información en una señal de salida.

La presión es la fuerza que ejerce un líquido o un gas sobre una superficie y normalmente se mide en unidades de fuerza por unidad de superficie. Las unidades que se utilizan habitualmente son: pascal (Pa), bar (bar), N/mm^2 o psi (libras por pulgada cuadrada).

Cabe indicar que los sensores de presión utilizan distintas tecnologías para proporcionar resultados precisos, como son [11]:

2.8.2.1.Sensores de presión con tecnología de galgas extenso métricas

Tienen un elemento de detección de la presión al que se adhieren galgas extenso métricas metálicas o en el que se aplican galgas de película estrecha mediante pulverización. Este elemento de medición puede ser una membrana o, en el caso de los cuerpos de medición con galgas de lámina metálica, también se puede utilizar un elemento de tipo tubular. Este tipo tubular monolítico permite conseguir un aumento de la rigidez y de la capacidad de medir presiones muy elevadas (hasta 15.000 bar). La conexión eléctrica normalmente se establece a través de un puente de Wheatstone, que proporciona una buena amplificación de la señal y resultados de medición precisos y constantes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.8.2.2. Sensores de presión capacitivos utilizan una cavidad de presión y una membrana para formar un condensador variable

La membrana se deforma cuando se aplica presión y la capacidad se reduce de manera proporcional. Este cambio en la capacidad se mide eléctricamente y se correlaciona con la presión aplicada. Este tipo de sensores están limitados a presiones bajas, hasta alrededor de 40 bar.

2.8.2.3. Sensores de presión piezorresistivos

Compuesto por una membrana (principalmente de silicio) con galgas extenso métricas integradas que detectan la deformación derivada de la presión aplicada. Estas galgas extenso métricas se suelen configurar formando el puente de Wheatstone y así poder reducir la sensibilidad e incrementar la potencia de la salida. Debido al material utilizado, pueden utilizarse hasta presiones en torno a 1000 bar.

2.8.2.4. Sensores de presión resonantes

Utilizan los cambios en la frecuencia de resonancia en un mecanismo de detección para medir el esfuerzo provocado por la presión aplicada.

2.8.2.5. Sensores térmicos o de ionización

No emplean un cuerpo de medición, sino que la miden a partir de cambios en la conductividad térmica como consecuencia de cambios en la densidad de un caudal de partículas cargadas.

2.8.3. Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura pueden ser de diferentes tipos y miden la temperatura al detectar algún cambio en una característica física. Pueden ser: termopares, dispositivos de temperatura resistivos (RTD y termistores), radiadores infrarrojos, dispositivos bimetálicos, dispositivos de dilatación de líquido, y dispositivos de cambio de estado.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.8.3.1.PT 100

Un Pt100 es un sensor de temperatura que contiene un alambre de platino que a 0 °C marca 100 ohm y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El incremento de la resistencia no es lineal, pero si creciente y característico del platino de tal forma que con el uso de tablas se puede encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. Son útiles para bajas temperaturas (-100 a 200 °). Se puede obtener una alta precisión de hasta una décima de grado con la ventaja que el Pt100 no se descompone gradualmente entregando lecturas erróneas, ya que normalmente se abre, con lo cual el dispositivo medidor detecta inmediatamente la falla del sensor y da aviso a la válvula.

Una válvula de control debe permitir que su apertura sea lineal con la señal de control. Esto se cumple básicamente para la mayoría de las válvulas salvo que se programe el actuador para otro tipo de respuesta.

Las válvulas de control de 2 vías convencionales presentan una curva característica de apertura/Kv (denominada isoporcentual o lineal) que al combinarse con la curva caudal/potencia de la unidad terminal, trata de conseguir que la emisión de potencia sea lineal con la señal de control recibida.

Tradicionalmente se ha considerado que las unidades terminales pueden presentar 2 tipos de curva caudal/emisión:

- Lineal para las unidades terminales agua/agua, se busca que la curva apertura/caudal de la válvula sea lineal
- Logarítmica para las aire/agua (baterías de fancoils y de climatizadores), en este caso se busca que la curva sea isoporcentual (exponencial) para compensar la logarítmica de la unidad terminal [12].

2.8.4. Fuentes de poder

La Fuente de Poder o Fuente de Alimentación es un componente electrónico que sirve para abastecer de electricidad a equipos. Un nombre más apropiado sería el de transformador, porque convierte o transforma corriente alterna (AC) en corriente directa (DC), y baja el voltaje de 220 voltios AC a 24 v voltios DC, necesarios para la alimentación de componentes.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.8.5. Válvulas

Una válvula es un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación de líquidos o gases (desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos) mediante una pieza movible que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos. Las válvulas son unos de los instrumentos de control más esenciales en la industria.

2.9.INGRESO DE GAS

El combustible necesario para utilizar la caldera es el gas debido a que este tipo de combustible tiene unas propiedades caloríficas definidas. Además, con los datos del poder calorífico del combustible y el calor requerido por la mini caldera se puede encontrar la masa de combustible utilizando la siguiente relación.

$$M_{comb=Q_{total/LHV}} \tag{2.6}$$

Donde la relación de aire combustible requerido se toma como el 20% de exceso para condiciones normales de gas.

El quemador de la caldera es de distribución lineal, muy comunes en hornos, para encontrar el área de trasferencia de calor de la caldera deberá ser tal que a través de ella se trasfiere todo el calor útil que el agua recibe para convertirse en vapor.

$$Q_{util=m_{vapor}*h_{ig}} \tag{2.7}$$

2.10. ECONOMIZADORES PARA CALDERAS

Una caldera o generador de vapor es un equipo destinado a la producción de vapor a partir de agua líquida. La energía necesaria para producir el vapor de agua se obtiene de las reacciones de combustión de un combustible sólido, líquido o gas conjuntamente con el oxígeno presente en el aire.

Los sistemas de calentamiento de agua con energía solar están compuestos por colectores solares y tanques térmicos de almacenamiento. Las placas colectoras son responsables por la absorción de la radiación solar. El calor del sol es captado por las placas del calentador solar y luego transferido al agua, que circula por el interior de los tubos de cobre y va directamente al tanque del calentador solar.

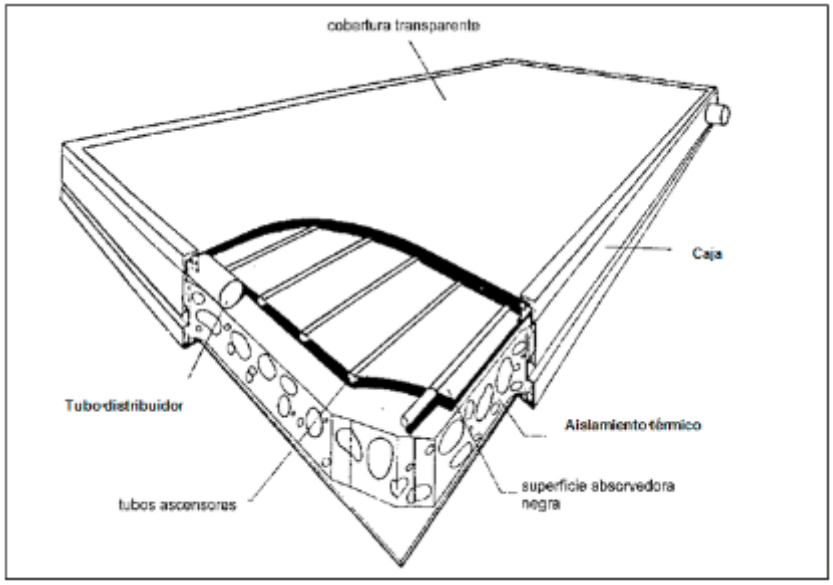
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

En la Figura 9 se puede observar cómo está constituida el colector plano (por un absorbedor, caja, cobertura y aislamiento).

Figura N° 9: Componentes de un colector plano para calentamiento solar de agua



Fuente: [13]

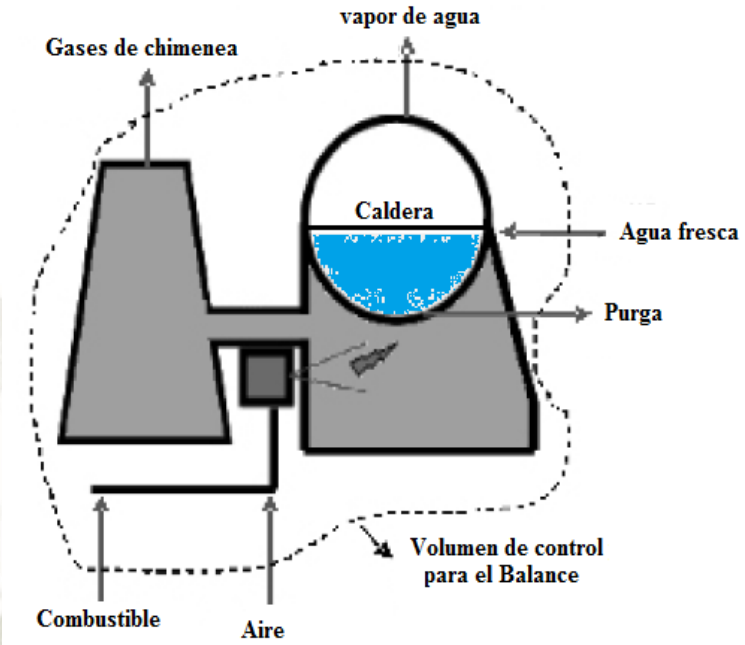
2.11. ALIMENTACIÓN DE AGUA A LA CALDERA

Son aquellas aguas de cualquier procedencia que pueden utilizarse con ventaja y seguridad para alimentar calderas. El agua en general procede de los ríos, lagos, pozos y agua de lluvia. Para los efectos de alimentación de generadores de vapor y fines industriales en general tienen primordial importancia los ríos y pozos. Por la misma índole de su procedencia no se puede evitar que ella arrastre y disuelva impurezas que la hacen inapta para el consumo humano y también industrial. Luego está agua será transformada a vapor de agua para lo cual se requiere de energía que se va a obtener de la combustión de gas con el oxígeno del aire. Los gases calientes provenientes de las reacciones químicas son expulsados al medio ambiente al precalentar el agua fría que ingresa a la caldera mediante el empleo de un intercambiador de calor al que se denomina economizador.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

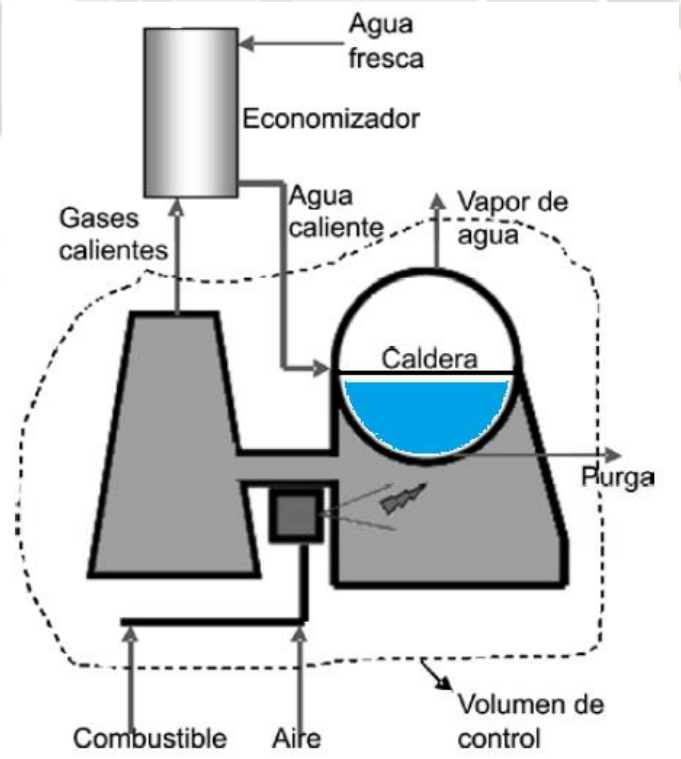
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 10: Generador de vapor sin economizador



Fuente: [7]

Figura N° 11: Generador de vapor con economizador



Fuente: [7]

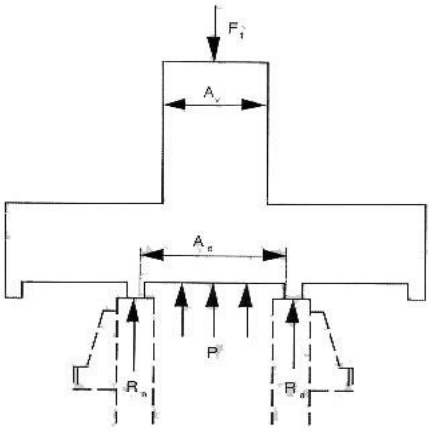
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.12. VÁLVULAS DE SEGURIDAD PARA LIBERACIÓN DE PRESIÓN.

Son actuadas por la energía de la presión estática. Cuando en el recipiente o sistema protegido por la válvula se produce un aumento de presión interna, hasta alcanzar la presión de tarado, la fuerza ejercida por el muelle es equilibrada por la fuerza producida por la presión sobre el área del disco de cierre (Fig. 12). A partir de aquí, un pequeño aumento de presión producirá el levantamiento del disco de cierre y permitirá la salida del fluido. Si se trata de una válvula de seguridad de apertura instantánea, el disco de cierre se separará repentina y totalmente, debido al incremento de la fuerza resultante del producto de la presión por el incremento del área del disco de cierre. Pero si se trata de una válvula de alivio de presión, la válvula abrirá proporcionalmente al incremento de presión producido.

Figura N° 12: Disco de cierre



Fuente: [14]

Figura N° 13: Tipos de válvulas de seguridad



Fuente: [15]

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.13. TWIDO SUITE

TwidoSuite es un software que está organizado según el ciclo de desarrollo del proyecto. TwidoSuite es un entorno de desarrollo gráfico, lleno de funciones para crear, configurar y mantener aplicaciones de automatización para los autómatas programables Twido de Telemecanique.

TwidoSuite permite crear programas con distintos tipos de lenguaje, después de transferir la aplicación para que se ejecute en un Autómata.

TwidoSuite es un programa basado en Windows de 32 bits para un ordenador personal (PC) que se ejecuta en los sistemas operativos Microsoft Windows 2000 y XP Professional.

Las principales funciones del software TwidoSuite son:

- Interface de usuario intuitiva y orientada a proyectos.
- Diseño de software sin menús. Las tareas y funciones del paso seleccionado de un proyecto siempre se encuentran disponibles.
- Soporte de programación y configuración.
- Comunicación con el autómata.
- Ayuda de primera mano acerca del nivel de tareas que ofrece enlaces relevantes a la ayuda en línea.

2.14. PLC

Un controlador lógico Programable (PLC), es una computadora industrial dedicada a las tareas de control de procesos operando digitalmente, cuenta con una memoria de almacenamiento interno con instrucciones que realizan tareas y funciones específicas, como lógica, secuencias, control de tiempos, conteos, operaciones aritméticas, adquisición de datos desde dispositivos externos con entradas y salidas digitales.

El PLC trabaja de forma secuencial y cumpliendo un ciclo, es decir terminado el recorrido de un programa pasa hacia el siguiente hasta completar la secuencia asignada.

2.14.1. Elementos principales del PLC

2.14.1.1. Unidad central de proceso (CPU)

Es el elemento principal de procesamiento del PLC. Una vez digitalizadas, las señales de entrada son pasadas al CPU, el cual les aplica el algoritmo de control para generar las salidas. El algoritmo de control está almacenado en la memoria interna del PLC en forma de un programa, el cual es creado y almacenado por el usuario. Además de ejecutar el

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

programa, el CPU realiza acciones como verificación del sistema, actualización de las imágenes de entrada y salida y la medición del tiempo de ejecución del programa.

2.14.1.2. Entradas:

Constituyen la etapa de entrada del PLC. Desde la parte externa del PLC lucen como una bornera donde se deben colocar los cables con las señales que provienen de los transductores, pero internamente están conformadas por circuitos electrónicos que acoplan esas señales a las especificaciones de señales que el PLC puede manipular.

Según la naturaleza de la señal que se recibe de los transductores, las entradas se clasifican en:

- *Entradas digitales:* Estas entradas se diseñan para recibir señales cuantizadas de los sensores de campo. Dichas señales varían sólo entre dos estados. El PLC codifica estas señales según su amplitud en: 1 lógico para el valor de amplitud mayor, y 0 lógico para el nivel de amplitud menor. Los niveles de amplitud que el PLC entenderá son definidos por el fabricante. Este tipo de señales generalmente provienen de transductores como: interruptores, botoneras, sensores de fin de carrera, etc.
- *Entradas analógicas*: son las que reciben señales analógicas de los transductores de campo. Estas señales generalmente provienen de sensores que miden el valor instantáneo de una variable física. Ejemplos de este tipo de señales son: la salida de una tacométrica, de un foto sensor o de un sensor de nivel. El valor de la señal analógica se transforma en una señal digital de tal forma que el procesador la pueda manipular. Un aspecto importante de esta transformación es la resolución con que se realiza en el interior del PLC. Por resolución se entenderá la cantidad de valores cuantizados disponibles para representar una señal analógica.

Según el tipo de señal eléctrica que reciban, las entradas también se clasifican en: de corriente y de voltaje. A las entradas está asignado un espacio de memoria del PLC llamado imagen de entradas, el cual contiene la información de todas las entradas en todo momento.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.14.1.3. Módulos de salida

Salidas: Internamente son circuitos electrónicos que realizan el acople entre las señales digitales utilizadas por el PLC y las señales analógicas o cuantizadas que utilizan los actuadores. Externamente lucen como una bornera donde se realizan las conexiones entre el PLC y los actuadores.

Las salidas se clasifican, al igual que en el caso de las entradas, en digitales y analógicas. Las salidas digitales se aplican a actuadores como bobinas de contactores, electroválvulas, etc. Existen salidas digitales: de voltaje y de relé. Las salidas de voltaje asignan una magnitud de voltaje, que depende del fabricante, al estado 1 lógico y de 0 V al estado 0 lógico. Las salidas de relé consisten en un contacto seco que se cierra en el estado1 y se abre en el estado 0.

En el caso de salidas analógicas, los valores de salida están generalmente entre 0 V*dc* a 10V*dc* para las salidas de voltaje y de 4 mA a 10 mA para las de corriente, aunque estos valores varían según el fabricante. Estas señales comandan actuadores como válvulas solenoides, servomotores, etc.

A las salidas se les asigna un espacio de memoria del PLC llamado imagen de salida, el cual contiene la información de todas las salidas en todo momento.

2.14.1.4. Fuente de alimentación

Es el elemento que brinda la alimentación a todos los componentes del PLC. Generalmente los componentes funcionan a bajos voltajes de *dc*. La fuente realiza la transformación de los voltajes *ac* y los convierte a voltajes *dc*.

2.14.1.5. Memoria del PLC:

Es el lugar físico donde residen el sistema operativo, el programa, los datos de ejecución y las imágenes de entrada y salida. El sistema operativo es un programa que utiliza el PLC para iniciar su operación y realizar las configuraciones propias de su funcionamiento.

La memoria del PLC se clasifica en diferentes clases dependiendo de su modo de acceso y volatilidad.

- EEPROM: es una memoria de sólo lectura que puede ser escrita por medios electrónicos. No necesita de una fuente de poder para mantener sus datos. Por su

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

característica no volátil, se utiliza para guardar datos esenciales, tal como el sistema operativo y el programa.

- RAM: es una memoria reescribible de acceso aleatorio que se utiliza para guardar los datos generados mientras se ejecuta el programa. Es volátil, por lo que los datos almacenados se pierden si se le suspende la alimentación.

2.15. CALENTADOR SOLAR

Los sistemas de calentamiento de agua con energía solar están compuestos por colectores solares y tanques térmicos de almacenamiento. Las placas colectoras son responsables por la absorción de la radiación solar. El calor del sol es captado por las placas del calentador solar y luego transferido al agua, que circula por el interior de los tubos de cobre y va directamente al tanque del calentador solar. Se puede observar que está constituida por el absorbedor, caja, cobertura y aislamiento.

Colector solar, está compuesto básicamente por: absorbedor, formada por la unión placa fierro galvanizado – tubo de cobre, realizada por el proceso mecánico de estampado. Las superficies absorbedoras no son selectivas, pero si recubiertas con pintura negro mate; cobertura, su función es reducir las pérdidas de calor por convección-radiación al ambiente y para a propia protección de sus componentes en condiciones climáticas adversas. El vidrio es el más mas empleado para este fin; aislamiento, se utiliza las espumas de poliuretano y son ubicadas en las laterales y parte baja de la caja, protegiendo de la humedad y el frio; caja, la función de la caja del colector es contener todo el conjunto y asegurar la impermeabilidad. Se utiliza el aluminio anodizado, resistente a la oxidación. La placa de la base es Nordex (fabricado con fibras de madera prensada a alta temperatura y de gran resistencia a la humedad).

Tanque térmico de almacenamiento, es una caja especial que cuida mantener el agua caliente almacenada en el calentador solar para su consumo posterior. Estos tipos de tanques son formados por dos recipientes cilíndricos concéntricos de acero inoxidable o polipropileno. Es construida de tal forma que el tanque interno se mantiene alejado en las laterales y las partes superior-inferior. Este espacio es rellenado con poliuretano de alta densidad. [16]

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPITULO III

DESARROLLO DE INGENIERIA

3.1. MEMORIA DESCRIPTIVA

El proceso que se siguió para la implementación y puesta en marcha del proyecto de caldera, siguió los siguientes pasos:

3.1.1. Diseño en cajetín de medidas de la caldera, grosor de lámina de metal, ubicación de niples para instalación de sensores y diseño de soporte de la caldera y quemador de alimentación de gas.

3.1.2. Prueba e instalación de sensores en la caldera (sensores de nivel, presión, temperatura)

3.1.3. Ubicación de equipos de control (PLC) y seguridad contactores, relay fuente de alimentación, dimensionamiento de cajetín y cableado.

3.1.4. Pruebas hidráulicas para detección de fugas en presión de tanque.

3.1.5. Instalación de tuberías y válvulas de control manual y automáticas.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.1.6. Instalación de equipos de medición y registro visual de presión, válvula de escape de gas y agua caliente.

3.1.7. Instalación de economizador (terma solar)

3.1.8. Desarrollo de programa de control, así como lazos de control PI y PID en cascada.

3.1.9. Sintonización de bloques de control en cascada según procedimiento de Ziegel and Nichols

3.1.10. Registro e inicio de pruebas de funcionamiento.

3.1.11. Registro de niveles de producción de vapor de agua, medición de autonomía del módulo educativo.

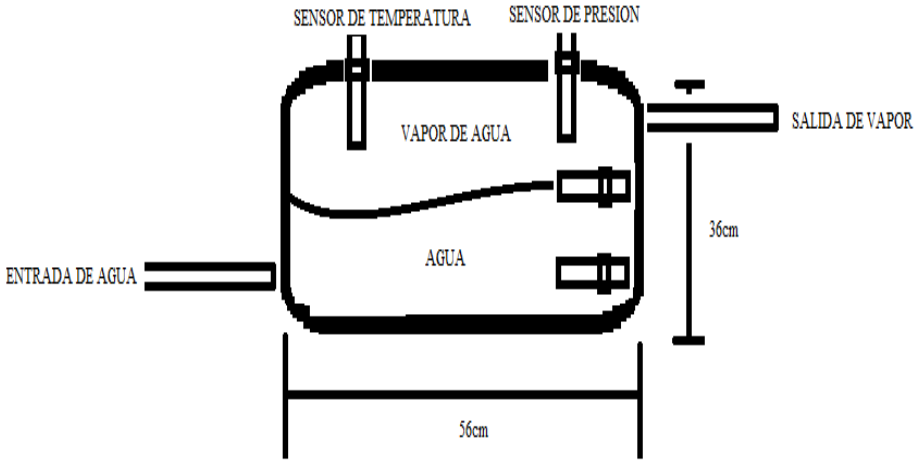
3.1.12. Pruebas finales y puesta a punto.

3.2. DISEÑO DE LA CALDERA

La implementación del trabajo de ingeniería empieza desde el diseño de la caldera, la que se utilizara en áreas educativas identificando los equipos de automatización.

Empezaremos asumiendo que es un proceso a escala, la caldera tendrá las siguientes medidas:

Figura N° 14: Esquema básico de caldera de vapor



Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Los datos de las mediciones se presentan a continuación:

Perímetro:	113.0976 cm
Volumen:	57 001.1904 cm^3
Área del disco:	1 017.878 cm^2
Área lateral:	6 333.4656 cm^2
Área total:	8 369.2216 cm^2

Para realizar el diseño del caldero de vapor nos guiaremos del código ASME BOILER SEC VIII (Reglas para la construcción de recipientes a presión).

Donde:

Asumimos los siguientes valores:

t=Espesor

Do=Diámetro interno de cilindro

T	3.2mm
Do	350mm

$$A= \frac{1.1}{(do|t)^2} \quad (3.1)$$

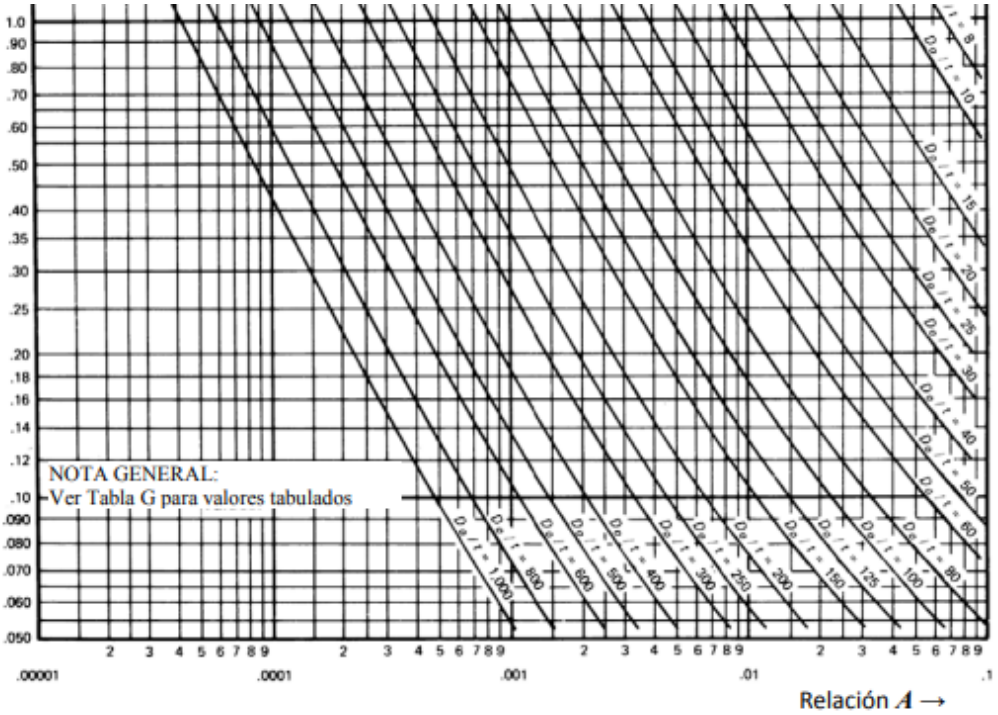
$$Pa = \frac{4B}{3\left(\frac{do}{t}\right)} \quad (3.2)$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 15: Relación para la construcción de un recipiente de presión



Fuente: [17]

De la figura encontramos los valores de Do/t, L/Do, A

$$A = 0.04 \tag{3.3}$$

$$\frac{L}{Do} = 1.43mm \tag{3.4}$$

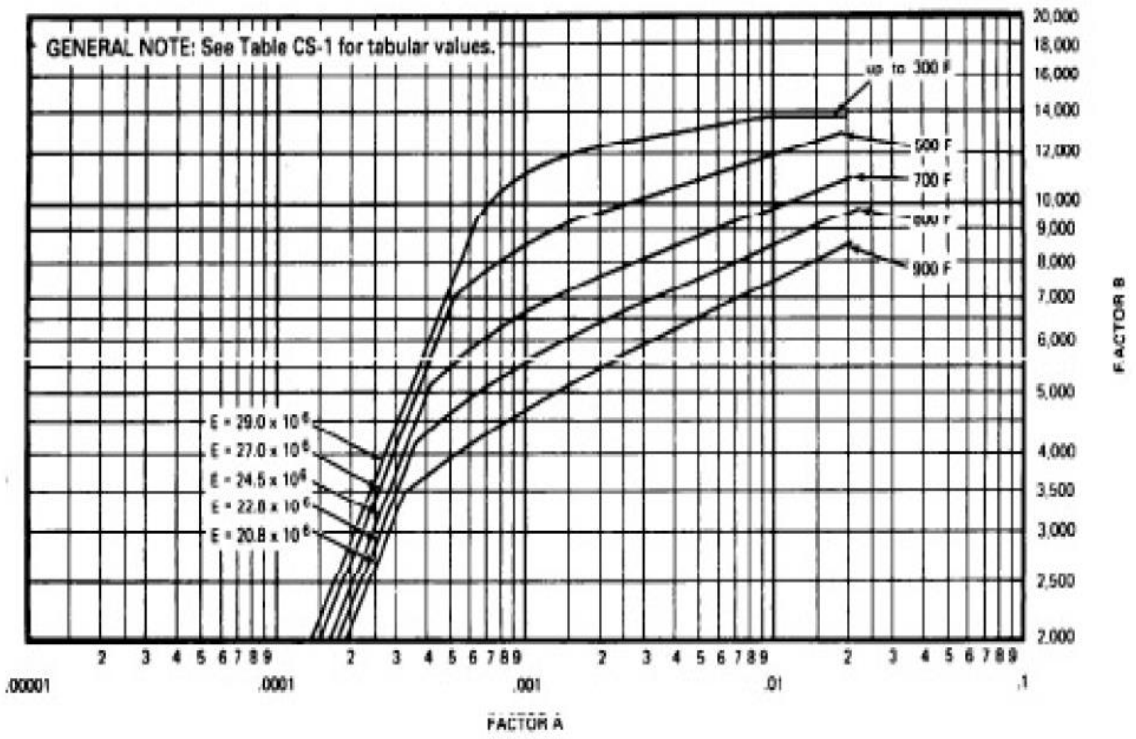
$$\frac{Do}{t} = 109.375mm \tag{3.5}$$

Pasando a la figura CS-2 para encontrar el valor de B a 400 °F o 205°C Factor B= 13000

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 16: Relación para hallar el tipo de acero CS-1



Fuente: [17]

Remplazamos el valor de B tabulado de la tabla CS-1

$$Pa = \frac{4B}{3(\frac{do}{t})} \tag{3.6}$$

$$Pa = 158.476\ psi \tag{3.7}$$

Concluimos que Pa es mayor que P, el valor de diseño, entonces el valor se estima correcto.

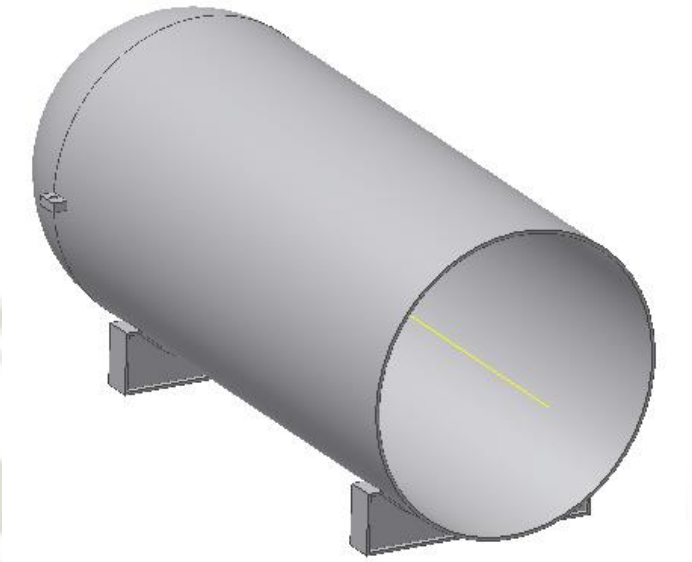
Tomaremos un acero al carbono SA-285.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 17: Diseño de caldera de vapor



Fuente: [18]

El mínimo espesor para corazas y cabezales para calderas de vapor deberá ser 1/8 de pulgada (3.2mm), excluyendo el espesor por corrosión.

Calcularemos ahora la producción de la caldera en kcal por hora.

Sabemos que:

$$Q = ms\ (h - hl) \tag{3.8}$$

Q = Producción de la caldera

h = Entalpia del líquido de 1 kg de vapor a la presión y temperatura en kcal por kg.

Hl= Entalpia del líquido de 1 kg de alimentación en las condiciones en que dicha agua llega a la caldera (economizador en kcal. Por kg)

Ms = Peso del vapor producido por la caldera (recalentado por la caldera) en kg/hr.

$$Q = 70\frac{L}{h} * \frac{1kcal}{kg} * (50 - 20) \tag{3.9}$$

$$Q = 2100\frac{kcal}{h} \tag{3.10}$$

Entalpia de 34 vaporación a 4 kj/kg es igual 152 kcal/kg

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$Caudal\ de\ vapor\ en \frac{Kcal}{h} = \frac{2100}{152} \tag{3.11}$$

$$Caudal\ de\ vapor\ en \frac{kcal}{h} = 0.4605 \frac{kg}{h} \tag{3.12}$$

Ahora calcularemos la potencia de la caldera HP

$$HP\ de\ Caldera = \frac{ms\ (h-hl)}{543.4*15.66} \tag{3.13}$$

$$HP\ de\ Caldera = 1016.53 \tag{3.14}$$

Factor de Vaporización

$$Fv = \frac{(h-hl)}{543.4} \tag{3.15}$$

$$Fv = 0.9273 \tag{3.16}$$

Esfuerzos circunferenciales es cuando el espesor no excede ½ del radio interno (0.5R), o P no supera 0.385SE, se debe aplicar las siguientes formulas

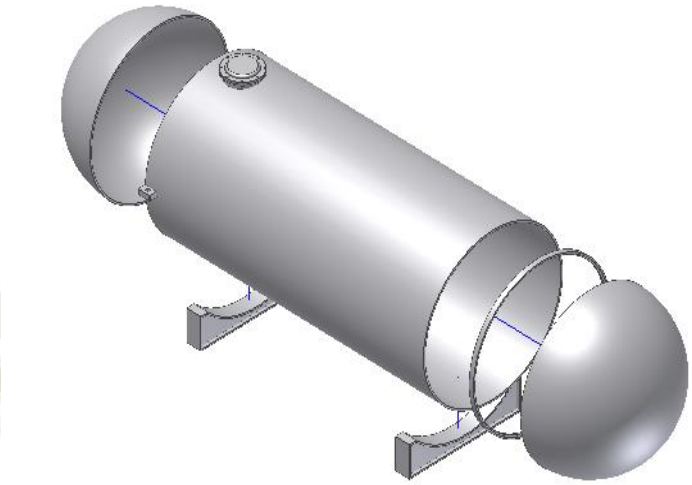
$$t = \frac{PR}{SE-0.6P} \tag{3.17}$$

$$P = \frac{SEt}{R+0.6t} \tag{3.18}$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 18: Modelo terminado de caldera de vapor



Fuente: (Lezama)

3.3. ACTUADORES

El actuador está controlado por una modulación de encendido/apagado, sistema de control proporcional y mueve la bola de la válvula a la posición de apertura dictada por la señal de control.

La característica de flujo de porcentaje garantiza el rendimiento de estabilidad de la válvula.

Las válvulas de bola de control se utilizan ampliamente en el sistema HVAC, el sistema de calefacción, el equipo de tratamiento de agua y el control de funcionamiento de agua en la automatización industrial como: AHU, unidad de control de presión diferencial y cambiador de calor para regulación de flujo y control de encendido y apagado.

Las especificaciones del actuador son las siguientes:

Estructura:	Bola
Número de modelo:	TFV4-304
Presión:	1.6Mpa
Temperatura de medios:	1-95 ℃
Potencia:	24V
Producto:	Modulating Valve Actuador

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Torque:	4Nm
Abierto/Cerrado Tiempo:	50-90sec
Manija Manual:	Si
Rango de protección:	IP54
Señal de control de entrada:	0-10V

Figura N° 19: Válvula proporcional



Fuente: Elaboracion Propia

El flujo de una corriente líquida a través de una válvula de control se calcula con la siguiente ecuación:

$$f = C_v \sqrt{\frac{\Delta p_s}{G_f}} \qquad (3.19)$$

Siendo f, el flujo de líquido, en gpm.

Δps , la caída de presión a través de la válvula en psi.

Gf, la gravedad específica del líquido a las condiciones del flujo.

Cv, el factor de capacidad o coeficiente de la válvula.

Para regular un flujo, la capacidad de una válvula de control varía desde cero, cuando la abertura está cerrada, a un máximo cuando está completamente abierta, es decir, cuando la fracción de abertura de la válvula es uno o 100 %. La capacidad de flujo de una válvula de control se determina por su "Factor de Capacidad o Coeficiente de la Válvula, Cv, que es una constante específica de una válvula que depende de sus características, principalmente,

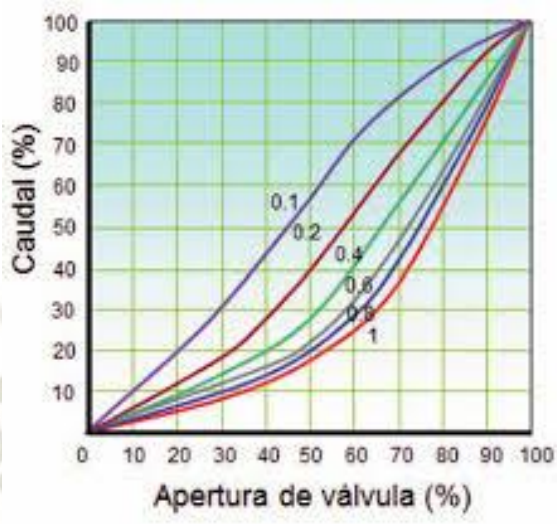
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

tipo y tamaño. Por definición, el coeficiente de una válvula es el flujo en galones por minuto (gpm) de agua que fluyen a través de la válvula con una caída de presión 269 de 1 psi. [19]

Figura N° 20: Curvas de apertura de válvulas proporcionales



Fuente: George Jimenes (Revista tecnica de eficiencia energetica)

Cuando el regulador que gobierna cualquier válvula envía una señal, por ejemplo, del tipo proporcional 0-10 V, la situación ideal sería que esos 0-10 V correspondiesen de forma lineal a una potencia (emisión) que oscilase entre 0 y la máxima potencia calculada.

3.4. SENSORES DE NIVEL:

Los sensores ON/OFF también conocidos como SI/NO o sensores binarios son en general dispositivos mecánicos simples. En nuestro caso es un sensor de nivel flotante con interruptor magnético tipo Reed Switch para montaje lateral

Sus aplicaciones son varias como detector de niveles máximos o mínimos, protección contra rebalse o vaciado en tanques con agua o con productor líquidos.

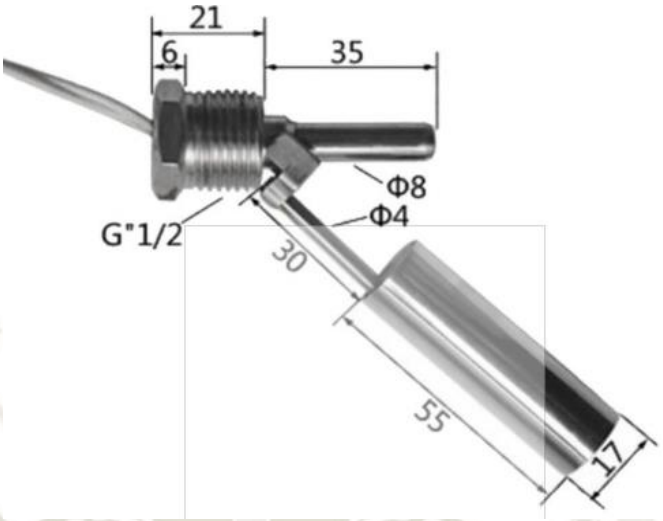
El sensor esta construido en inox, enviando una señal de encendido o apagado (ON / OFF) de acuerdo a la programacion en el PLC para fines de entrenamiento y tomando encuenta el diametro del cilindro solo se colocara 2 sensores de nivel para alto y otro que debe detectar el nivel bajo de la caldera y evitar que esta se quede sin agua..

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 21: Medidas y diametros del sensor



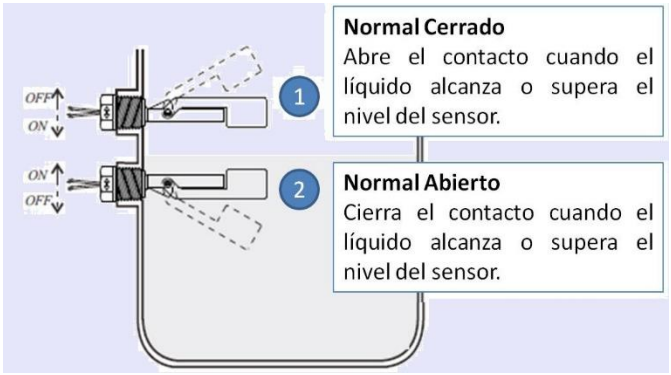
Fuente : sensor-de-nivel-inox.html

Figura N° 22: Instalación de sensor de nivel



Fuente: Elaboracion propia

Figura N° 23: Funcionamiento de sensor de nivel



Fuente: http://www.solucionesfmk.com/productos/flotante.php

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.5. SENSOR DE TEMPERATURA

Usaremos el sensor de temperatura para transformar los cambios de temperatura en señales eléctricas para poder medirlas e identificarlas en nuestro PLC TWIDO.

Entre sus características encontramos: Su aislamiento de las perlas de cerámica es de alta temperatura entre el cable y el tubo protector, para evitar interferencias eléctricas y garantizar una medición precisa de la temperatura. Su base de rosca interior es de acero inoxidable, rendimiento duradero y estable resistencia térmica, alta sensibilidad y estabilidad. Resistente a altas temperaturas y fácil de usar.

Señal de Salida: Analógica

Rango de señal de salida: 4 – 20 mA

Rango de temperatura: 0 – 200 ℃

Numero de hilos: 3 hilos

1. La termo resistencia trabaja según el principio que en la medida que varía la temperatura, su resistencia se modifica, y la magnitud de esta modificación puede relacionarse con la variación de temperatura.
2. Su construcción puede hacerse con 2, 3 o 4 cables, según la necesidad del proceso.
3. La relación fundamental para el funcionamiento es:

$$Rt = Ro * (1 + \alpha * t) \quad (3.20)$$

Ro: resistencia en ohmios a 0 grados Celsius

Rt: resistencia en ohmios a t grados Celsius

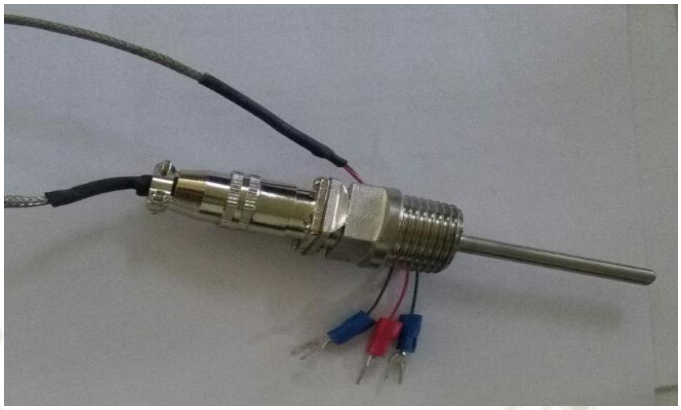
Alpha: coeficiente de temperatura de la resistencia. Los materiales utilizados para los arrollamientos de termo resistencias son fundamentalmente platino, níquel, níquel-hierro, cobre y tungsteno.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 24: Pt100



Fuente: Elaboracion propia

3.6. TRASDUCTOR Pt 100

Interfaz para sensor de temperatura PT100 de 131 ámbito industrial. Necesita una alimentación de 24VDC, puede medir hasta 200ºC y enviar sus datos a través de señal 4.20 mA.

Figura N° 25: Trasductor PT 100



Fuente: Elaboracion propia

3.7. SENSOR DE PRESION

En nuestra selección del sensor de presión nos enfocamos en un sensor que soporte mínimo los 1.1 Bar que es nuestra consigna en el programa. Como su propio nombre lo dice su gran ventaja es que tiene la capacidad de soportar una alta temperatura medida, tanto en gases como en fluidos donde se desea conocer la presión en puntos de medida por más alta que sea su temperatura de trabajo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Hay formatos diferentes y por tanto, tamaños diferentes. Una característica del tamaño de estos sensores es la longitud de la varilla o tubo de presión, que en general suele ser larga para refrigerar el gas o material desde el punto de medida hasta la membrana.

Otras características:

Margen de medida: 0 – 16 Bar

Salida: 4 – 20 mA

Alimentación: 9 – 32 Vdc

Para realizar el modelamiento matemático se debe hacer uso de herramientas computacionales y algoritmos de procesamiento de datos, como la interpolacion polinomica, tambien concluimos que el indicador de temperatura va ligado directamente a la presion, para nuestro caso tomaremos un bloque de funcion que represente es tipo de proceso tomando como base la siguiente ecuacion.

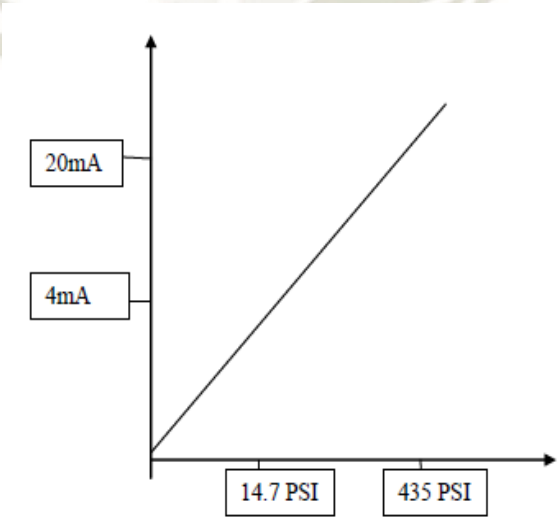
$$Sal(T,P) = Bo(T) + B1(T) * P \tag{3.21}$$

Donde

$$Bo(T) = Co + C1 * T \tag{3.22}$$

$$B1(T) = Do + D1 * T \tag{3.23}$$

Figura N° 26: Curva característica del sensor de presión



Fuente: Elaboracion Propia

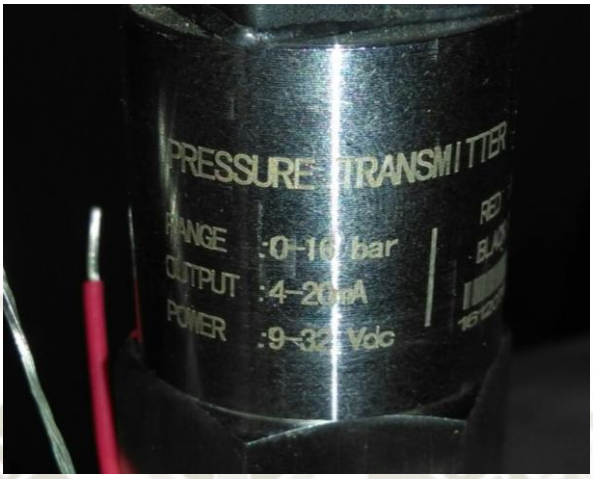
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Tomando como base la grafica, el rango entre 14.7 PSI (presion en el tanque vacio igual a 1atm y 435 PSI que seria la presion maxima de trabajo o 30 bar.

Figura N° 27: Trasmisor de presión



Fuente: Elaboracion Propia

3.8. TERMA SOLAR

Para realizar un ahorro de tiempo en nuestro proceso de calentamiento del agua se decidió implementar una terma solar con la finalidad que el agua ingresada a la caldera sea pre-calentada y así nuestro proceso llegue más rápido al set point (SP) deseado

Se decidió implementar un tanque de 90 Litros que sería suficiente para alimentar a nuestra caldera, el material de este es de acero inoxidable de calidad 304, tiene un forro exterior que también es de acero inoxidable de calidad 304 con un espesor de 0.4mm, este forro tiene sus tapas superiores e inferiores que son de aluminio y de 0.7mm de espesor, entre el tanque y el forro se encuentra poliuretano inyectable (esponja) el cual ayuda a permanecer el agua caliente dentro del tanque.

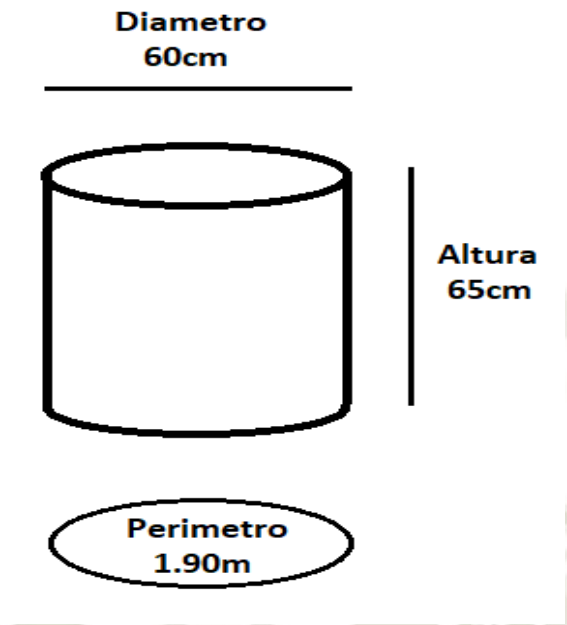
El volumen del cilindro es de: 183,783.6 cm

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 28: Medidas del cilindro



Fuente: Elaboracion Propia

El panel solar es el encargado de recolectar agua fría, por medio de sus paneles atrae el calor, calienta el agua y lo envía al tanque.

Nuestro panel solar consiste de 10 tubos de cobre de 5/8, estos tubos están cubiertos por una lámina de placa de acero LAF (plancha negra) y cuenta con unos conductores o cabezales de cobre de 7/8. Tiene una capa que cubre el panel de aluminio que cuenta por encima con un cristal incoloro (vidrio).

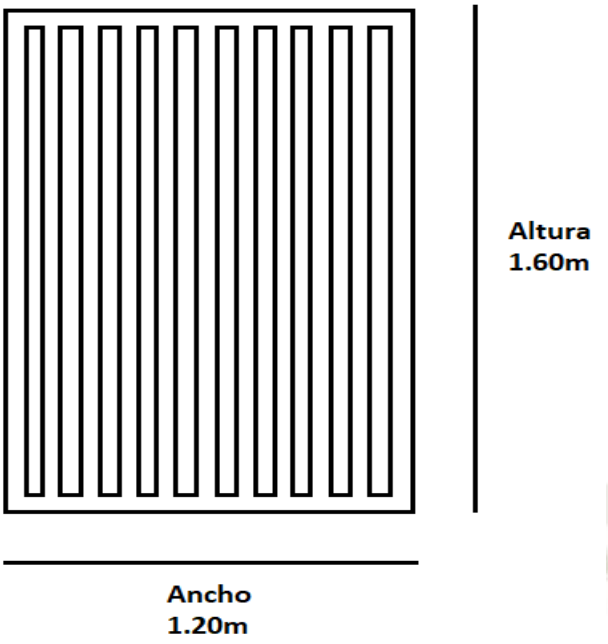
Entre la capa y los tubos tenemos poliuretano flexible (esponja) que también permite mantener el agua caliente.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 29: Medidas del panel solar



Fuente: Elaboracion Propia

Figura N° 30: Sistema de pre-calentamiento



Fuente: Elaboracion Propia

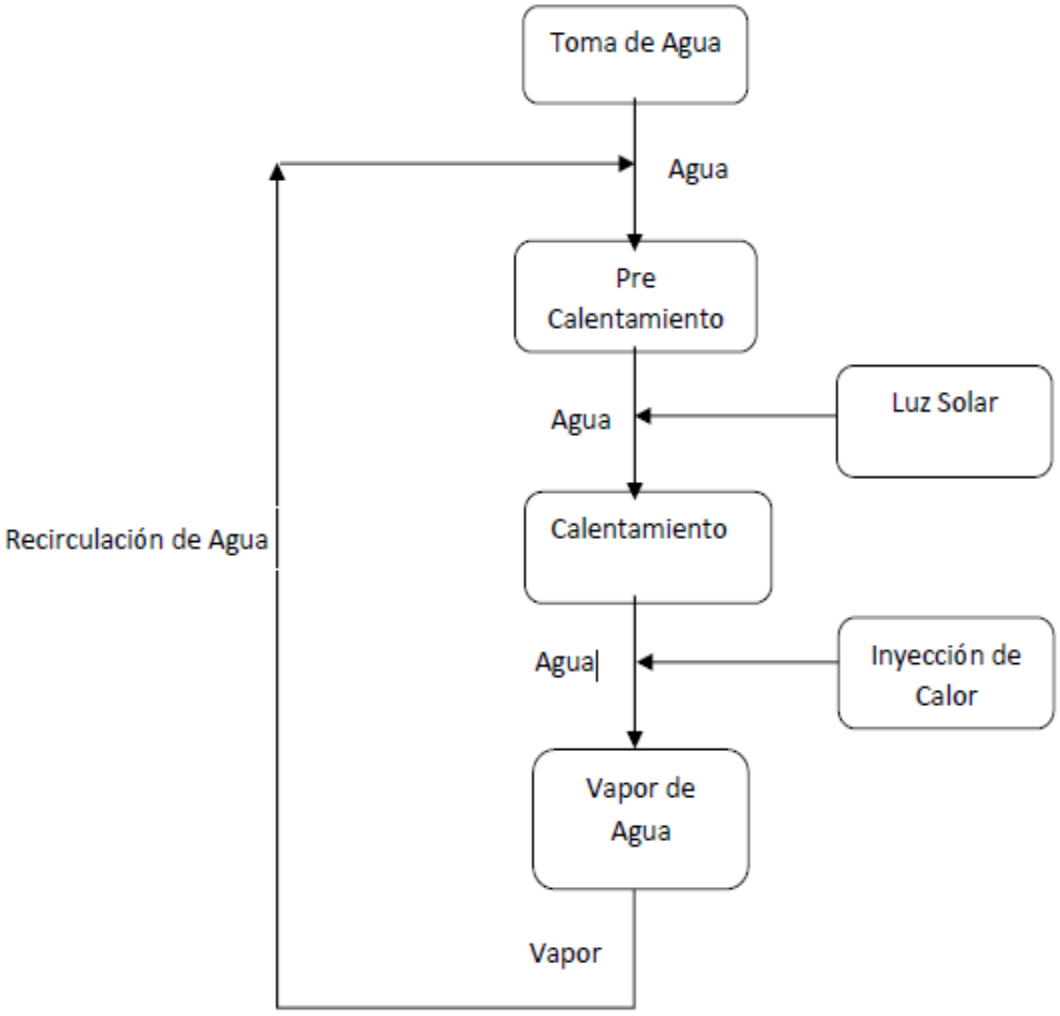
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.9. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Se implementó un control en cascada con los lazos de temperatura y presión.

Figura N° 31: Diagrama de bloques de caldera con economizador



Fuente: Elaboración propia

3.10. DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL SECUNDARIO – CONTROL DE PRESIÓN

Una vez realizado el diseño de la caldera procedimos a identificar los instrumentos y control que necesitaremos para llevar a cabo el lazo de control secundario (control de presión).

Como nuestro control es en cascada se optó por un primer lazo PI para una reacción más rápida en el lazo interno de nuestro sistema en cascada

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Primero elegimos el combustible que usaremos, en este caso el elegido fue gas natural, este gas pasará por el actuador (válvula proporcional) el cual regulará este mismo dependiendo de la respuesta que reciba del PLC.

Una vez que el gas pase por el actuador llegará a la hornilla el cual hará combustión con el chispero y generará fuego.

La alimentación de la caldera captara agua ya precalentada desde una terma solar, ingresando pre-calentada a una temperatura de 40 °C, para controlar esta parte se realizó el control de nivel en el tanque con dos sensores de nivel tipo lapicero, uno para nivel alto y otra de nivel bajo.

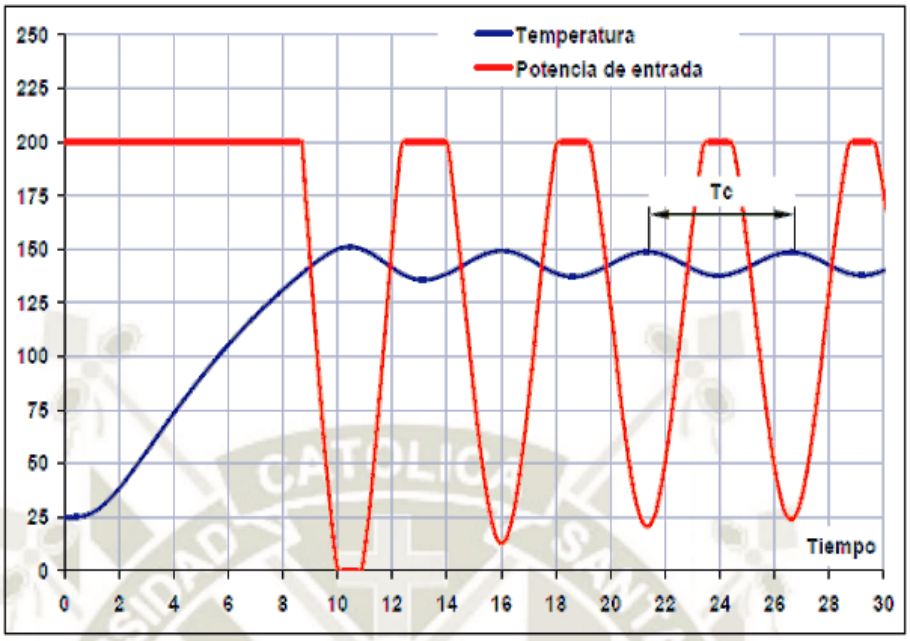
Luego que la hornilla está encendida, emitiendo fuego con la caldera y con el sensor de nivel alto activado se tendrá que esperar a que la presión aumente, para esto se instaló un sensor de temperatura el cual medirá la temperatura de nuestra caldera.

Una vez que llegamos a los 120 °C que en nuestra consigna equivalente a 1.1 Bar, procedimos a definir la técnica de control con el método de sintonización el cual se realizó con el segundo método de Ziegler – Nichols que lleva el nombre de Sintonización por la ganancia critica en lazo cerrado, el cual nos dice que solo se debe reducir al mínimo la acción derivativa y la acción integral del regulador PID, luego consiste en aumentar poco a poco la ganancia proporcional hasta que el sistema oscile de forma mantenida. En nuestro proceso se empezó a reducir los parámetros Ti=0 y Td=0, mientras que fuimos aumentando nuestro Kp primero con un valor de 0.1, al ver que nuestra onda de salida era inestable como dice la teoría de la técnica de control se procedió a aumentar poco a poco este parámetro obteniendo que el valor más cercano a una onda estable y continua es con Kp=8000, una vez llegado a este valor se tuvo que analizar cómo se comporta nuestra salida (actuador) frente a esta entrada, se procedió a tomar datos de los estados del actuador según su comportamiento para luego mediante la gráfica de salida obtener el periodo de oscilación de nuestro proceso (Tc) que en nuestro proceso seria de Tc=2.7minutos, hay que tener en cuenta que para el método de Ziegler – Nichols el periodo debe de considerarse en segundos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 32: Sintonización por la ganancia critica en lazo cerrado



Fuente: https://sites.google.com/site/picuino/ziegler-nichols

Luego de lograr la onda sostenida procedimos a encontrar los parámetros de sintonización por medio de las siguientes fórmulas para PI de la siguiente imagen.

Figura N° 33: Fórmulas para hallar los parámetros de sintonización

	Kp	Ti	Td
P	0.50*Kc		
PI	0.45*Kc	0.83*Tc	
PID	0.59*Kc	0.50*Tc	0.125*Tc

Fuente: https://sites.google.com/site/picuino/ziegler-nichols

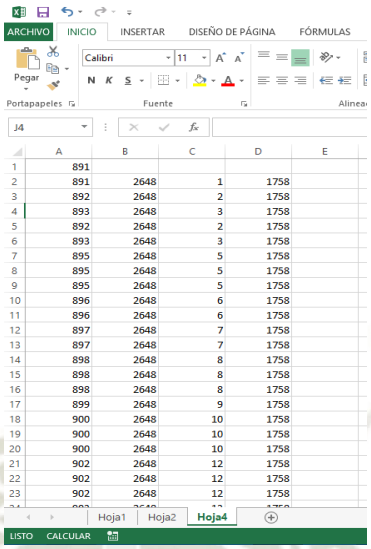
Ya obtenidos los parámetros de sintonización Proporcional e Integral se procede a ingresar los datos en el programa del PLC. Obteniendo nuestro diseño del lazo de control secundario.

Como se consiguió los parámetros de sintonización para el primer lazo a partir de esto podemos también encontrar nuestra función de transferencia, podemos exportar los datos que nos muestra el programa TWIDO SUITE estos se tabulan:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

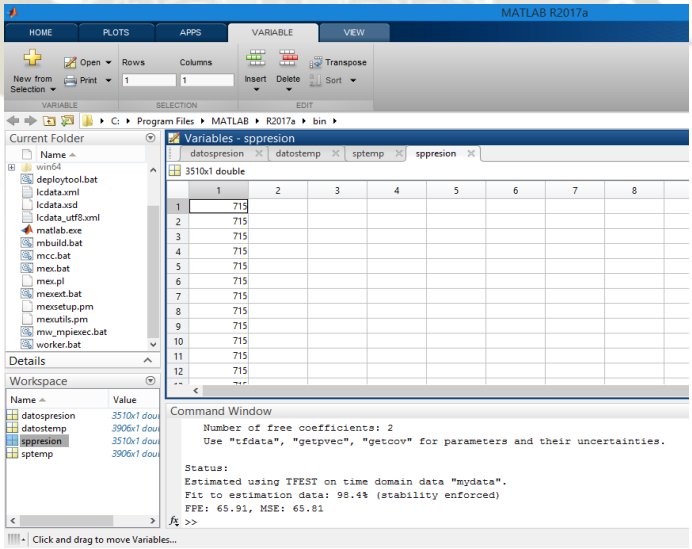
Figura N° 34: Datos exportados de TWIDO a Excel



Fuente: Elaboración Propia

Se procedió a crear una variable en el MatLab(R) y guardar los datos obtenidos en esa misma variable, solo tendremos que copiar y pegar.

Figura N° 35: Creación de variables en MATLAB(R)



Fuente: Elaboración Propia

Como podemos ver en el workspace del MatLab(R), nos aparecerá cada variable que hemos creado, también cada una de estas se puede observar tabuladas en la ventana de visualización.

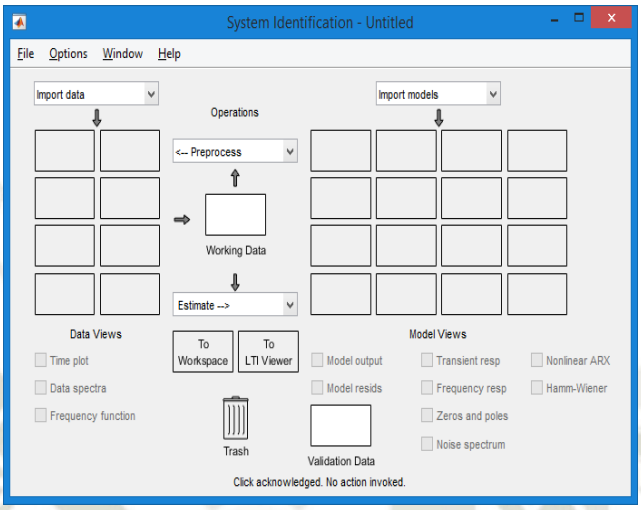
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Una vez creadas las variables, en el Matlab(R) escribimos el comando IDENT, y se nos abrirá la ventana siguiente:

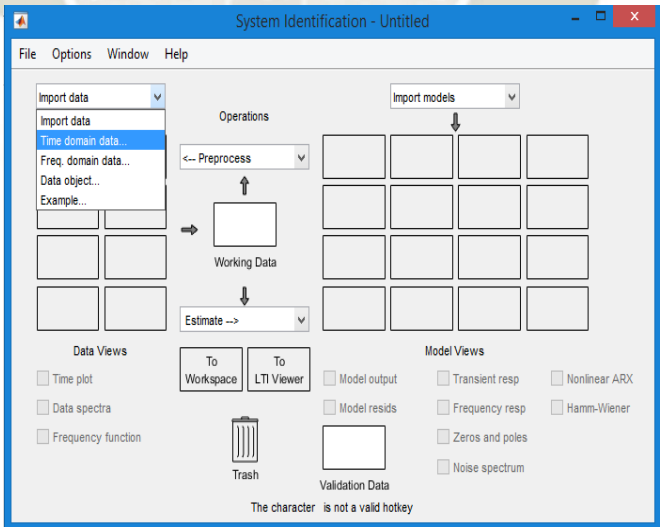
Figura N° 36: Ventana del comando IDENT



Fuente: Elaboración Propia

En esta ventana tenemos que importar los datos de las variables que hemos creado, para esto seleccionamos importar los datos en el dominio del tiempo

Figura N° 37: Importar datos



Fuente: Elaboración Propia

Se nos abrirá una ventana en el dominio del tiempo, los valores de tiempo los dejamos por defecto, ya que nuestro tiempo de muestreo es de 1 segundo y comenzamos desde el valor 1.

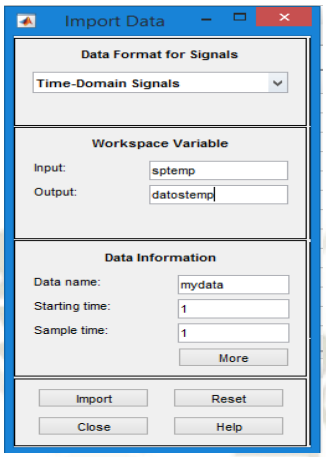
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Como valor de entrada seleccionamos el setpoint que le vamos a dar desde el inicio, y como output será el valor de respuesta que nos da nuestro sistema. Siguiente le damos a importar y esperar al cálculo.

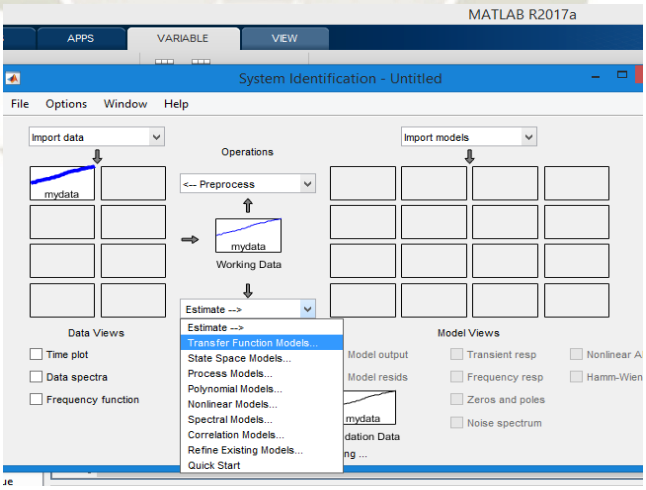
Figura N° 38: Ingreso de valor de entrada y salida



Fuente: Elaboración Propia

Como podemos ver nos aparece la gráfica, a lo siguiente, le damos a estimar el modelo de función de transferencia.

Figura N° 39: Obtención de la función de transferencia



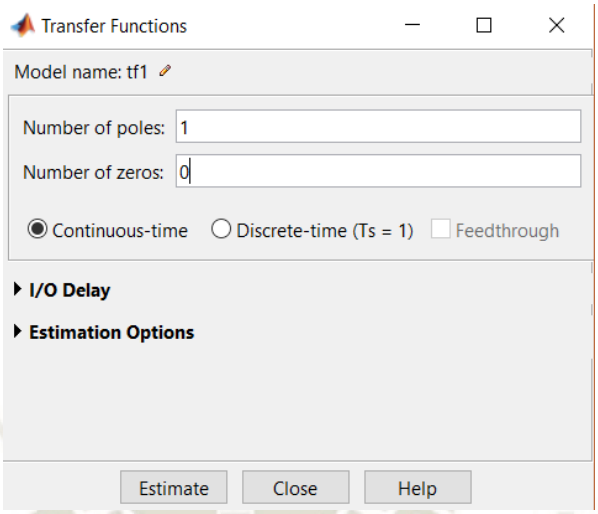
Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente, seleccionamos el número de polos y ceros que va a tener nuestra función de transferencia y esperamos a que realice los cálculos necesarios

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

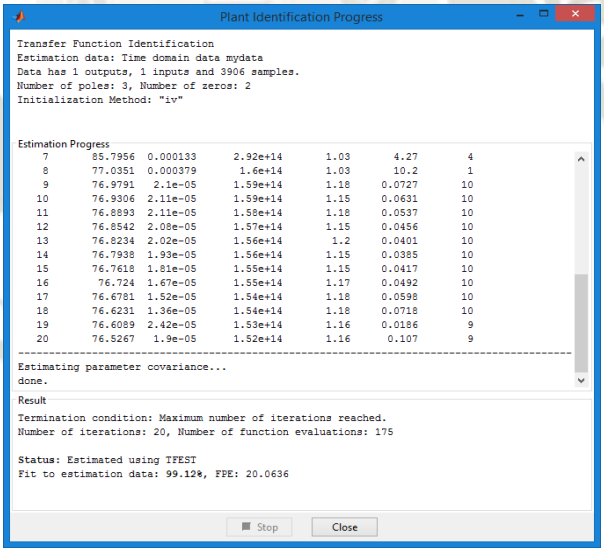
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 40: Ingreso de cantidad de ceros y polos



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 41: Estimación en proceso



Fuente: Elaboración Propia

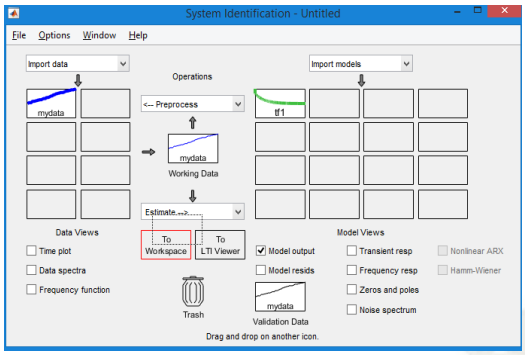
Como podemos ver, las funciones ya están creadas y también seleccionamos graficar el modelo de salida

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

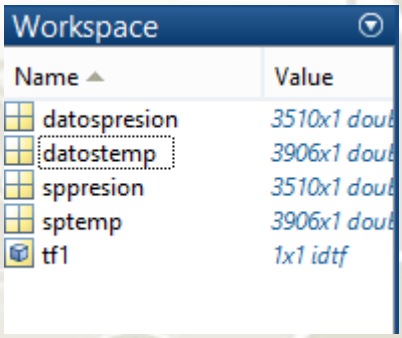
Figura N° 42: Graficas de salida



Fuente: Elaboración Propia

De esta manera podemos verificar que nuestra estimación está al 97.33%, arrastramos la función FT1 que ha sido creada al workspace

Figura N° 43: Datos en el workspace



Fuente: Elaboración Propia

Con esto nuestra función de transferencia ya estará creada y para visualizarla en la ventana de comandos solo escribimos su nombre.

Figura N° 44: Función de transferencia de lazo interno

```
ft2 =

  From input "u1" to output "y1":
    0.0002935
  -------------
  s + 7.147e-05
```

Fuente: Elaboración Propia

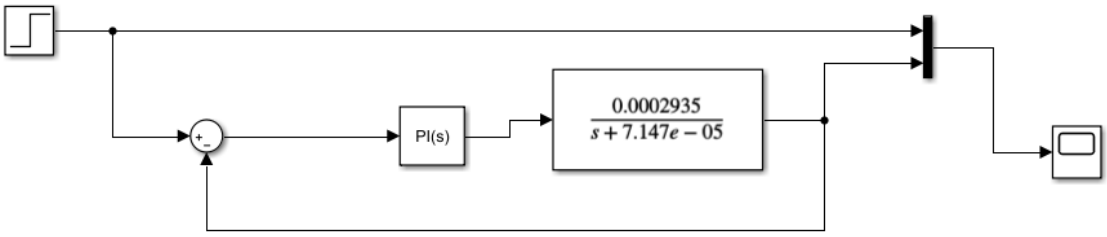
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

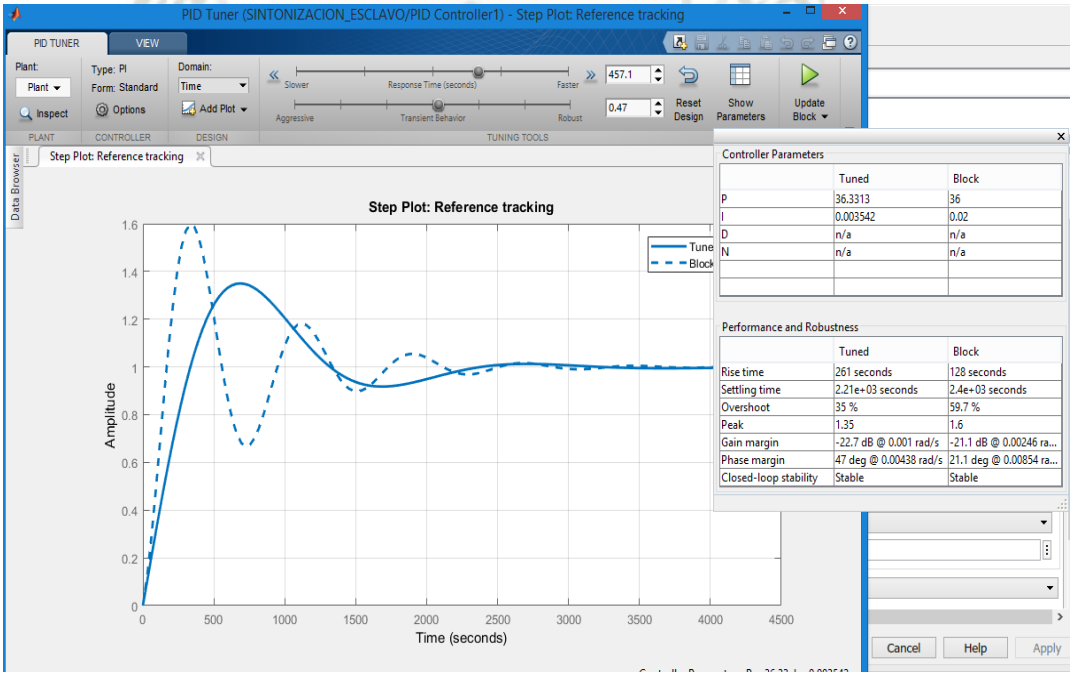
Procedimos a llevarlo al programa simulink y realizar la sintonización del lazo esclavo (PI) por medio del autotuning, dándole doble click al bloque PID se despliegan todas características

Figura N° 45: Características bloque PID



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 46: Autotuning de lazo interno



Fuente: Elaboración Propia

Siendo esta la que nos manda el autotuning del esclavo, variando algunos parámetros para que en la práctica el proceso sea más exacto.

Ahora ya tenemos nuestros parametros de sintonizacion del lazo interno y nuestra funcion de transferencia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.11. DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL PRIMARIO – CONTROL DE TEMPERATURA

Luego de lograr el diseño del lazo secundario, se procedió a diseñar el lazo primario (control de temperatura), para esto a la caldera se le instaló un sensor de temperatura, se decidió que a este lazo se utilizara un control PID.

Para este paso primero hallaremos la función de transferencia de dicho lazo por lo cual se realizan los mismos pasos del capítulo 3.10. Por medio del MatLab(R) y de su función IDENT procedimos a encontrar su función de transferencia la cual nos da:

Figura N° 47: Función de transferencia lazo externo

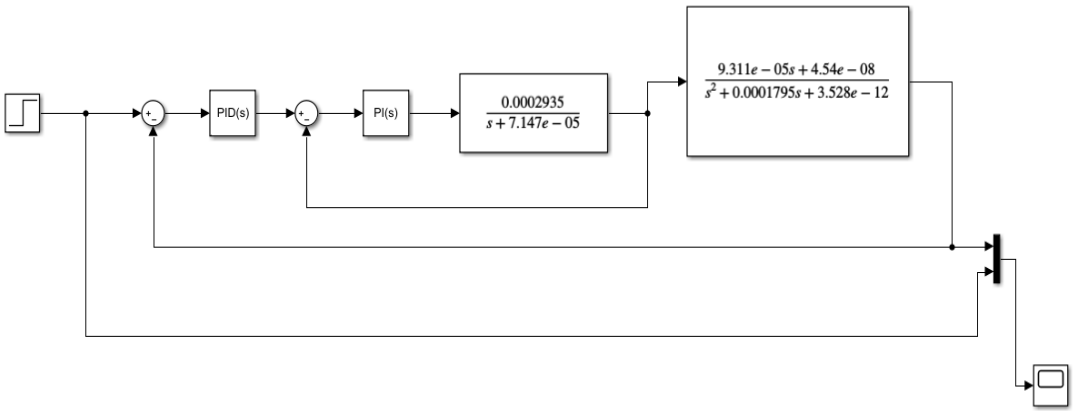
```
ft1 =

  From input "u1" to output "y1":
     9.311e-05 s + 4.54e-08
  ----------------------------
  s^2 + 0.0001795 s + 3.528e-12
```

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que ya tenemos ambos modelos de función de transferencia, procedimos a llevarlo al programa de SIMULINK, en donde simularemos los lazos de control en cascada para nuestro proceso.

Figura N° 48: Diagrama de bloques en simulink de control en cascada



Fuente: Elaboración Propia

Recordemos que para el autotuning se manejan lo que son los tiempos, tiempo integral y tiempo derivativo. Para esto se convirtió todo a ganancias, ganancia integral y derivativa.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

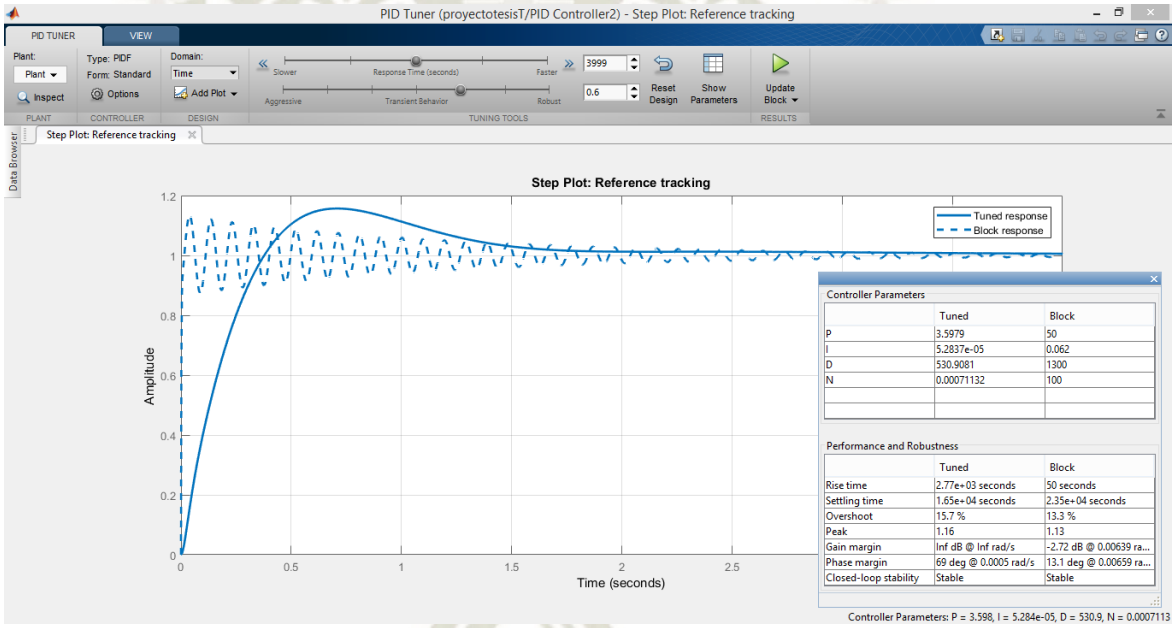
$$Kp = Kp = 3.54 \tag{3.24}$$

$$Ti = \frac{kp}{Ki} = \frac{3.6}{0.000052837} = 68.1 \tag{3.25}$$

$$Td = \frac{Kd}{Kp} = \frac{530.9}{3.54} = 149.9 \tag{3.26}$$

Cabe resaltar que para ingresar los valores de sintonización al programa TWIDO se debe de multiplicar el KP * 100, Ti * 10 y Td* 10. Lo cual ingresaremos KP = 354, Ti = 680 y Td = 1500, en la siguiente grafica se puede apreciar los parámetros de sintonización del controlador maestro con PID.

Figura N° 49: Autotuning del sistema de control en cascada



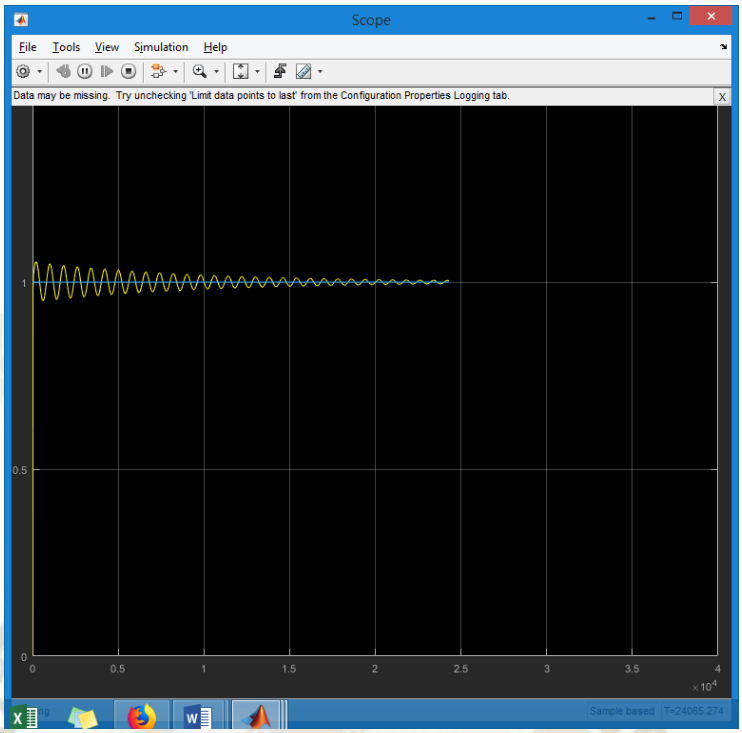
Fuente: Elaboración Propia

Se hallaron estos parámetros según el Matlab(R) para el proceso. Pero ya en la práctica se tuvieron que cambiar porque el proceso de temperatura es muy lento por lo cual como se sabe los alumnos de la carrera profesional de ingeniería electrónica tienen practicas con 2 horas de duración, con los parámetros del MatLab(R) tiene una mejor estabilización pero demora 4 horas en llegar a realizar un periodo mientras que con los parámetros cambiados el proceso demora 1:30 horas en realizar la estabilización. Se reemplazaron los resultados de la práctica en la simulación, y lo que se obtuvo fue una respuesta parecida.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 50: Simulación de control PID en cascada con el paso del tiempo

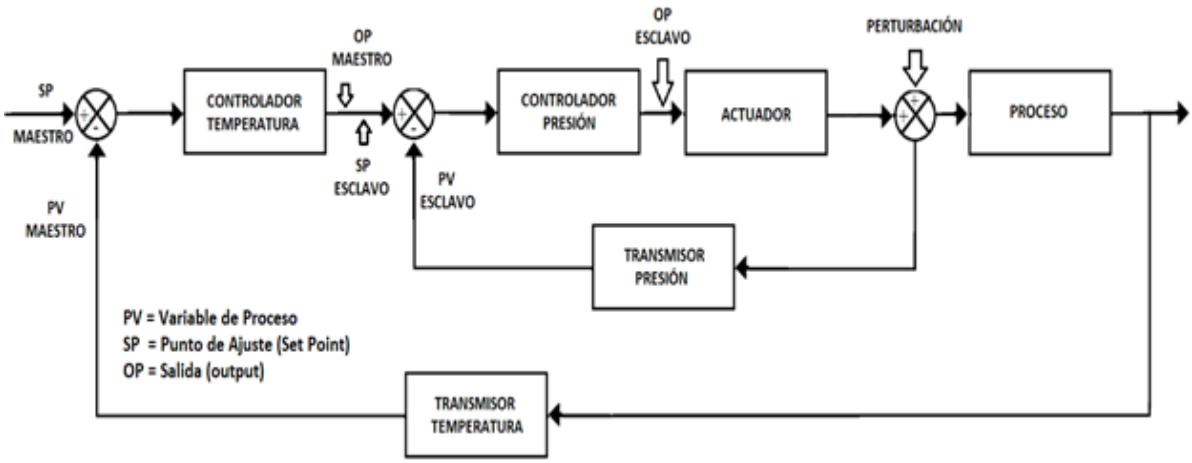


Fuente: Elaboración Propia

Por último se obtuvo una estabilización con el paso del tiempo.

Se muestra nuestro diagrama de bloques de control en cascada

Figura N° 51: Diagrama de bloques de control en cascada



Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.12. USO Y CONFIGURACION DE TWIDO SUITE

Para comenzar a programar en TWIDO SUITE hay que descargar e instalar el programa el cual es gratuito, abriremos el programa dándole doble click en el icono:

Figura N° 52: Símbolo de TWIDO SUITE



Fuente: Elaboración Propia

Nos saldrá esta imagen por lo cual nos preguntara en que idioma queremos trabajar, se recomienda trabajar en el idioma INGLES, una vez seleccionado el idioma se da click en la opción ¨Programming Mode¨ el cual nos permitirá empezar a programar.

Figura N° 53: Elección de idioma y programación



Fuente: Elaboración Propia

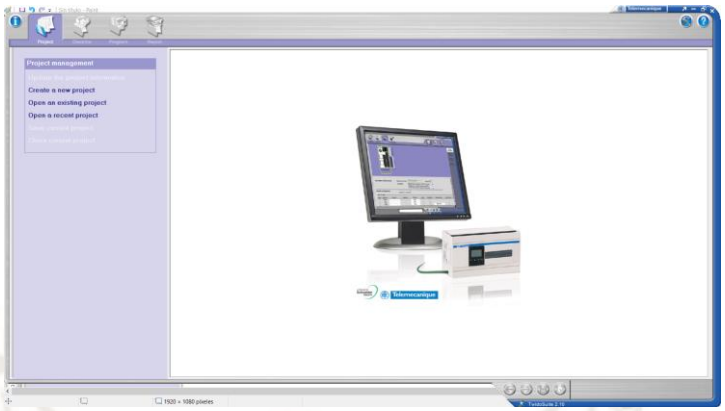
Tenemos la pantalla inicial con tres opciones: Crear un nuevo proyecto, Abrir un proyecto existente y Abrir un proyecto reciente. Le daremos click en ¨Crear un nuevo proyecto¨.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

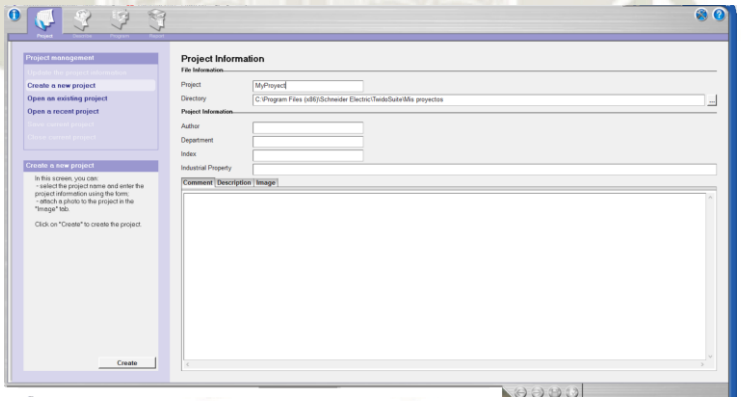
Figura N° 54: Primera interface de TWIDO SUITE



Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que al presionar en Crear un nuevo Proyecto no muestra a mano izquierda las opciones de darle nombre a nuestro proyecto como también direccionar los archivos que crearemos a alguna carpeta en especial, también si es para alguna empresa nos da la opción de colocar los datos de la empresa. Una vez llenados los requerimientos presionamos el botón ¨CREATE¨ para pasar al siguiente paso:

Figura N° 55: Ingreso de nombre del proyecto



Fuente: Elaboración Propia

Una vez presionado ¨CREATE¨ veremos cómo se nos habilitan tres opciones

Figura N° 56: Opciones de configuración



Fuente: Elaboración Propia

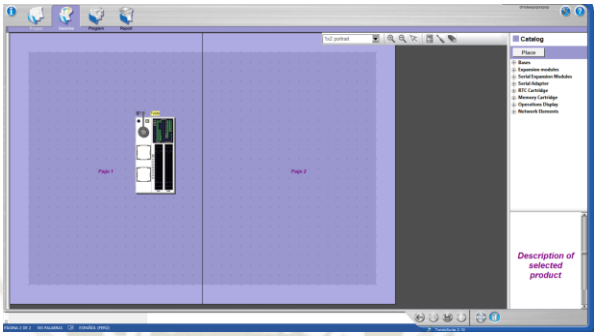
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Empezaremos por la opción ¨DESCRIBE¨ el cual nos permitirá arrastrar el tipo de PLC que usaremos así como los cartuchos de expansión.

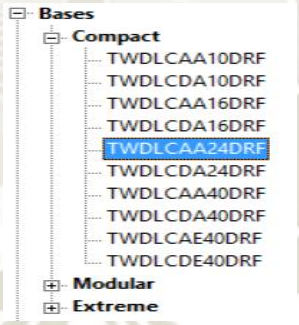
Figura N° 57: Primera opción DESCRIBE



Fuente: Elaboración Propia

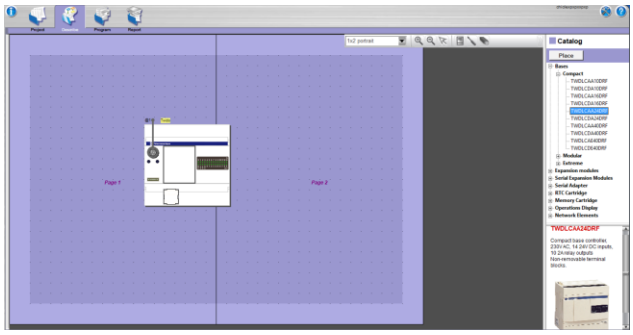
Primero buscaremos el PLC que deseamos ¨TWDLCAA24DRF¨, en este caso iremos a mano derecha en Bases, luego Compact y el PLC que requerido, una vez seleccionado lo arrastramos y lo colocamos en vez del PLC que nos sale por defecto en la pantalla.

Figura N° 58: Selección de modulo a usar



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 59: PLC en pantalla de trabajo



Fuente: Elaboración Propia

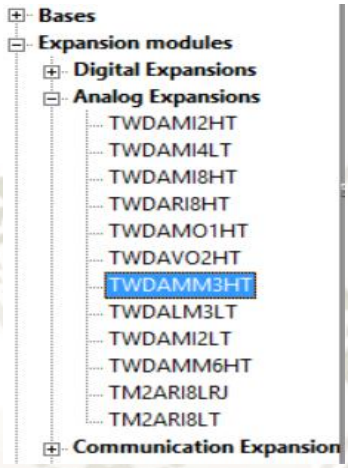
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

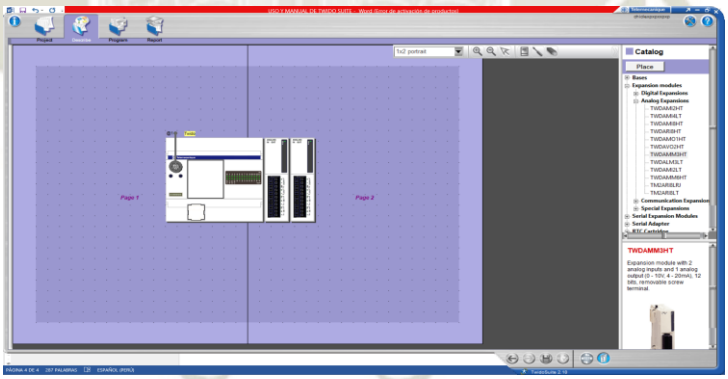
Una vez ingresado el PLC, se procede a buscar y seleccionar nuestros módulos de expansión, entonces seleccionamos Expansión Modules, Analog Expansions y por último el cartucho ¨TWDAMM3HT¨ que es el que usaremos. Tiene por características dos entradas analógicas y una salida analógica.

Figura N° 60: Elección de módulos de expansión usados en proceso



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 61: PLC y módulos de expansión en espacio de trabajo



Fuente: Elaboración Propia

Una vez seleccionados los equipos que vamos a utilizar tanto en físico como en la simulación procedemos a pasar a la opción ¨PROGRAM¨ y ¨CONFIGURE¨.

Figura N° 62: Opción programa



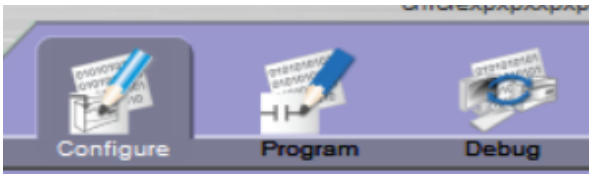
Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 63: Opción configure

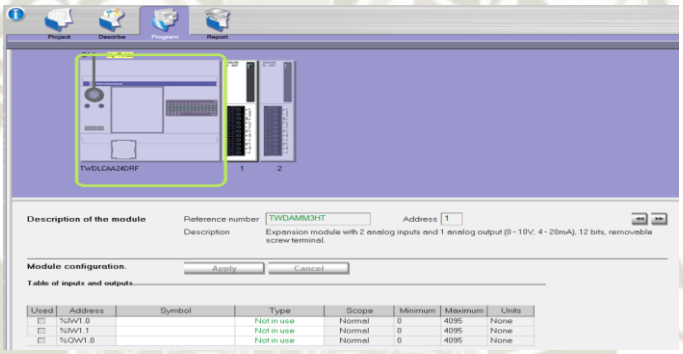


Fuente: Elaboración Propia

Esta opción nos permite configurar los rangos de trabajo en los cartuchos de entradas o salidas analógicas, como también realizar la lógica del programa en diferentes lenguajes.

Comenzaremos configurando el cartucho ¨TWDAMM3HT¨

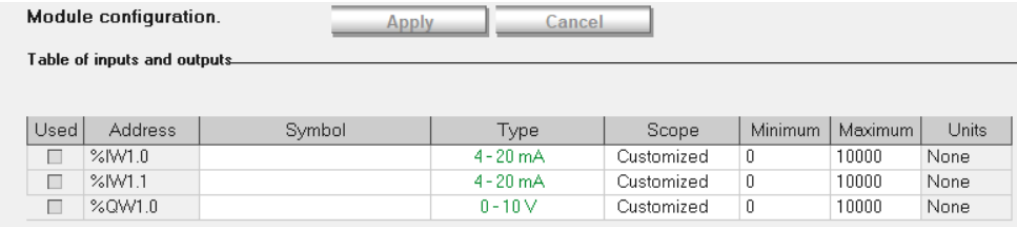
Figura N° 64: Configuración de TWDAMM3HT



Fuente: Elaboración Propia

El cual la entrada de presión y temperatura serán de 4 a 20 mA y la salida de la válvula de 0 a 10v. También configuraremos los rangos en lenguaje maquina el cual serán de 0 a 10000 para las tres variables y al final le daremos APPLY para guardar la configuración.

Figura N° 65: Cambio de parámetro en TWDAMM3HT



Used	Address	Symbol	Type	Scope	Minimum	Maximum	Units
☐	%IW1.0		4 - 20 mA	Customized	0	10000	None
☐	%IW1.1		4 - 20 mA	Customized	0	10000	None
☐	%QW1.0		0 - 10 V	Customized	0	10000	None

Fuente: Elaboración Propia

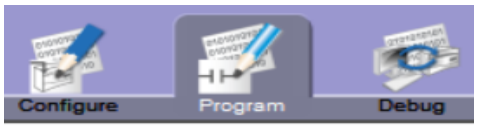
Luego pasaremos a realizar el programa en lenguaje ladder por ende en la misma opción de ¨PROGRAM¨ pasaremos a la opción ¨PROGRAM¨

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 66: Opción programa



Fuente: Elaboración Propia

Aquí tenemos que configurar el programa en general, primero agregaremos una sección por lo cual le damos a:

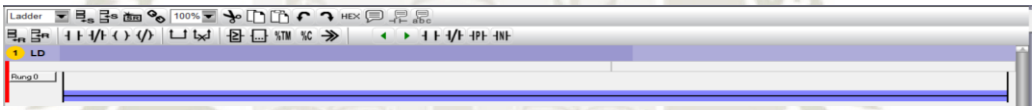
Figura N° 67: Selección de sección



Fuente: Elaboración Propia

Obteniendo:

Figura N° 68: Creación de sección



Fuente: Elaboración Propia

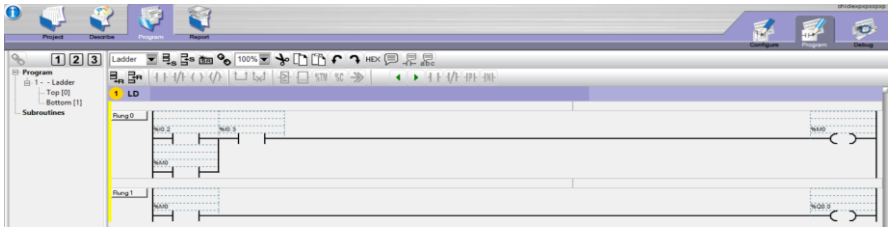
Luego colocamos las entradas START y STOP y la salida para activar y desactivar el chispero.

Figura N° 69: Selección de entradas y salidas



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 70: Diagrama de bloques de control en cascada



Fuente: Elaboración Propia

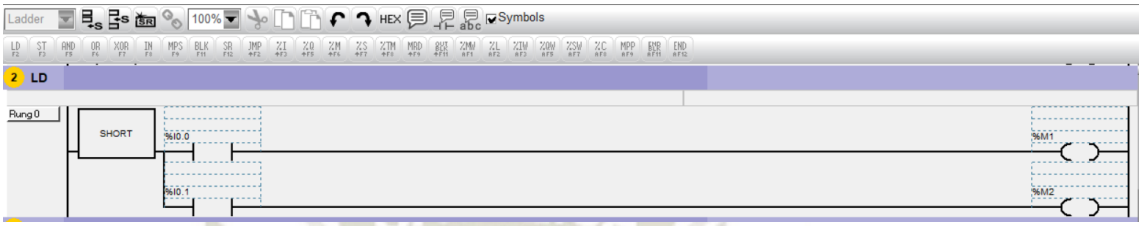
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Continuaremos con la configuración del programa, en este caso aplicaremos el bloque SHORT el cual permite la continuidad a través del escalón sin tener en cuenta los resultados de la última operación lógica. Configuramos los sensores de nivel alto y nivel bajo en las entradas %I0.0 e %I0.1.

Figura N° 71: Selección de sensores de nivel bajo y alto



Fuente: Elaboración Propia

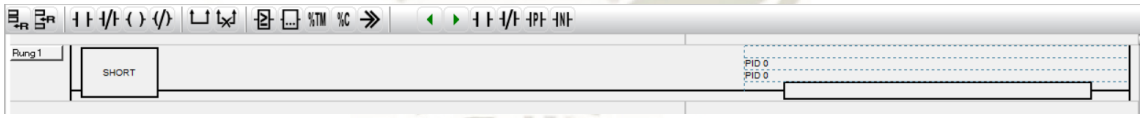
Finalmente continuamos con la programación del PID el cual arrastramos el bloque:

Figura N° 72: Selección de bloque PID



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 73: Creación de bloque PID



Fuente: Elaboración Propia

El TWIDO SUITE tiene muchas herramientas de configuración como, contadores, temporizadores, entradas, salidas, bloques de comparación, bloques de operaciones matemáticas, etc.

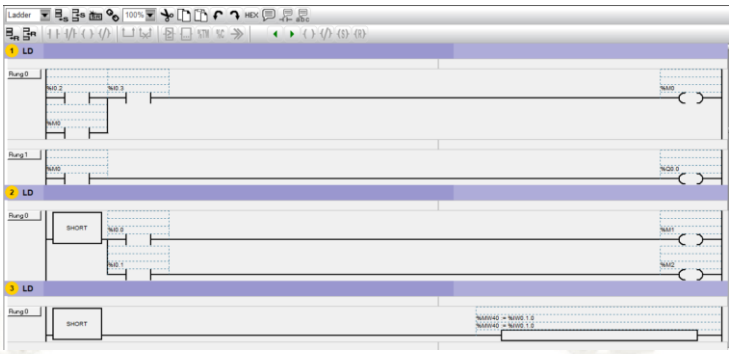
Una vez ya configurado el programa:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

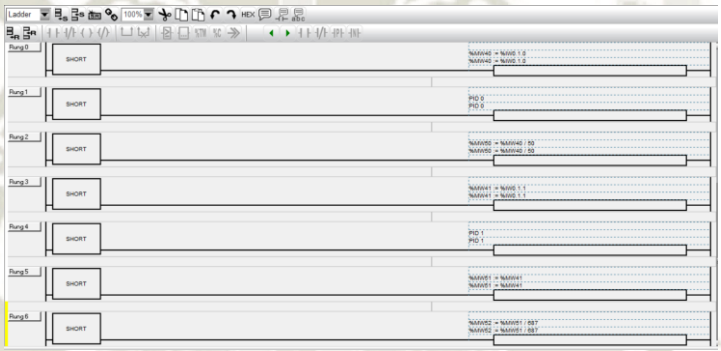
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 74: Configuración de primera parte del programa



Fuente: Elaboración Propia

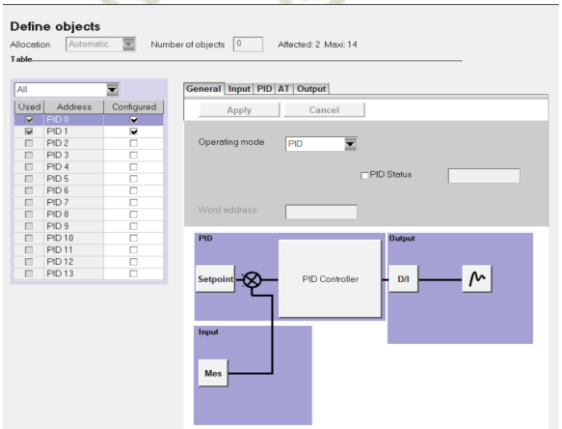
Figura N° 75: Configuración de segunda parte del programa



Fuente: Elaboración Propia

Una vez ya culminado nuestro programa seguimos con la configuración de los bloques PID0 y PID1, en este caso el PID0 será mi bloque de temperatura y PID1 será mi bloque de presión. Le daremos click al bloque de PID0 el cual nos dará:

Figura N° 76: Configuración PID0



Fuente: Elaboración Propia

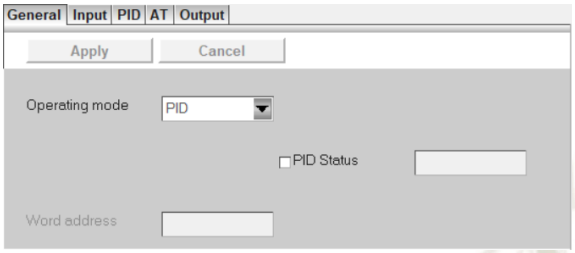
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Comenzaremos configurando el bloque PID0, ingresamos a la opción GENERAL y como nuestro lazo es el maestro elegiremos un control PID.

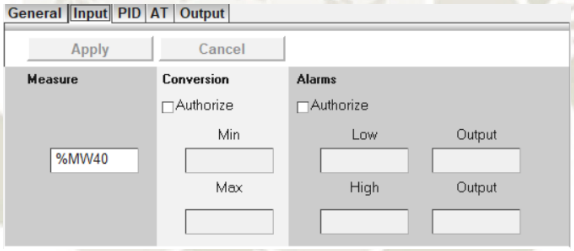
Figura N° 77: Configuración PID0 opción general



Fuente: Elaboración Propia

Luego pasamos a la opción INPUT el cual nos permitirá ingresar nuestra palabra de medición en este caso será %MW40 el ingreso de la temperatura, nos muestra otras opciones como ingresar la conversión y las alarmas.

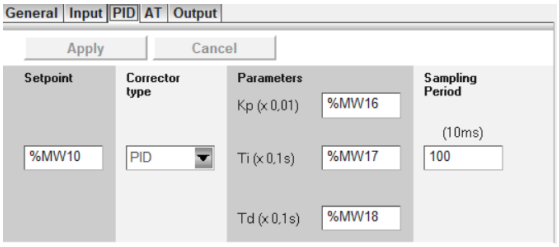
Figura N° 78: Configuración PID0 opción input



Fuente: Elaboración Propia

Continuamos configurando la opción PID en el cual podemos configurar nuestro setpoint el cual será la entrada %MW10, también los parámetros de sintonización que en esta programación será Kp=%MW16 Ti=%MW17 Td=%MW18 por ultimo el periodo por defecto será 100.

Figura N° 79: Configuración PID0 opción PID



Fuente: Elaboración Propia

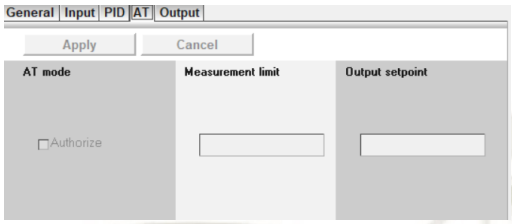
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El bloque AT (autotuning) nos ayuda el programa a poder sintonizar automáticamente y poder obtener los valores de sintonización ayudándonos del programa, en este caso no usaremos esta opción.

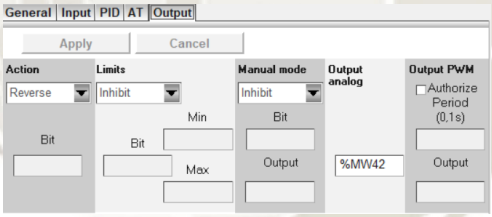
Figura N° 80: Configuración PID0 opción AT



Fuente: Elaboración Propia

Por ultimo configuramos el bloque OUTPUT el cual en esta programación solo configuraremos la salida le daremos la palabra %MW42, debemos de recordar que en este sistema de control usaremos el cascada por ende la salida será la consigna de nuestro siguiente lazo de control.

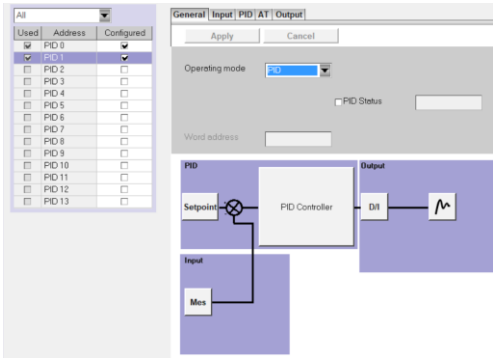
Figura N° 81: Configuración PID0 opción output



Fuente: Elaboración Propia

Presionamos el siguiente lazo de control o PID1

Figura N° 82: Configuración PID1



Fuente: Elaboración Propia

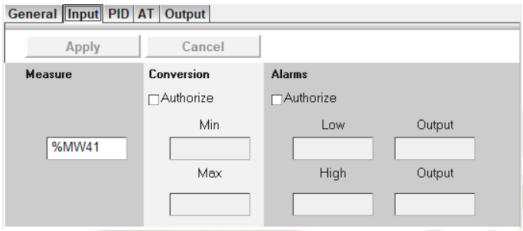
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Luego pasamos a la opción INPUT el cual nos permitirá ingresar nuestra palabra de medición en este caso será %MW41 el ingreso de la presión, nos muestra otras opciones como ingresar la conversión y las alarmas.

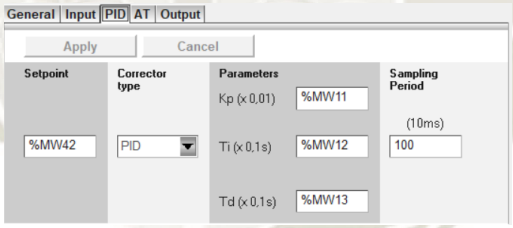
Figura N° 83: Configuración PID1 opción input



Fuente: Elaboración Propia

Continuamos configurando la opción PID en el cual podemos configurar nuestro setpoint el cual será la salida del lazo PID 0 en este caso es %MW42, también los parámetros de sintonización que en esta programación será Kp=%MW11 Ti=%MW12 Td=%MW13 por ultimo el periodo por defecto será 100.

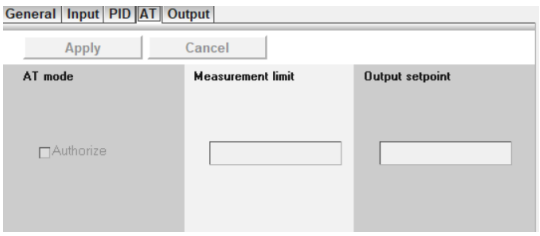
Figura N° 84: Configuración PID1 opción PID



Fuente: Elaboración Propia

El bloque AT (autotuning) nos ayuda el programa a poder sintonizar automáticamente y poder obtener los valores de sintonización ayudándonos del programa, en este caso no usaremos esta opción.

Figura N° 85: Configuración PID1 opción AT



Fuente: Elaboración Propia

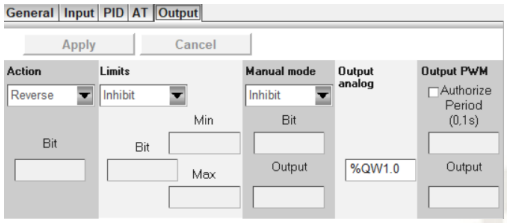
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Por ultimo configuramos el bloque OUTPUT el cual en esta programación será quien mande el movimiento al actuador final %QW1.0.

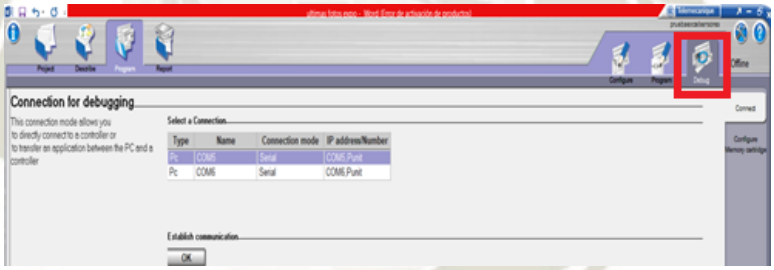
Figura N° 86: Configuración PID1 opción output



Fuente: Elaboración Propia

Una vez ya configurados nuestros lazos de control maestro y esclavo, colocados en control cascada procederemos a ingresar los parámetros de sintonización en el programa, para esto ingresamos a la opción ¨DEBUG¨ y nos conectaremos buscando el modo de conexionen este caso es serial.

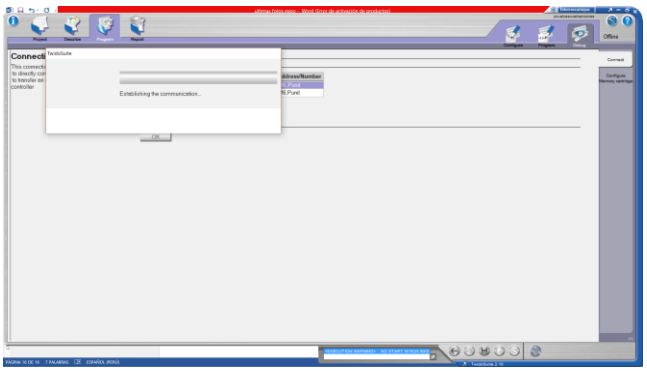
Figura N° 87: Ingreso de opción DEBUG



Fuente: Elaboración Propia

Le daremos OK y esperaremos que el programa de la PC ingrese al PLC:

Figura N° 88: Traspaso de programa de PC a PLC



Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Una vez culminado de cargar el programa en el PLC nos saldrá una ventana para poder correr o parar el programa.

Figura N° 89: Ventana RUN y STOP del programa



Fuente: Elaboración Propia

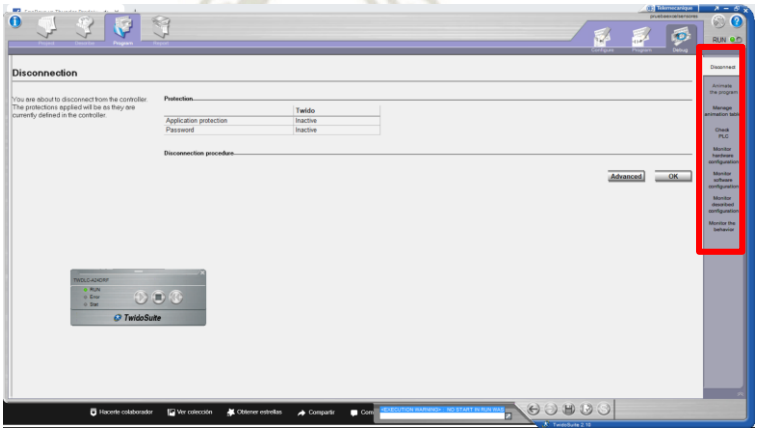
También se nos habilitaran en la parte derecha unas opciones de monitoreo y configuración la cual detallamos:

Figura N° 90: Opciones del programa



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 91: Opciones de programa en pantalla



Fuente: Elaboración Propia

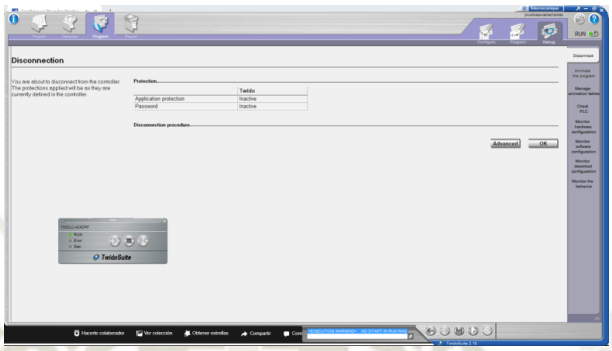
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La primera se llama DISCONECT el cual nos ayudara a desconectar nuestra PC con el PLC en el caso que necesitemos modificar el programa, parámetros o simplemente apagar el equipo.

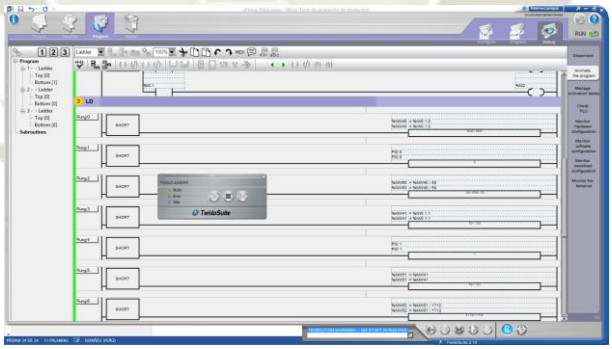
Figura N° 92: Configuración DEBUG opción disconnect



Fuente: Elaboración Propia

El segundo se llama ANIMACION DEL PROGRAMA en el podremos ver el programa que hayamos creado al momento de darle RUN se podrá apreciar cómo se activan o desactivan las entradas y salidas como también la visualización de la medición de nuestros sensores.

Figura N° 93: Configuración DEBUG opción animación del programa



Fuente: Elaboración Propia

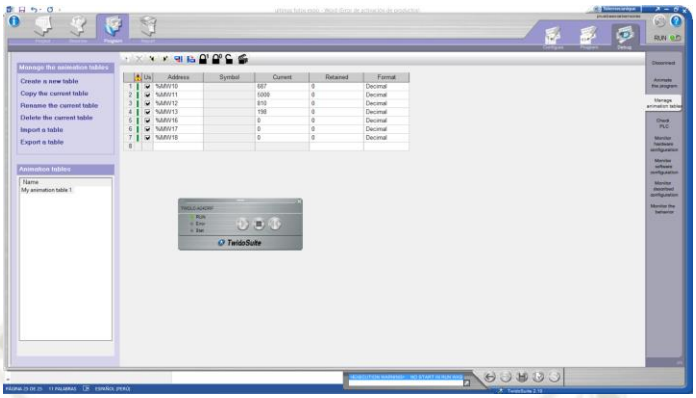
El tercero se llama TABLAS DE ANIMACION, en este bloque podremos colocar los parámetros de sintonización de nuestro sistema, crear palabras y mediante la configuración en los parámetros PID darles funciones, por ejemplo en la imagen se puede la palabra %MW10, si vamos al bloque PID veremos que esta palabra está asignada a mi setpoint, se pueden crear muchas palabras y asignarles diferentes usos como retención de datos, darles parámetros específicos etc.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

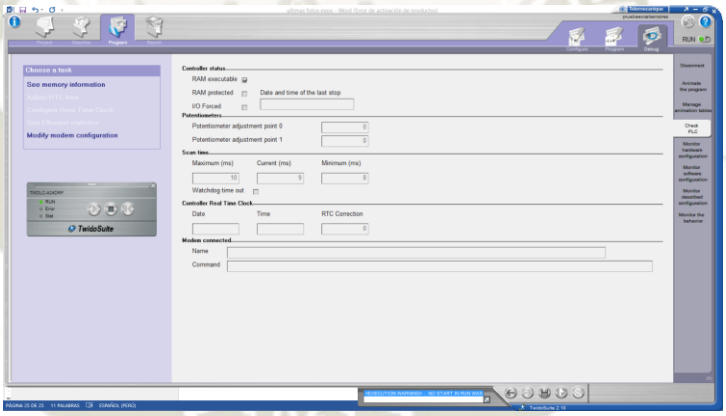
Figura N° 94: Configuración DEBUG opción tablas de animación



Fuente: Elaboración Propia

El cuarto se llama VER PLC, el cual tiene la opción de verificar el estatus del controlador, tiempo de escaneo, tiempo real del controlador, modem conectado etc.

Figura N° 95: Configuración DEBUG opción ver PLC



Fuente: Elaboración Propia

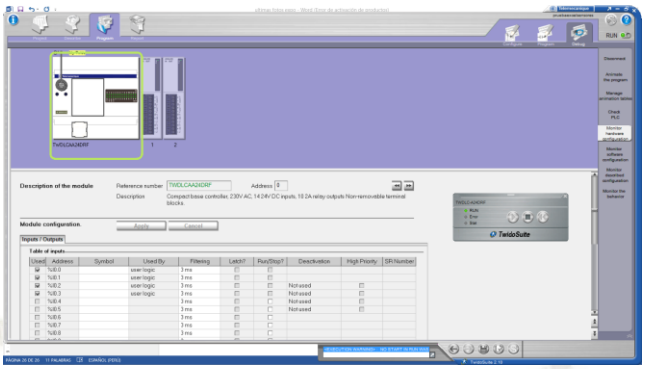
El quinto se llama MONITOREAR LA CONFIGURACION DE HARDWARE, aquí podremos revisar la configuración de hardware, estatus del PLC, cartuchos de expansión, sus configuraciones, rangos, etc. Si en esta parte nos damos cuenta de algún error y necesitamos cambiar algún rango o configuración, debemos desconectarnos yendo a la primera opción y recién cambiar los datos ya que conectado el programa no nos dejara realizar alguna modificación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 96: Configuración DEBUG opción monitorear configuración de hardware

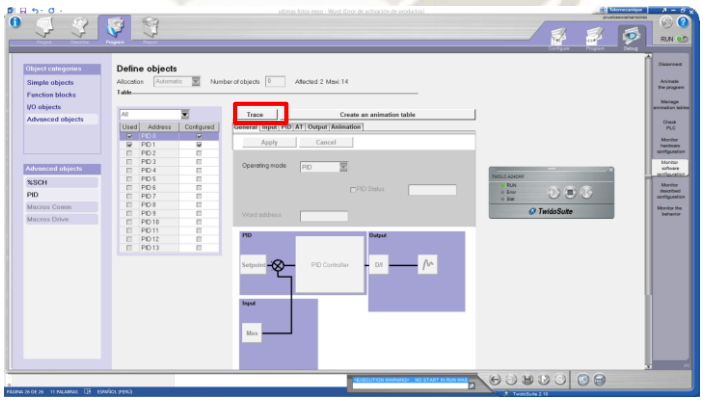


Fuente: Elaboración Propia

El sexto se llama MONITOREAR LA CONFIGURACION DEL SOFTWARE, el cual nos permitirá visualizar la configuración de los bloques de programación como, bloques PID, bloques Contadores, entradas, salidas, comparadores, etc.

La opción TRACE nos permitirá obtener la gráfica de nuestro setpoint y nuestro valor medido para ir monitoreando cómo se comportan, el programa TWIDO SUITE solo nos permite abrir una gráfica a la vez por lo que si abrimos la gráfica de temperatura no podremos ver la de presión y al revés, para ver la otra variable hay que cerrar primero la que está abierta y segundo abrir la otra.

Figura N° 97: Configuración DEBUG opción monitorear configuración de software



Fuente: Elaboración Propia

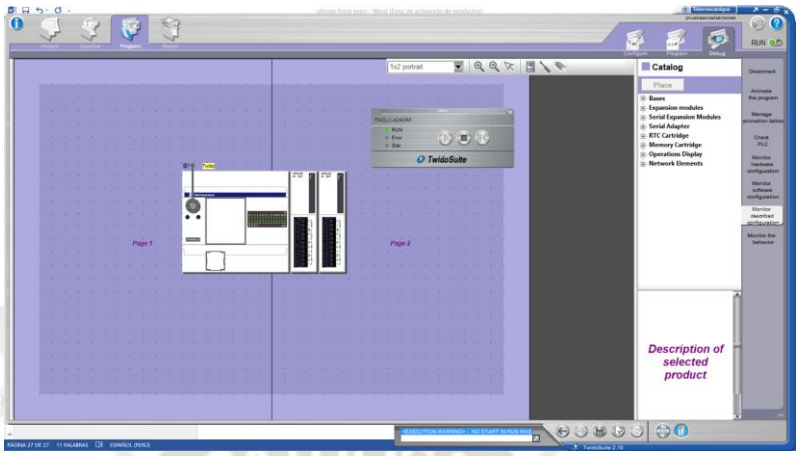
El séptimo se llama MONITOREAR LA CONFIGURACION DESCRITA aquí podremos ver cómo está constituido nuestro controlador según que hayamos arrastrado a la pantalla al comienzo de la configuración, en este caso podemos ver un PLC y dos módulos de expansión que fueron los instalados tanto en físico como en el programa.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

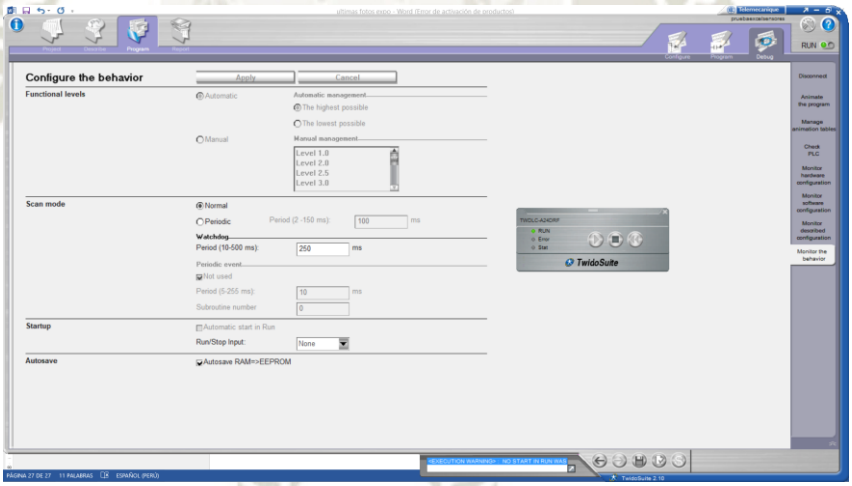
Figura N° 98: Configuración DEBUG opción monitorear configuración descrita



Fuente: Elaboración Propia

La última opción se llama MONITOREAR EL COMPORTAMIENTO, en esta opción se puede apreciar la configuración del periodo, la versión del programa, etc.

Figura N° 99: Configuración DEBUG opción monitorear el comportamiento



Fuente: Elaboración Propia

Una vez terminados de colocar los parámetros de sintonización en el programa se procede a presionar el botón de RUN y el programa comenzara a realizar el control en cascada para las variables de la presión y temperatura.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.13. PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE CALDERA

A continuación, mostramos las etapas de la construcción de nuestro caldero, como apreciamos en la figura N° 100 tenemos la estructura y el caldero ya construido listos para asegurar e instalar el tablero de control.

Como medida de seguridad cerraremos el área del quemador dejando ingresos de aire para que pueda realizarse bien la combinación de aire, combustible y chispa para encender el quemador

Figura N° 100: Soporte y tanque de caldera



Fuente: Elaboracion propia

Figura N° 101: Instalacion de quemador y chispero



Fuente: Elaboracion Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El siguiente paso es implementar la caldera con los dispositivos de control, los cuales enumeraremos a continuacion:

Figura N° 102: Casquete de PT100



Fuente: Elaboracion propia

Figura N° 103: Manometro de visualizacion de presión.



Fuente: Elaboracion propia

Figura N° 104: Trasductor de PT 100



Fuente: Elaboracion Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

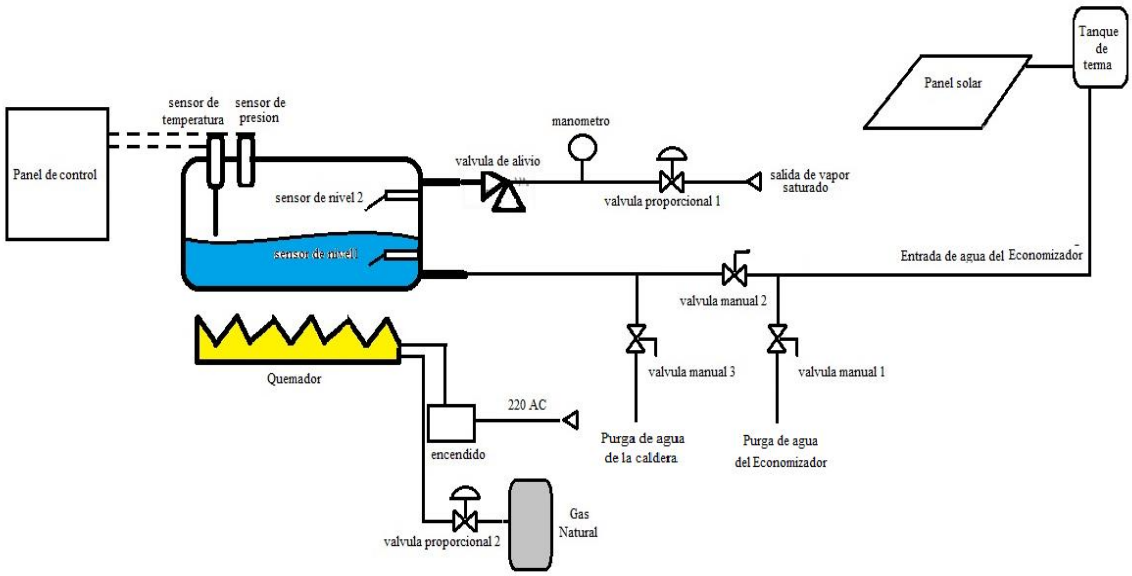
A continuacion se muestra la instalacion en caldera del Pt 100:

Figura N° 105: Instalacion en caldera del Pt 100



Fuente: Elaboracion Propia

Figura N° 106: Esquema de instrumentacion de sensores y actuadores.



Fuente: Elaboracion Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura N° 107: Estructura y caldera en construccion



Fuente: Elaboracion Propia

Figura N° 108: Montado final de sensores y equipos de caldera.



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 109: Tablero de control



Fuente: Elaboración Propia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.14. DESCRIPCION DE TABLERO

Para comenzar el tablero tiene un tamaño de 40cm de largo por 50cm de alto ahora se describirán los componentes e instrumentos que se encuentran instalados dentro del tablero:

Figura N° 110: Tablero de control de caldera parte externa



Fuente: Elaboración Propia.

3.14.1 Pulsadores

Marca: CHINT
Modelo: NP2
Alimentación: 24Vdc
Cantidad: 2

Figura N° 111: Pulsadores CHINT

NO (Normalmente abierto)



NC (Normalmente cerrado)



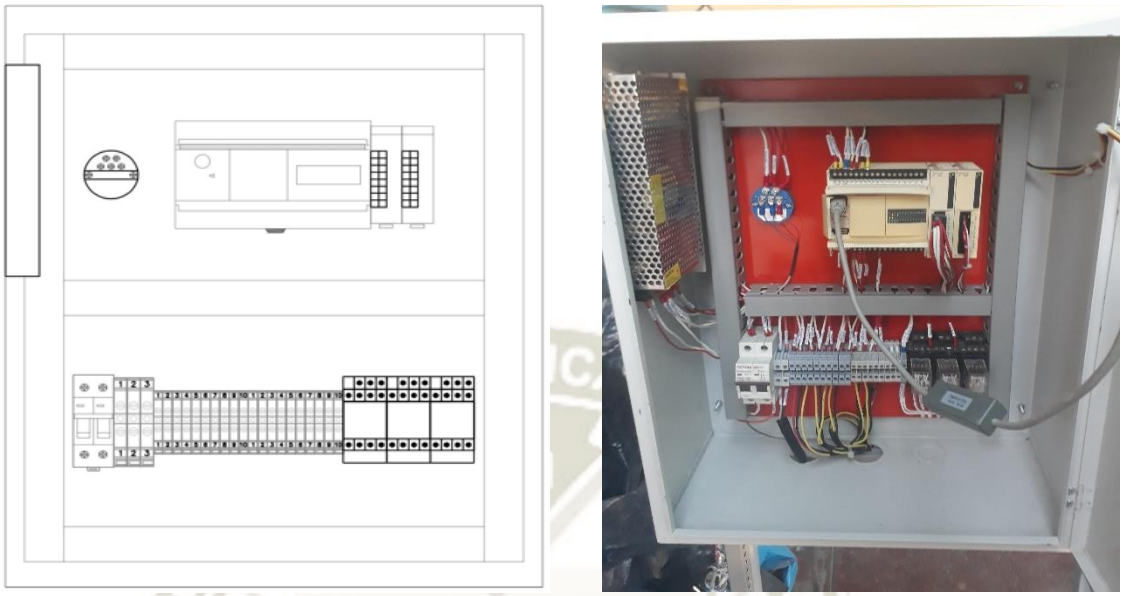
Fuente: Elaboración Propia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Ahora describiremos el tablero por dentro:

Figura N° 112: Tablero de control de caldera parte interna



Fuente: Elaboración Propia.

3.14.2 PLC TWIDO

Modelo: TWDLCAA24DRF

Alimentación: 100 – 240 Vac

Salida: 24 Vdc

Cantidad: 1

Cuenta con 14 entradas digitales y 10 salidas de relé

Figura N° 113: PLC TWIDO TWDLCAA24DRF



Fuente: Elaboración Propia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.14.3 Módulo de expansión de PLC TWIDO

Modelo: TWDAMM3HT

Alimentación: 24 Vdc

Entradas analógicas: 2

Salidas analógicas: 1

Cantidad: 2

Figura N° 114: Módulo de expansión TWDAMM3HT



Fuente: Elaboración Propia.

3.14.4 Transductor PT100

Tipo: Conversor RTD PT100 a 4 – 20 mA

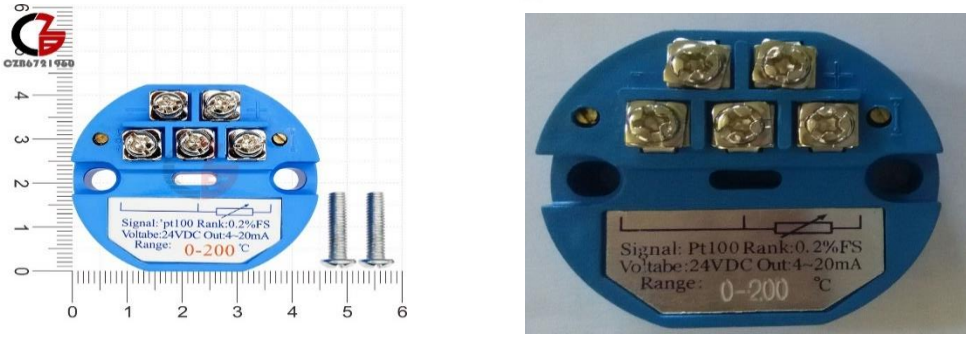
Alimentacion: 24 Vdc

Salida: 4 – 20 mA

Rango: 0 – 200 °C

Cantidad: 1

Figura N° 115: Conversor RTD PT100 a 4-20 mA



Fuente: Elaboración Propia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.14.5 Interruptor termo magnético

Marca: Stronger

Modelo: SGM6K/2 bipolar

Caracteristica: Proteccion contra cortocircuitos y sobrecargas en el consumo electrico

Amperaje: 32 A

Voltaje: 230 – 400V

Cantidad: 1

Soporte corriente cortocircuito: 6000 A

Figura N° 116: Interruptor temo magnético



Fuente: Elaboración Propia.

3.14.6 Relé

Marca: Camsco

Contactos: 4 NO (normalmente abierto) y 4 NC (normalmente cerrado)

Pines o borneras: 14

Alimentacion: 220 Vac

Cantidad: 3

Figura N° 117: Relé camsco



Fuente: Elaboración Propia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.14.7 Fuente de alimentación

Marca: LE TING
Modelo: HB – 9500
Alimentacion: 220Vac
Salida: 24 Vdc
Amperaje: 30 A
Cantidad: 1
Caracteristica: Convertir corriente alterna a corriente continua para los instrumentos.

Figura N° 118: Fuente de alimentación



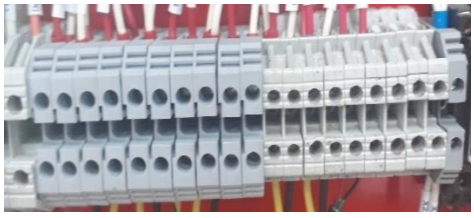
Fuente: Elaboración Propia.

3.14.8 Borneras o borne de paso

Montaje: Carril DIN
Conexión: Tornillo
Color: Gris
Voltage nominal: 600V
Corriente nominal: 40A
Cantidad: 22

Figura N° 119: Borne de paso





Fuente: Elaboración Propia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.15. NORMAS DE TABLERO

El tablero de control de la caldera fue diseñado para que tenga ciertas caracteristicas de proteccion según las normas se pueden describir las siguientes:

La Norma 250 de la National Electrical Manufacturer's Association (NEMA). Similar a la IEC 60529, la norma NEMA 250 cubre gabinetes para equipo eléctrico. Igual que la IEC 60529, NEMA 250 se ocupa de la protección contra el ingreso, pero difiere en que también se ocupa de las especificaciones que detallan los criterios mínimos de la construcción, el rendimiento, de pruebas, la resistencia a la corrosión y mucho más.

Figura N° 120: Norma NEMA 250

	NEMA		Calificación del gabinete
	Sólidos	Líquidos	
INTERIORES	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y contra el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae)	Sin protección	Tipo 1
INTERIORES	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y contra el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (goteo y salpicaduras ligeras)	Tipo 2
INTERIORES	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y contra el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae y asentamiento de polvo, pelusa, fibras y contaminantes aéreos)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (goteo y salpicaduras ligeras)	Tipo 5
INTERIORES	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae y polvo, pelusa, fibras y contaminantes circulantes)	Proporciona protección contra el ingreso de agua (goteo y salpicaduras ligeras) y salpicaduras ligeras o filtración de aceite y refrigerantes no corrosivos	Tipo 12
INTERIORES	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae y polvo, pelusa, fibras y contaminantes circulantes)	Proporciona protección contra el ingreso de agua (goteo o salpicaduras ligeras) y rocío, salpicaduras y filtración de aceite y refrigerantes no corrosivos	Tipo 13
INTERIORES O AL AIRE LIBRE	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae y polvo soplado por el viento)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (lluvia, aguanieve o nieve llevada por el viento)	Tipo 3
INTERIORES O AL AIRE LIBRE	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (caída de lluvia, aguanieve o nieve)	Tipo 3R
INTERIORES O AL AIRE LIBRE	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae y polvo soplado por el viento)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (lluvia, aguanieve, salpicadura de agua y agua dirigida con manguera)	Tipo 4
INTERIORES O AL AIRE LIBRE	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae y polvo soplado por el viento)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso de agua (lluvia, aguanieve, nieve, salpicadura de agua, y agua dirigida con manguera) y proporciona un mayor nivel de protección contra la corrosión	Tipo 4X
INTERIORES O AL AIRE LIBRE	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso del agua (dirigido con manguera y la inmersión temporal esporádica a profundidad limitada)	Tipo 6
INTERIORES O AL AIRE LIBRE	Proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y el ingreso de objetos extraños sólidos (suciedad que cae)	Proporciona un grado de protección contra el ingreso del agua (dirigido con manguera y la inmersión prolongada a una profundidad limitada)	Tipo 6P

Fuente: Elaboración Propia.

El tablero cumple con la norma NEMA 250 Tipo 5 el cual para objetos solidos proporciona un grado de protección contra el acceso a piezas peligrosas y contra el ingreso de objetos extraños solidos (suciedad que cae y asentamiento de polvo, pelusa, fibras y contaminantes aéreos) y para liquidos proporciona un grado de protección conta el ingreso de agua (goteo y salpicaduras ligeras)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

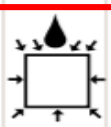
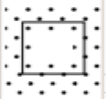
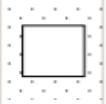
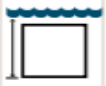
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Norma 60529 de la International Electrotechnical Commission (IEC) La IEC es la organización líder en el mundo que elabora y publica normas internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y afines. Normalmente conocida como la Protección IP, estos códigos reflejan la capacidad del gabinete eléctrico de proteger contra el acceso a partes electrificadas por parte de personas, herramientas, humedad, polvo o suciedad.

Figura N° 121: Norma IEC 60529

Calificaciones IP para gabinetes

Primer número			Segundo número		
IP		Prueba IP	IP		Prueba IP
0		Sin protección	0		Sin protección
1		Protegido contra objetos sólidos de hasta 50 mm, p.ej. toque accidental con las manos	1		Protegido contra gotas de agua que caen verticalmente, p.ej. condensación
2		Protegido contra objetos sólidos de hasta 12 mm, p.ej. dedos	2		Protegido contra el rocío directo de agua hasta 15de la vertical
3		Protegido contra objetos sólidos de más de 2.5 mm, p.ej. herramientas y alambres	3		Protegido contra el rocío a 60° de la vertical
4		Protegido contra objetos sólidos de más de 1 mm	4		Protegido contra el rocío de agua desde todas las direcciones (se permite un ingreso limitado)
5		Protegido contra el polvo (ingreso limitado, sin acumulación dañina)	5		Protegido contra chorros a baja presión de agua desde todas las direcciones (se permite un ingreso limitado)
6		Totalmente protegido contra el polvo	6		Protegido contra chorros fuertes de agua
			7		Protegido contra los efectos de inmersión entre 15 cm y 1 m

Fuente: Elaboración Propia.

El tablero cumple con la norma IEC 60529 IP54 el primer numero nos indica que nuestro tablero esta protegido contra el polvo (ingreso limitado, sin acumulacion dañina) y el segundo numero nos indica que el tablero esta protegido contra el rocio de agua desde todas las direcciones (se permite un ingreso limitado).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

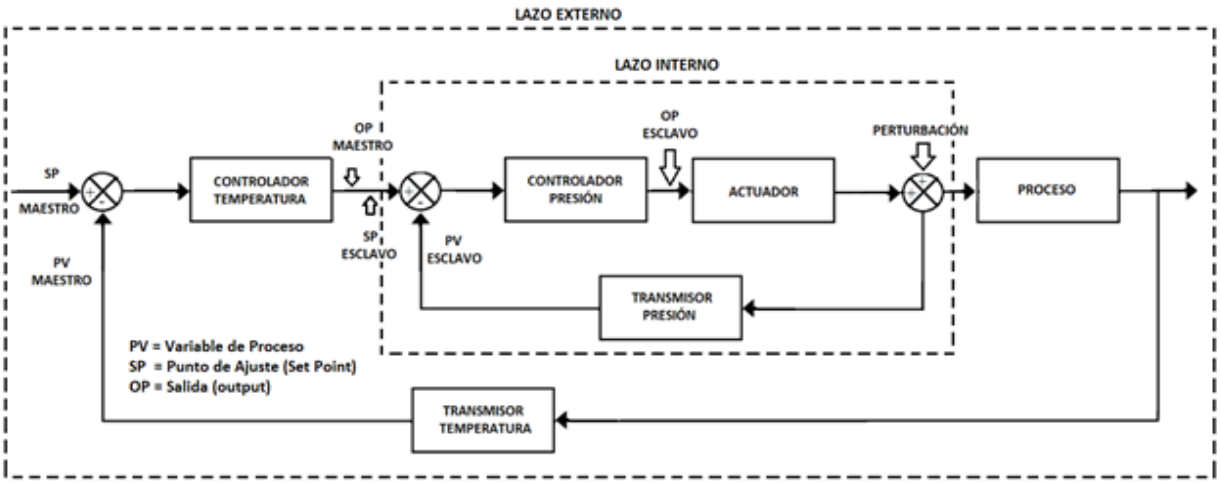
3.16. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL

En la etapa de control de la caldera debemos primero identificar el tipo de caldera que se construyo, que en nuestro caso es una maquina de vapor de combustion externa, en la que implementamos una estrategia de control en cascada.

Esta estrategia de control responde a la implementacion de un bloque PI en el lazo interno, con la finalidad que tenga una respuesta rapida a la inyeccion de gas para el calentamiento del domo, asi mismo realizar la medicion de la temperatura a travez de un sensor RTD y un trasductor PT100 que enviara los datos hacia un PLC Twido el cual gobernara el proceso de acuerdo a la programacion establecida. La etapa de encendido del quemador se realiza con la apertura de la valvula proporcional incrementando su apertura de acuerdo a la nesecidad de calor en la caldera para evaporar el agua que ingreso y activo los sensores de nivel, el agua previamente realizo su ingreso desde el economizador a una temperatura de 35 a 40 °C y esta debe elevarse hasta unos 110 a 120 °C.

Para evaporar el agua y crear presión interna dentro del domo, la que sera medida por un sensor de presion y enviara la señal analogica hacia el plc el que completara el primer lazo de control con un PID de acuerdo a la presion que se desea obtener y enviando la señal al controlador para realizar el control en cascada. Cabe resaltar que los controladores de presion y temperatura se encuentran en el mismo PLC por medio de la funcion PID0 y PID1 que nos permite ingresar el programa TWIDO SUITE.

Figura N° 122: Diagrama de bloques de control en cascada



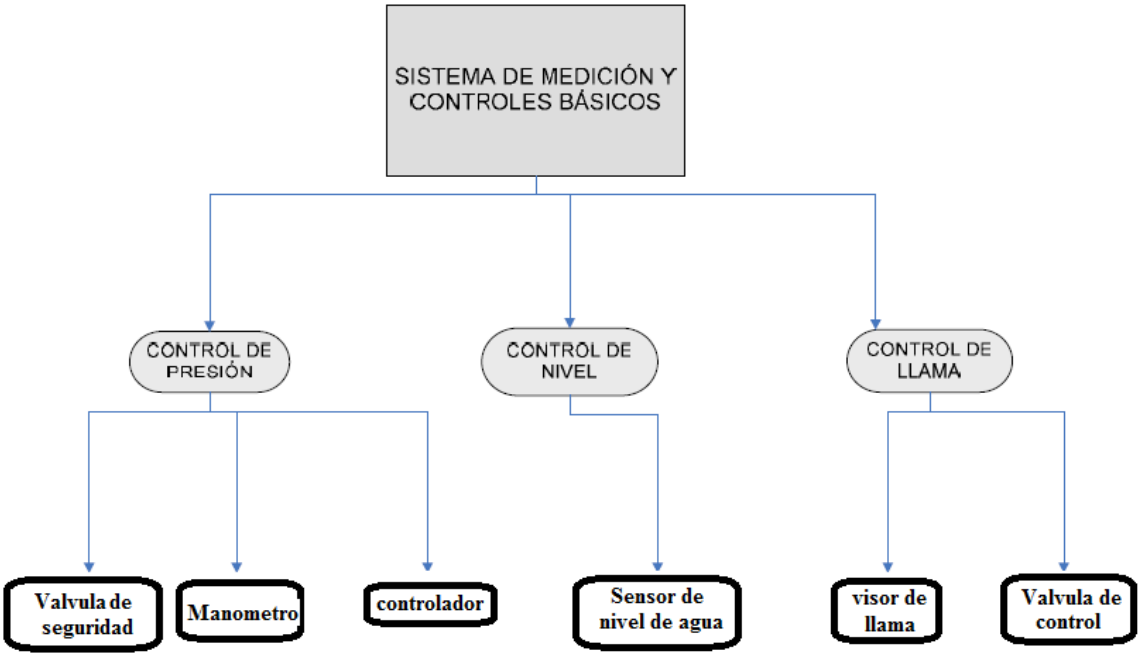
Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 123: Mapa conceptual de Instrumentos usados



Fuente: Elaboración Propia

3.17. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Para realizar un analisis del comportamiento del proceso es necesario realizar modelos matematicos que reflejen el funcionamiento de la caldera, en nuestro caso debemos ver el proceso de encendido de la caldera como una primera variable que servira de entrada al siguiente lazo de control.

El modelo matematico de un RTD se define por:

$$Rt = Ro(1 + \infty.To) \qquad (3.27)$$

Donde:

Rt= Resistencia termica

Ro= resistencia a temeratura To

α= Coeficiente de temperatura 0.0039

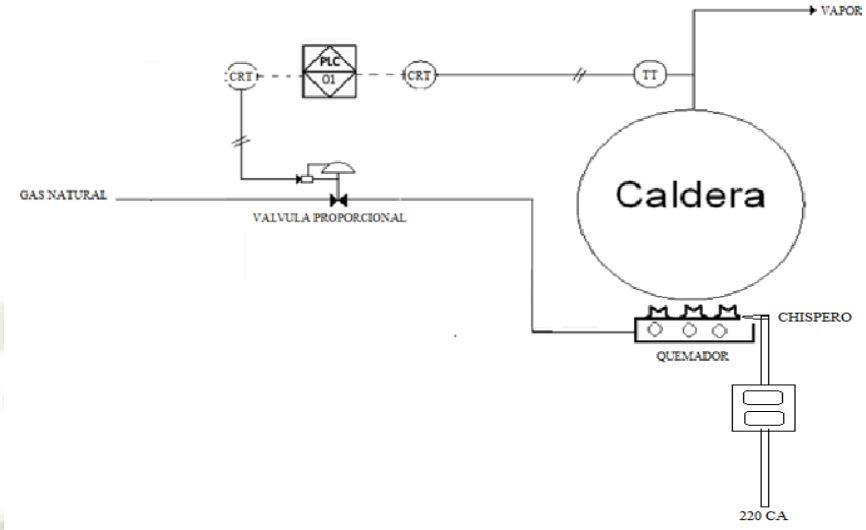
To= Incremento de temperatura con respecto a To

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 124: Esquema de control de encendido de la caldera



Fuente: Elaboración Propia

3.18. CÁLCULO DE LA FUERZA DE LA VÁLVULA DE SEGURIDAD

La presión de vapor del agua que ejerce sobre una superficie "S" correspondiente a un disco de 0,35 cm de diámetro (diámetro de abertura de la caldera a través de la perforación del tornillo de la válvula); radio = 0,175 cm.

La superficie sobre la que presiona el vapor es:

$$S = (Pi * r^2) = (Pi * 0{,}175 * 0{,}175) = 0.1cm^2 \quad (3.28)$$

$$S = \frac{3{,}14*0{,}352}{4} = 0{,}1\ cm^2 \quad (3.29)$$

Nosotros queremos regular la presión de la válvula a 2 bar = 20 N/cm^2

Usando la fórmula:

Por lo que a una presión de 20 N/cm2, le corresponderá una fuerza de:

$$F = p * s \quad (3.30)$$

$$F = 20\frac{N}{cm^2} * 0{,}1\ cm^2 = 2N \quad (3.31)$$

$$Presion = \frac{Fuerza}{Superficie} = \frac{F}{S} \quad (3.32)$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Esto significa que la válvula de seguridad debe abrirse cuando se aplica un peso de 200 gramos.

Antes de montar la válvula en la caldera, debe ajustarse y probarse usando una balanza pesacartas o de cocina.

No debe ajustarse la válvula de seguridad a más del doble de la presión de trabajo (1,5 bar = 150 gr). La válvula debe abrirse al aplicarle un peso de 300 gr.

Al estar el cilindro oscilante ajustado contra la base con un muelle, dicho mecanismo actúa como segunda válvula de seguridad, proporcionando una seguridad máxima.

$$S = \frac{\pi * d^2}{4} \tag{3.33}$$

$$S = \frac{3{,}14 * 0{,}352}{4} = 0.1\ cm^2 \tag{3.34}$$

3.19. GRAFCET DEL PROGRAMA

Luego de definida las leyes de control, se procedió a implementar la secuencia de pasos:

Asumimos condiciones iniciales en el bloque 1 donde se debe cumplir lo siguiente:

- Válvula paso de gas a un 0%, purgar la caldera con válvula manual
- Tablero de control energizado

Empezamos en INICIO, abrir válvula manual para ingreso de agua pre-calentada.

Programa escanea y pregunta si sensor de nivel bajo está en On o en OFF, una vez en ON se espera que llegue el agua al sensor de nivel alto, cuando llegue a activarse se detiene el agua manual.

Presionar el pulsador verde para iniciar el encendido del chispero, automáticamente comenzara el controlador (PLC) a realizar el control PID por lo que como censara que la temperatura y la presión son muy bajos del set point le indicara al actuador que se abra, este dejara pasar el gas natural para tener contacto con el chispero y hacer combustión.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Aquí se deberá esperar a que el proyecto siga su proceso de calentar el agua hasta llegar a una temperatura de 120 ℃ que aproximadamente demora 1 hora y 30 minutos, durante este tiempo el controlador ira realizando primero el control PI actuando antes que el control PID, intentando regular la válvula para que llegue a nuestro set point lo más rápido posible.

En este caso como la temperatura está muy baja a comparación del set point abrirá la válvula un 100% dejando pasar la mayor cantidad de gas natural.

Mientras hace el control en cascada y acercándose cada vez a nuestro set point el controlador le indicara al actuador que vaya cerrando la válvula lentamente hasta que llegue a nuestros set point requerido que en nuestro proceso es 120 ℃ para la temperatura y 1.1 Bar para la presión.

El controlador poco a poco mantendrá los valores de proceso en esos rangos requeridos haciendo cada vez el proceso más exacto y se podrá visualizar que la válvula estará en constante cambio de estado pero ya dejando pasar una mínima cantidad de gas natural.

Este proceso puede continuar hasta que el agua se evapore por completo, una vez que se acabe el agua se tendrá que detener el proceso, cerrar la válvula y por ultimo recargar la caldera con agua para iniciar otra vez el proceso.

El estándar internacional IEC 61131 es una colección completa de estándares referentes a controladores programables y sus periféricos asociados el cual nos centraremos en el lenguaje de programación. Nos centraremos profundamente en la SFC (Grafica de Secuencia de Funciones) el cual describe gráficamente el comportamiento secuencial de un programa de control. Se derivan de sus antecesores ¨Petri Nets¨ y del IEC848 GRAFCET el cual serán los estándares que nos guiaremos. El SFC estructura la organización interna de un programa y ayuda a descomponerlo en partes fácilmente manejables. Consiste de ¨Pasos¨ enlazados con ¨Bloques de Acción¨ y ¨Transiciones¨. Cada paso representa un estado del sistema.

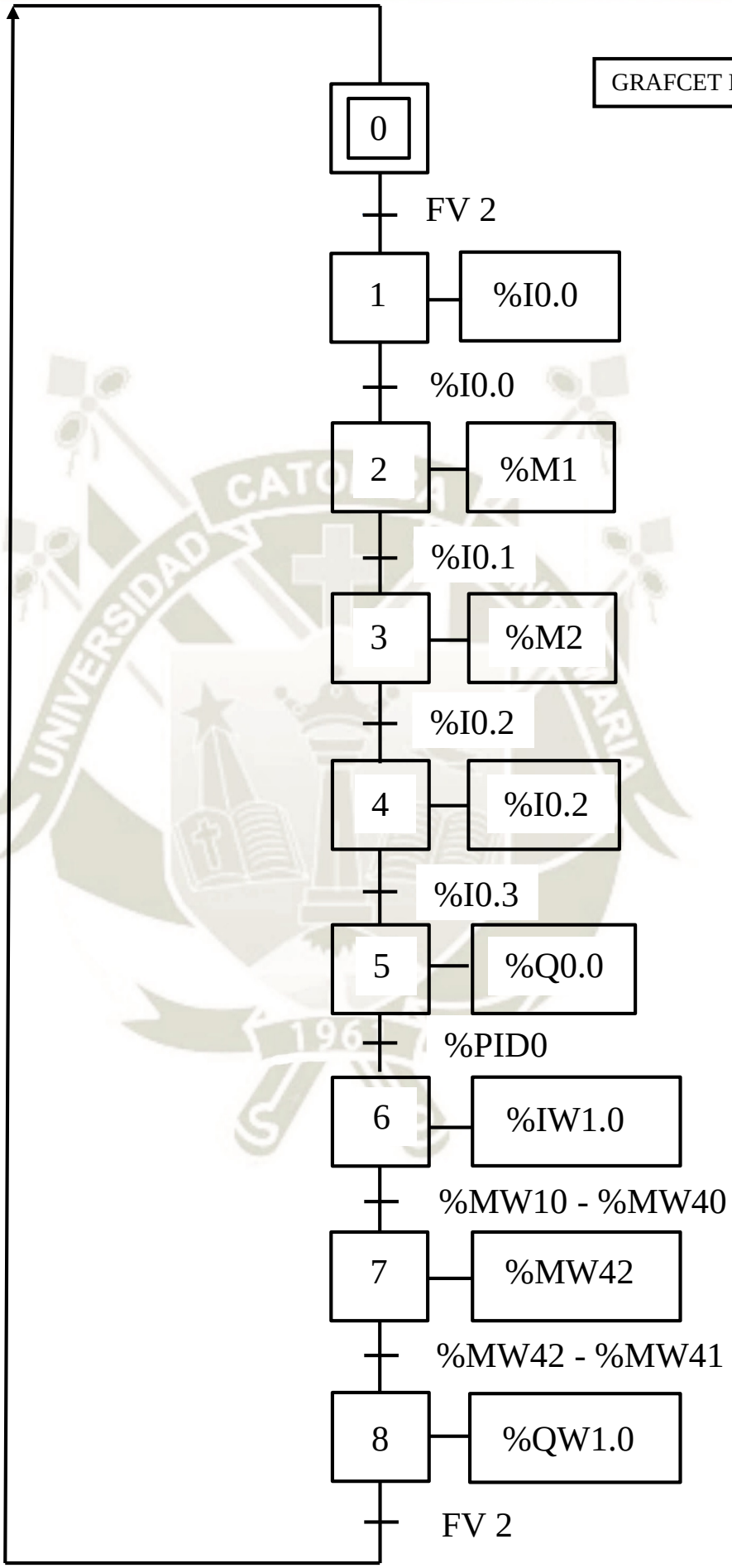
A continuación se muestra la secuencia de pasos en GRAFCET:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

GRAFCET DE NIVEL 3



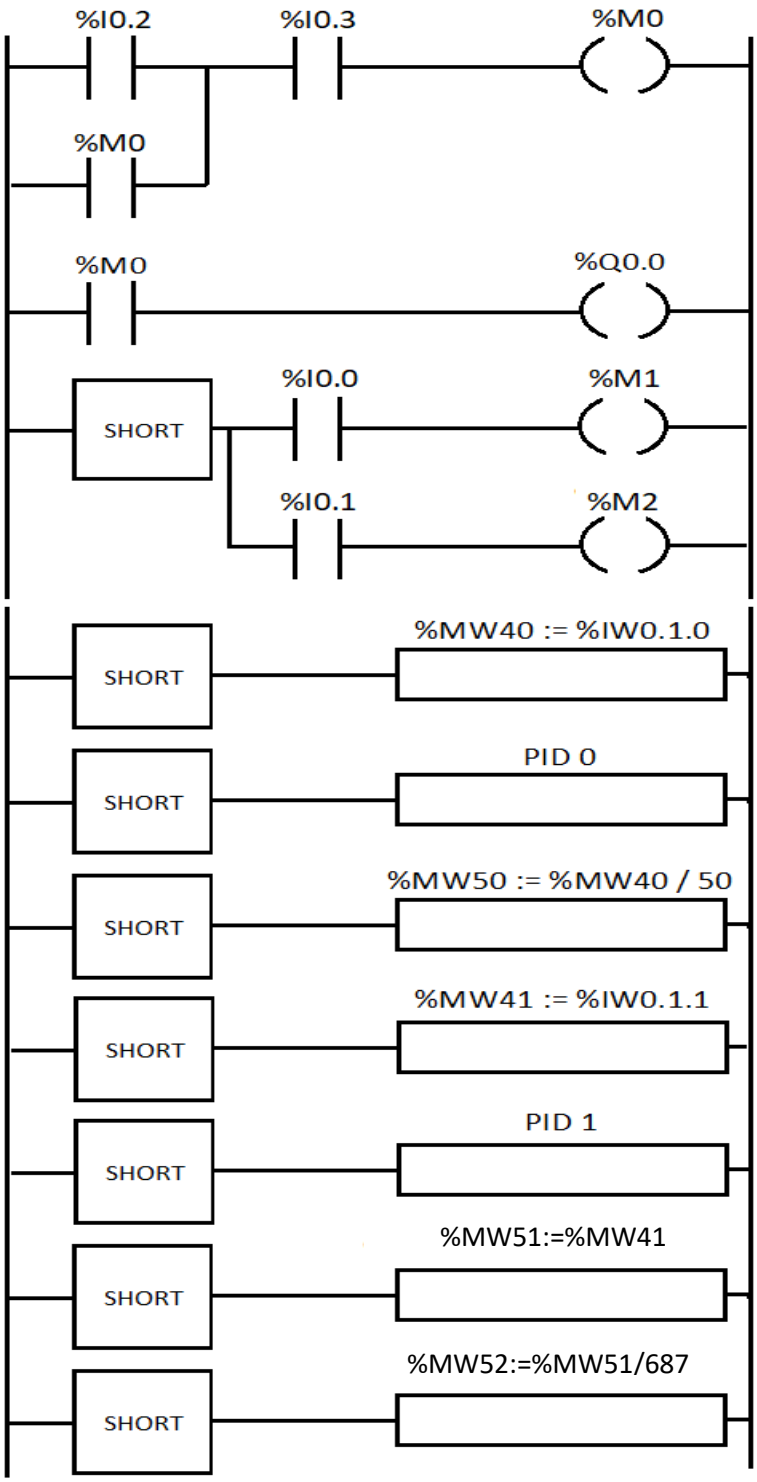
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Se muestra la secuencia de pasos en la programación de TWIDO:

Figura N° 125: Programa en lenguaje ladder



Fuente: Elaboración Propia

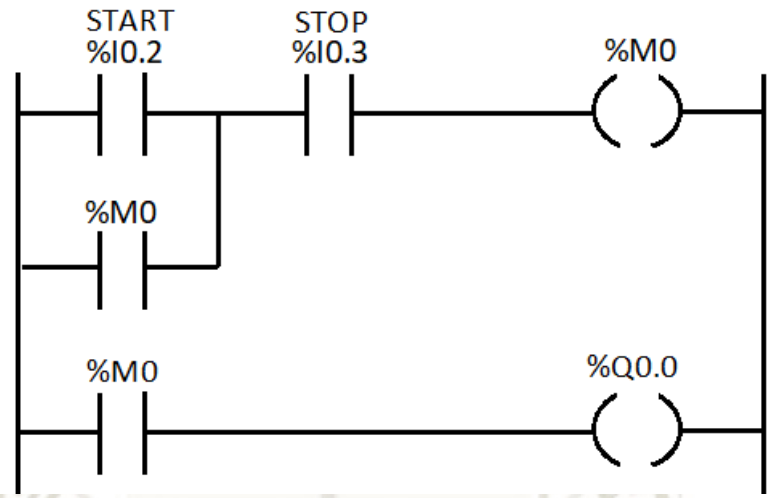
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

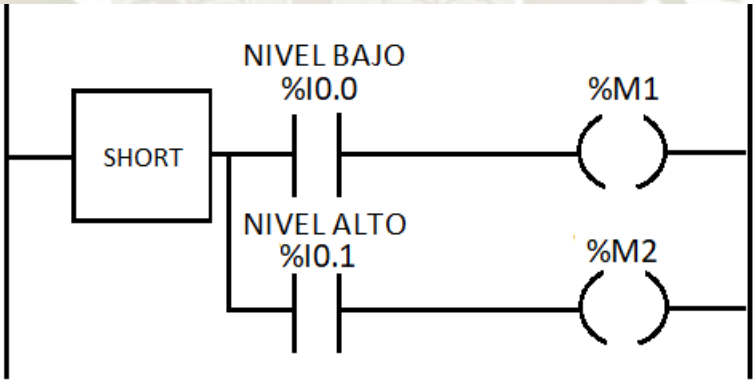
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.20. FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA EN LADDER DE LA CALDERA DE VAPOR

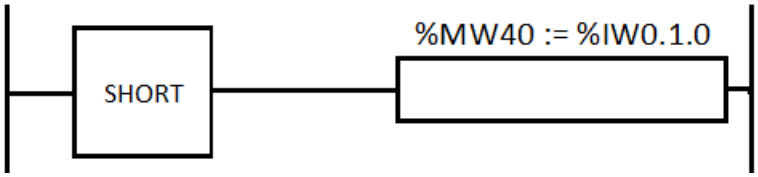
Proceso para encender o apagar el chispero que al hacer contacto con el gas produce el fuego que hace calentar el tanque.



Proceso el cual nos indica los momentos cuando el tanque se va llenando de agua y contando con dos tiempos, uno de nivel bajo y otro de nivel alto.



Se traspasa el valor medido del sensor de temperatura (%IW0.1.0) a la palabra %MW40

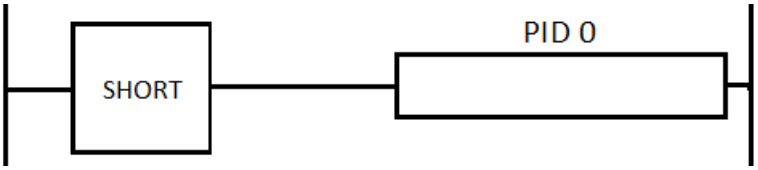


Se declara en el bloque la palabra PID para llamar a la función: PID 0 = Temperatura

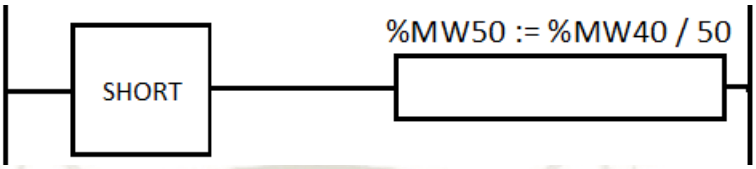
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

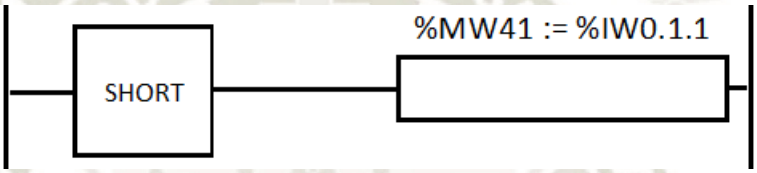
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA



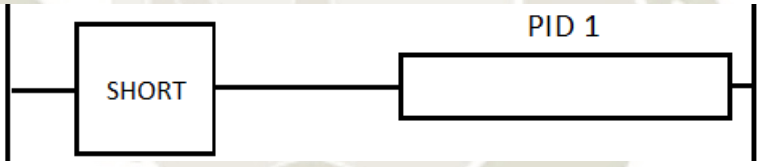
En este bloque se realiza la conversión de temperatura de lenguaje maquina a grados centígrados



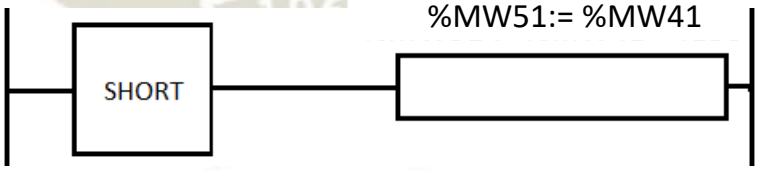
Se traspasa el valor medido del sensor de presión (%IW0.1.1) a la palabra %MW41



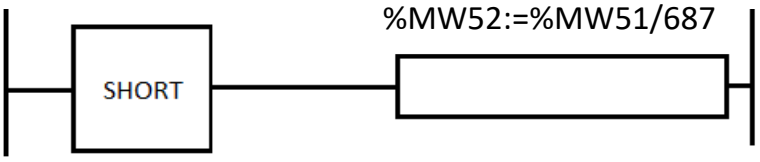
Se declara en el bloque la palabra PID para llamar a la función: PID 1 = Presión



Se traspasa el valor de la presión que contiene la palabra %MW41 a %MW51



Se realiza una operación matemática para poder convertir el valor de lenguaje máquina de presión a Bar



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.21. TABLA DE ASIGNACIÓN

CODIGO	DESCRIPCION
%I0.2	Enciende el chispero
%I0.3	Detiene el chispero
%M0	Mantiene el enclavamiento
%Q0.0	Indica chispero encendido o apagado
%I0.0	Sensor de nivel bajo
%M1	Contacto sensor de nivel bajo
%I0.1	Sensor de nivel alto
%M2	Contacto sensor de nivel alto
%IW1.0	Señal analógica de Temperatura
%MW40	Se guarda el valor de la temperatura en lenguaje maquina
PID 0	Función PID de temperatura
%MW16	Valor proporcional del lazo de temperatura
%MW17	Valor integral del lazo de temperatura
%MW18	Valor derivativo del lazo de temperatura
%MW50	Valor real de Temperatura en Grados Centígrados
%IW1.1	Señal analógica de Presión
%MW41	Se guarda el valor de la presión en lenguaje maquina
PID 1	Función PID de Presión
%MW11	Valor proporcional del lazo de presión
%MW12	Valor integral del lazo de presión
%MW13	Valor derivativo del lazo de presión
%MW51	Valor guardado de presión
%MW52	Valor real de presión en Bar
%MW10	Consigna del PID de lazo maestro de temperatura
%QW1.0	Salida real que regula el fuego y gas (actuador)
%MW42	Se guarda el valor de salida del lazo de temperatura y es consigna del lazo de presión

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPITULO lV.

RESULTADOS

4.1. PRUEBAS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA

El método que se usó para obtener los parámetros de sintonización fue sintonización por la ganancia crítica en lazo cerrado. Consiste en reducir al mínimo la acción derivativa y la acción integral del regulador PID. El ensayo en lazo cerrado consiste en aumentar poco a poco la ganancia proporcional hasta que el sistema oscile de forma mantenida, se hicieron pruebas elevando el Kp hasta 5000, 6000, 7000 y 8000. Y tomando muestras con zoom y alejadas para verificar en qué valor se mantenga oscilando constantemente.

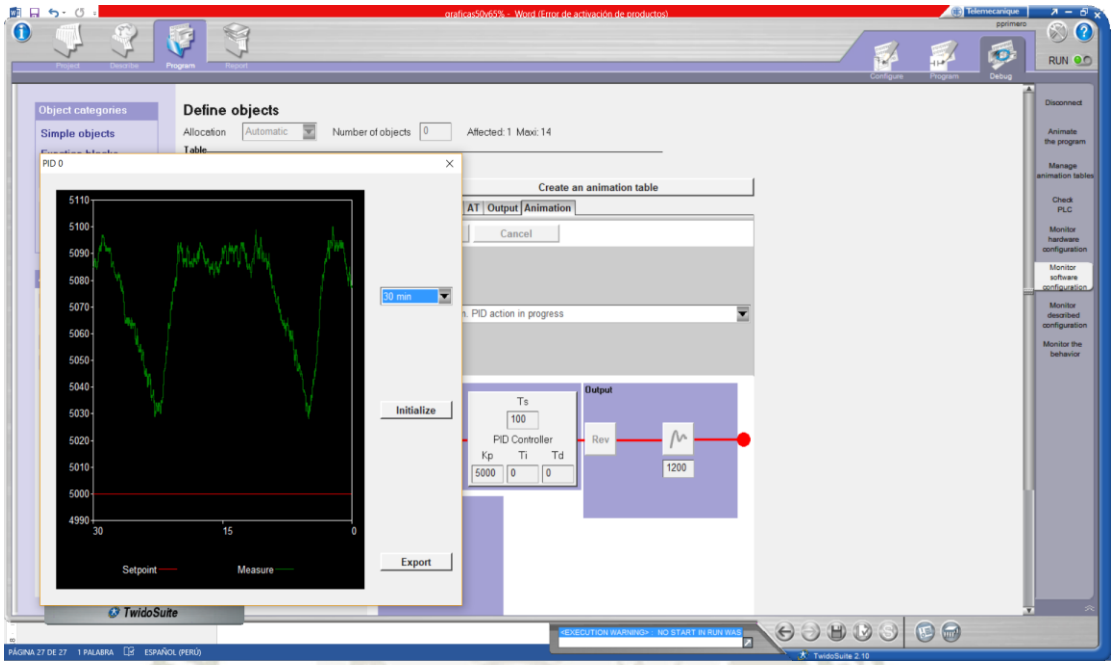
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

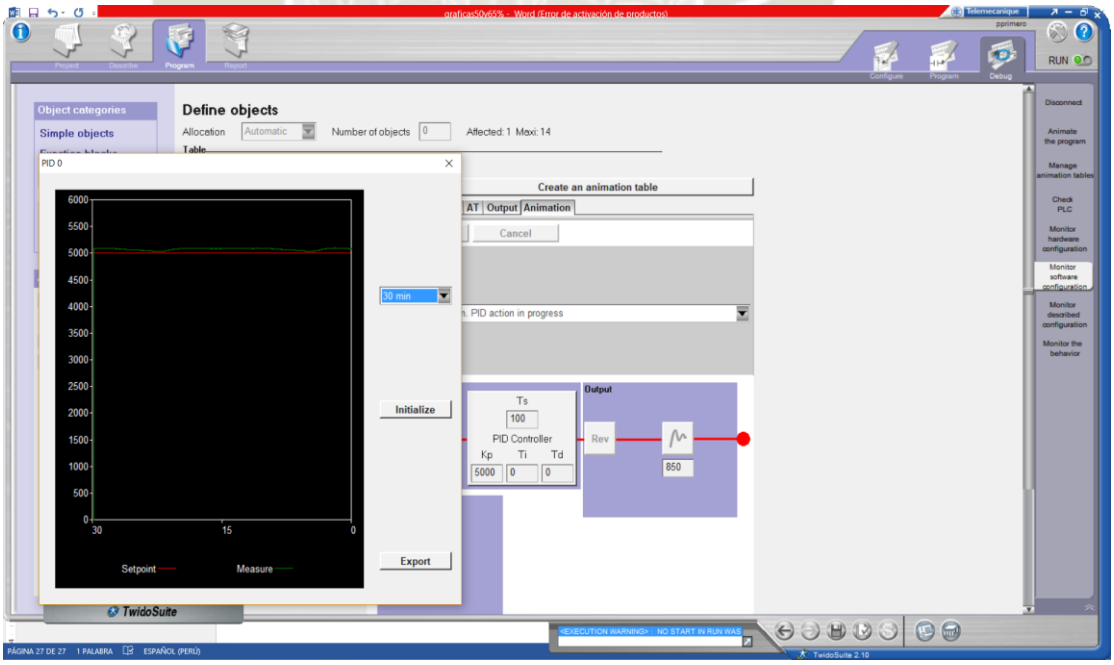
Kp = 5000

Figura N° 126: Prueba con Kp=5000 en 30 minutos con zoom



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 127: Prueba con Kp=5000 en 30 minutos sin zoom



Fuente: Elaboración Propia

Se verifica que en Kp = 5000 la salida no se mantiene oscilando constantemente.

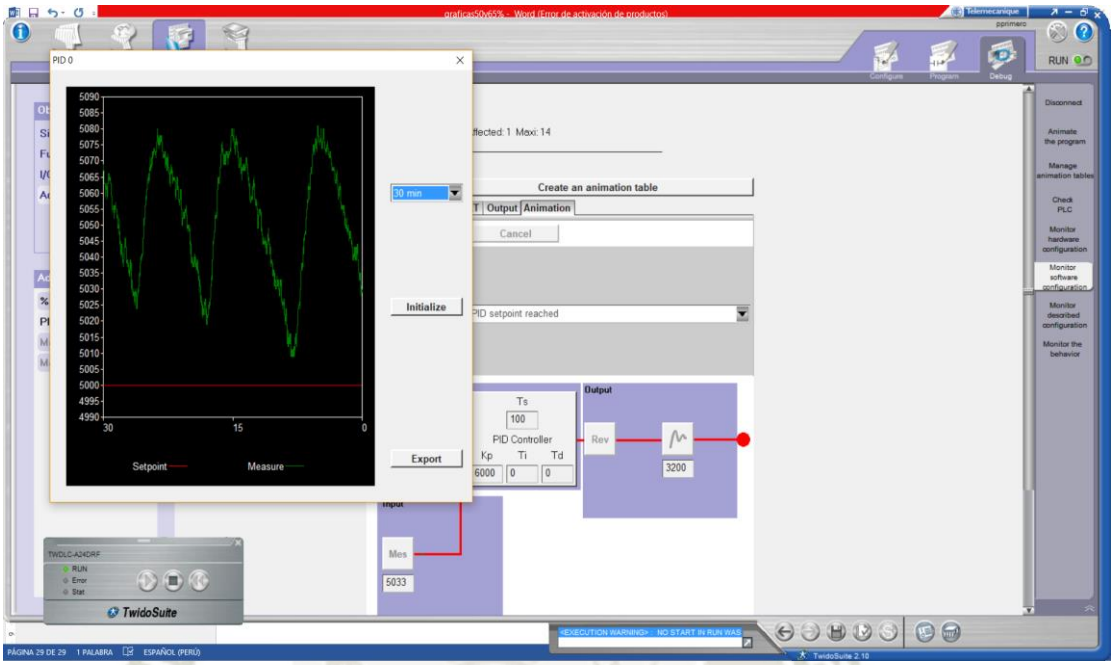
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

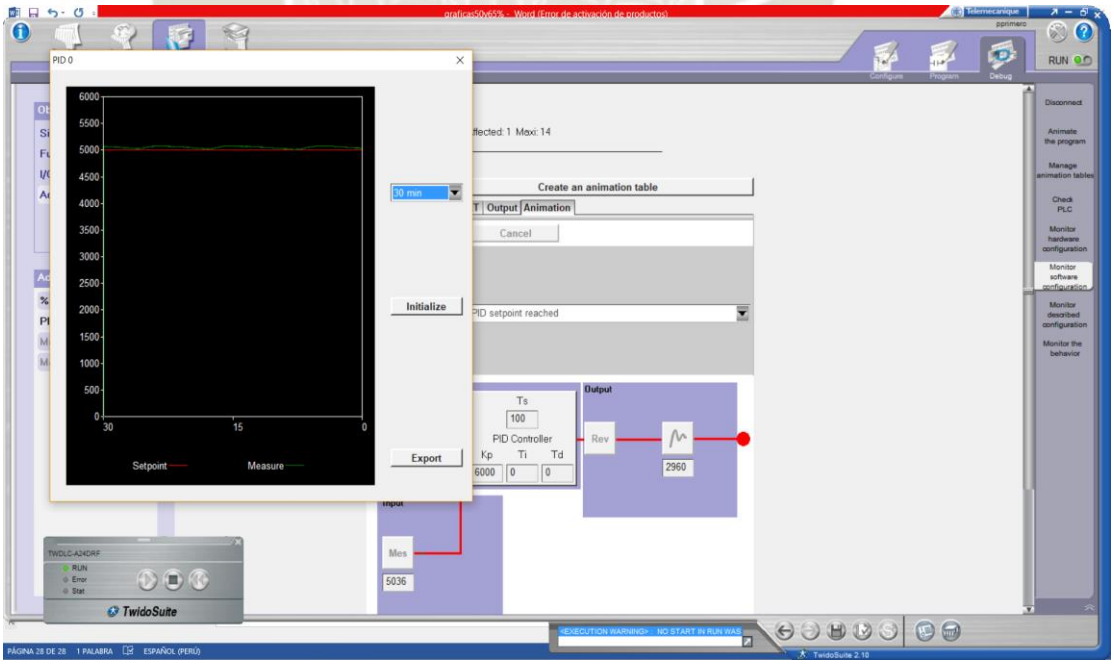
Kp = 6000

Figura N° 128: Prueba con Kp=6000 en 30 minutos con zoom



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 129: Prueba con Kp=6000 en 30 minutos sin zoom



Fuente: Elaboración Propia

Se verifica que en Kp = 6000 la salida no se mantiene oscilando constantemente.

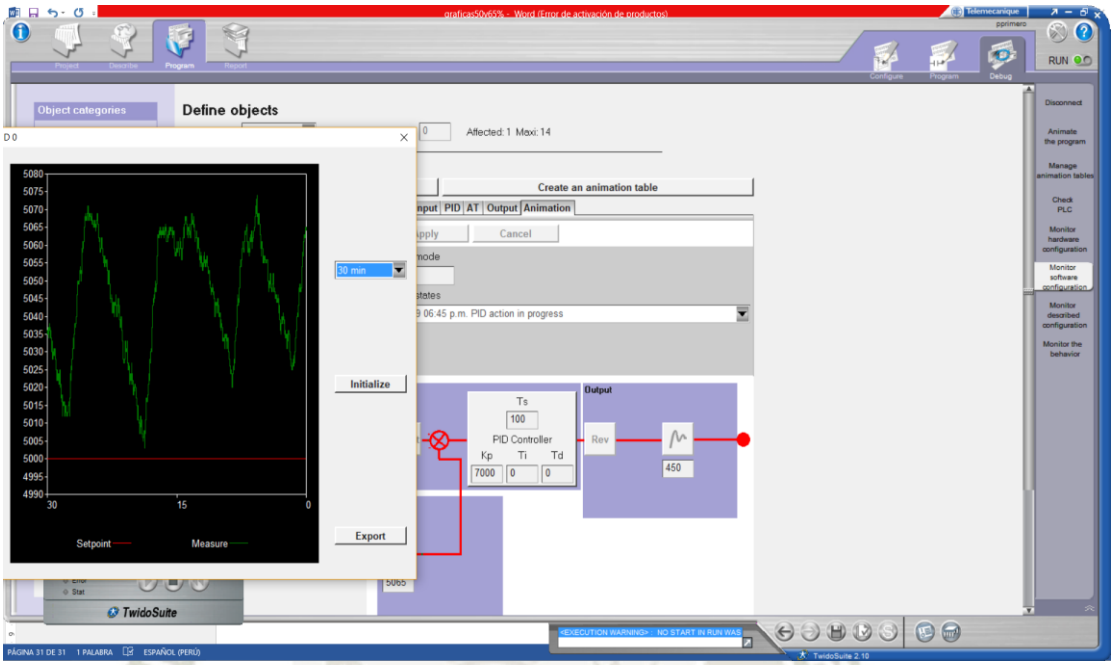
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

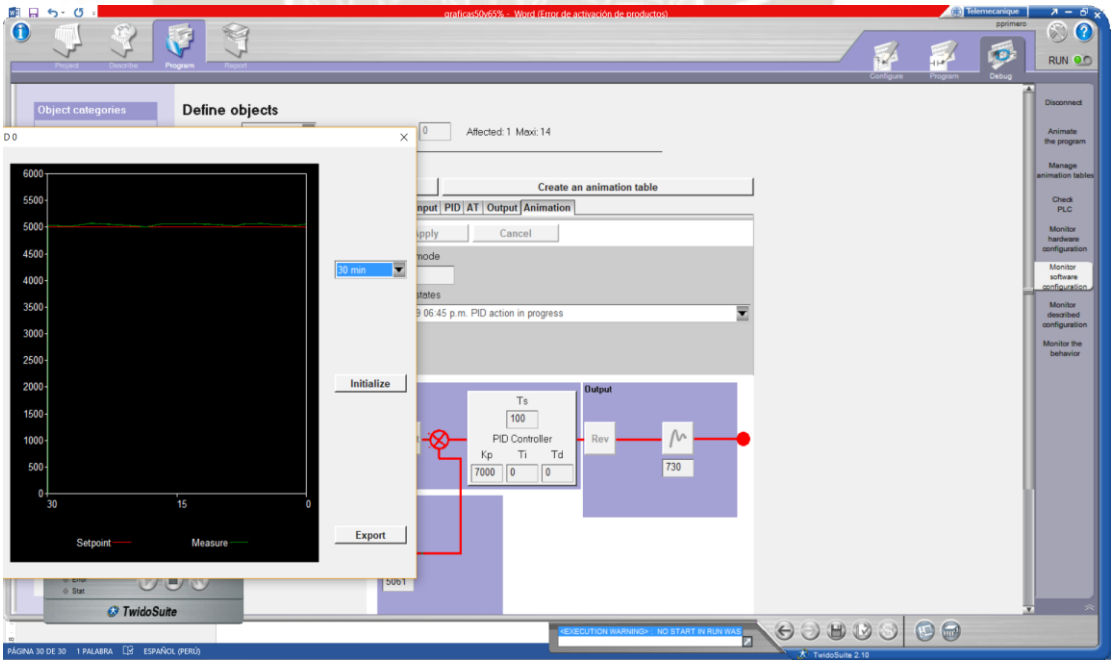
Kp = 7000

Figura N° 130: Prueba con Kp=7000 en 30 minutos con zoom



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 131: Prueba con Kp=7000 en 30 minutos sin zoom



Fuente: Elaboración Propia

Se verifica que en Kp = 7000 la salida no se mantiene oscilando constantemente.

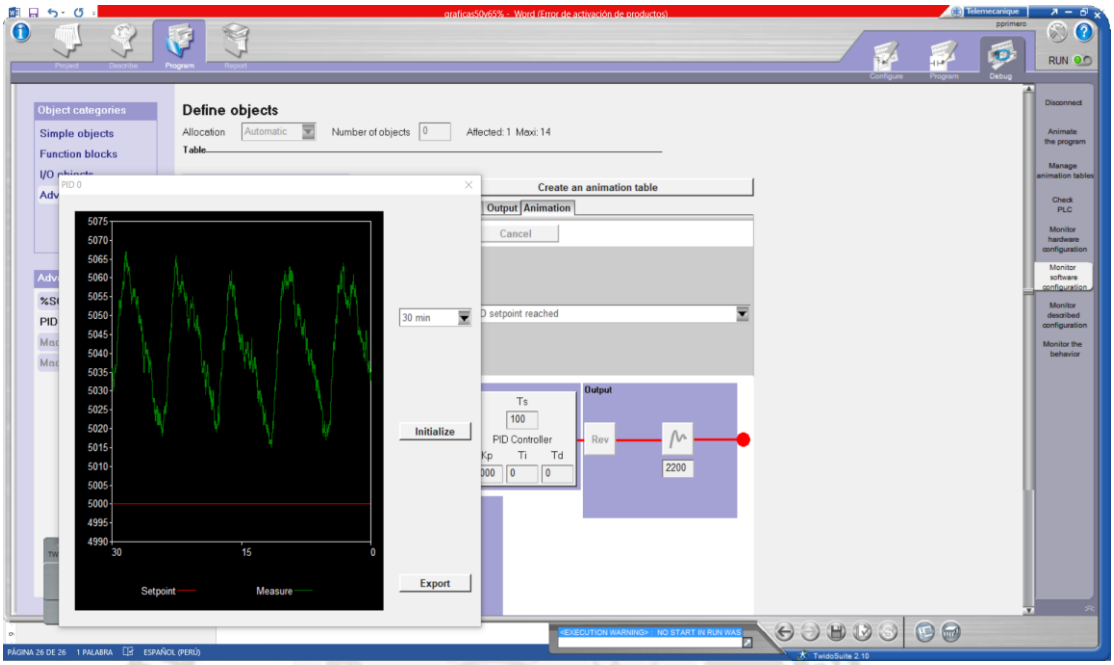
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

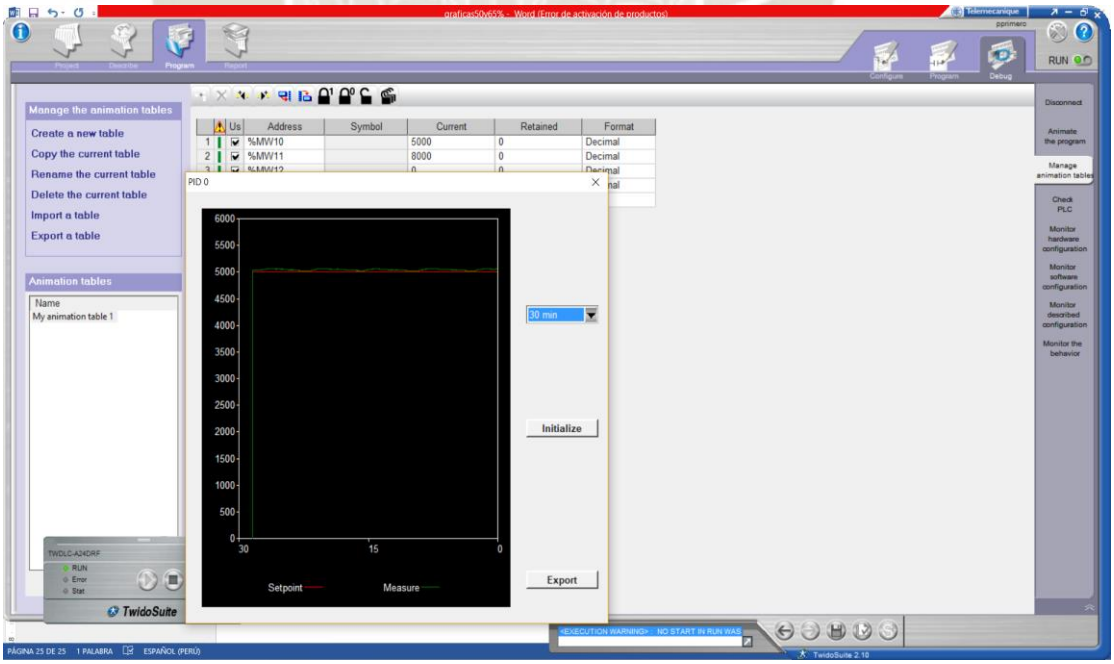
Kp = 8000

Figura N° 132: Prueba con Kp=8000 en 30 minutos con zoom



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 133: Prueba con Kp=8000 en 30 minutos sin zoom



Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Se verifica que en Kp = 8000 la salida si se mantiene oscilando constantemente. Entonces se empieza a realizar los cálculos correspondientes para hallar los parámetros de sintonización con el valor más idóneo que en este caso sería Kp = 8000.

4.2. COMPORTAMIENTO DE LOS PROCESOS INDEPENDIENTES

4.2.1. Sintonización del Lazo interno – Presión – Control PI

Una vez ya obtenido el valor de Kp, se procede a hallar los parámetros de sintonización para nuestro primer lazo interno

Calculo de los parámetros de sintonización Kp:

$$Kp = 0.45 * k_{cr} \tag{4.1}$$

$$Kp = 0.45 * 8000 \tag{4.2}$$

$$Kp = 3603 \tag{4.3}$$

Calculo de los parámetros de sintonización Ti:

$$El\ periodo\ Pu = 2.7\ minutos \tag{4.4}$$

Según las fórmulas de Ziegler – Nichols

$$Ti = P_{cr} * 0.83 \tag{4.5}$$

Entonces reemplazamos:

$$Ti = 2.7 * 0.83 \tag{4.6}$$

$$Ti = 2.25\ minutos \tag{4.7}$$

Los valores encontrados los convertimos de minutos a segundos que es lo que nos pide el programa Twido

$$Ti = 2.25 * 60 = 135\ segundos \tag{4.8}$$

Para introducir los valores al Twido requiere que el Ti sea multiplicado por 10

$$Ti = 135 * 10 = 1350 \tag{4.9}$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

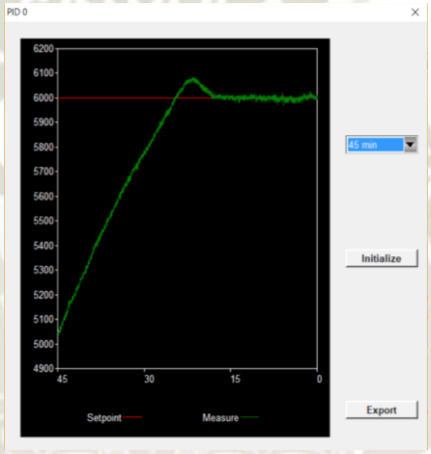
Una vez encontrados los parámetros de sintonización procedimos a ingresar los datos en el programa Twido y verificar su comportamiento

Figura N° 134: Ingreso de valores de sintonizacion PI a programa TWIDO

5	☑	%MW16		3603	0	Decimal
6	☑	%MW17		1350	0	Decimal
7	☑	%MW18		0	0	Decimal
8						

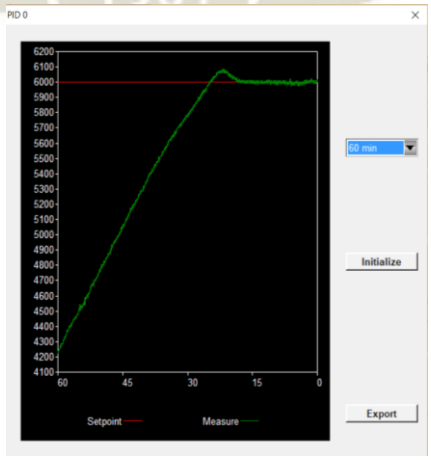
Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 135: Comportamiento de la salida PI en TWIDO en 45 min



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 136: Comportamiento de la salida PI en TWIDO en 60 min



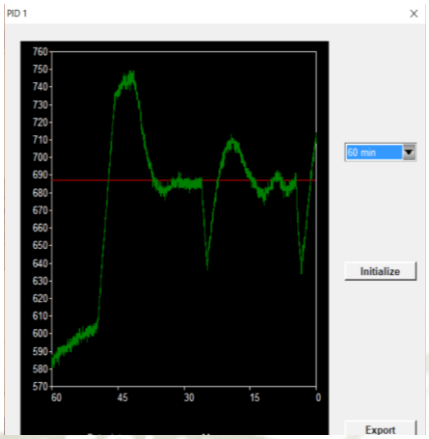
Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 137: Comportamiento de salida PI en TWIDO de 60 min con zoom



Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el proceso y el primer lazo interno tienden a estabilizarse en el tiempo por lo cual nuestros parámetros de sintonización son los correctos.

Estos parámetros se van a mantener permanentes para nuestro control en cascada.

4.2.2. Sintonización del Lazo externo – Temperatura – Control PID

Una vez ya obtenido el valor de Kp, y haber sintonizado el lazo interno se procede a hallar los parámetros de sintonización para nuestro lazo externo.

Calculo de los parámetros de sintonización Kp:

$$Kp = 0.6 * K_{cr} \quad (4.10)$$

$$Kp = 0.6 * 8000 \quad (4.11)$$

$$Kp = 5000 \quad (4.12)$$

Calculo de los parámetros de sintonización Ti y Td:

$$El\ periodo\ Pu = 2.7\ minutos \quad (4.13)$$

Según las fórmulas de Ziegler – Nichols

$$Ti = 0.5 * P_{cr} \quad (4.14)$$

$$Td = 0.125 * P_{cr} \quad (4.15)$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Entonces reemplazamos:

$$Ti = 0.5 * 2.7 = 1.35\ minutos \quad (4.16)$$

$$Td = 0.125 * 2.7 = 0.33\ minutos \quad (4.17)$$

Los valores encontrados los convertimos de minutos a segundos que es lo que nos pide el programa Twido

$$Ti = 1.35 * 60 = 81\ segundos \quad (4.18)$$

$$Td = 0.33 * 60 = 19.8\ segundos \quad (4.19)$$

Para introducir los valores al Twido requiere que el Ti y Td sean multiplicados por 10

$$Ti = 81 * 10 = 810 \quad (4.20)$$

$$Td = 19.8 * 10 = 198 \quad (4.21)$$

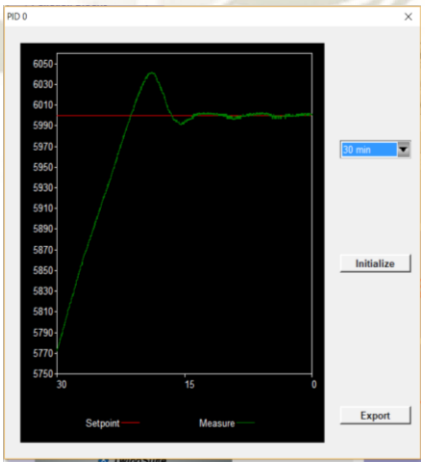
Una vez encontrados los parámetros de sintonización procedimos a ingresar los datos en el programa Twido y verificar su comportamiento:

Figura N° 138: Ingreso de valores de sintonizacion PID a programa TWIDO

5	☑	%MW16		5000	0	Decimal
6	☑	%MW17		810	0	Decimal
7	☑	%MW18		198	0	Decimal

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 139: Comportamiento de salida PID en TWIDO en 30 min

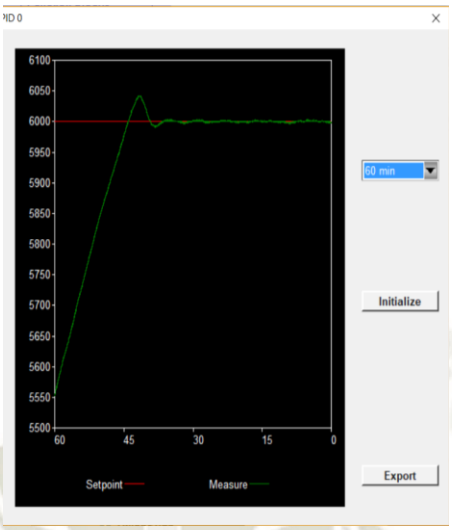


Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

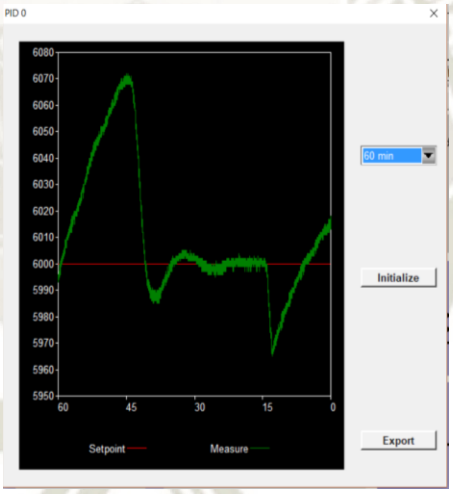
REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 140: Comportamiento de salida PID en TWIDO en 60 min



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 141: Comportamiento de salida PID en TWIDO en 60 min



Fuente: Elaboración Propia

4.2.3. Sintonización del Proceso de control completo en cascada PID – PI

Se procedió a ingresar los valores de sintonización para el lazo interno (presión) según los hallados en el punto 4.2.1. Utilizando el método de Ziegler – Nichols.

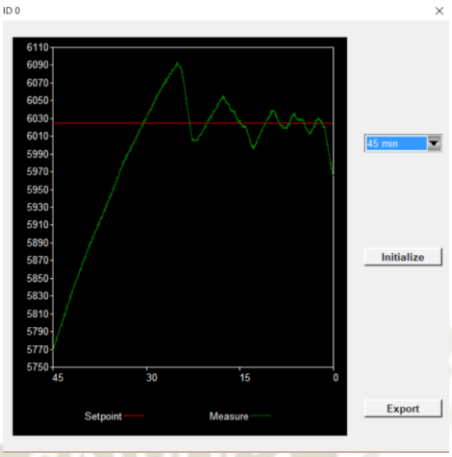
Luego se utilizó el programa de MatLab(R) como se explicó en el punto 3.10 y 3.11 con el programa simulink para obtener los parámetros de sintonización de nuestro lazo externo y así completar nuestro control en cascada. Se simularon los dos lazos:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

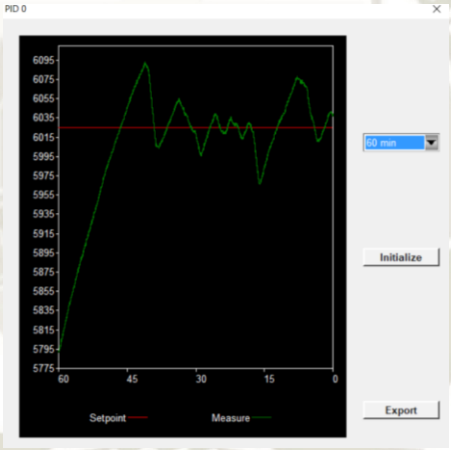
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 142: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de temperatura en 45 min



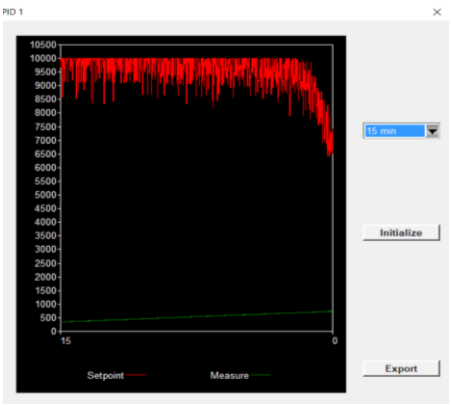
Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 143: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de temperatura en 60 min



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 144: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de presión



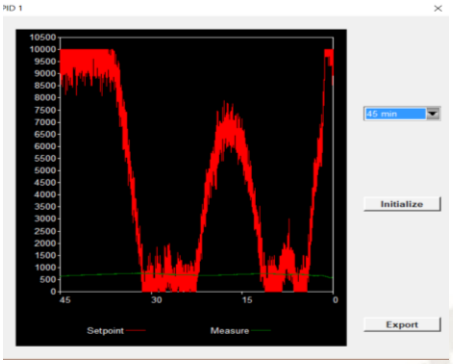
Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

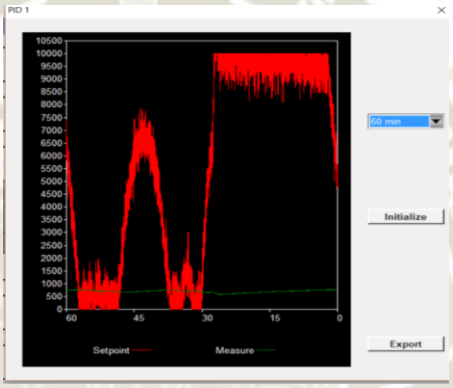
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 145: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de presión en 45 min



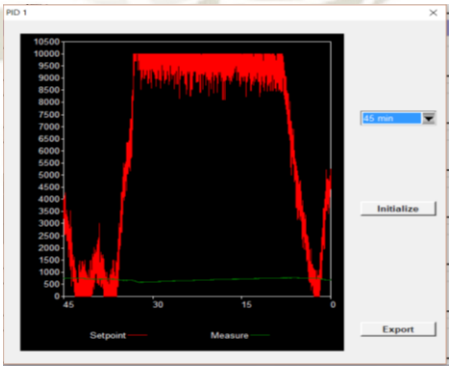
Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 146: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de presión en 60 min



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 147: Comportamiento de salida en cascada PID – PI de presión



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se observa que el proceso realiza el control en cascada estabilizándose en el tiempo controlando como primera consigna la temperatura y segundo la presión manteniéndose en este caso nuestra consigna que era 120 grados. Por último, se obtuvieron los resultados buscados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

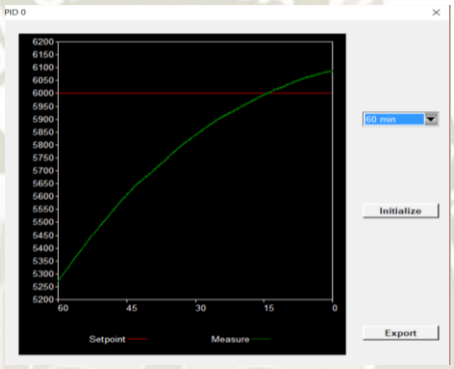
4.3. PARAMETROS HALLADOS VS PARAMETROS MANIPULADOS

Una vez encontrados los parámetros de sintonización recomendados por el MatLab(R) y los parámetros manipulados, se realizó la comparación para ver las diferencias de cada uno.

Lazo interno: KP = 3603 Ki = 1350

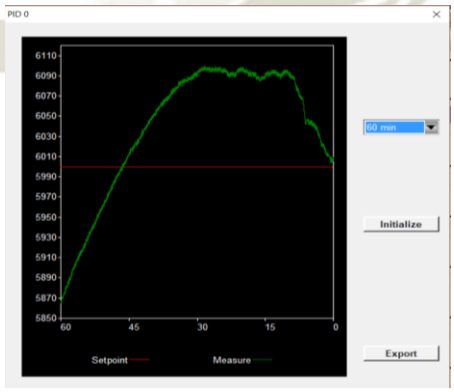
Lazo externo: KP = 354 Ki = 680 Kd = 1500

Figura N° 148: Tiempo de demora en llegar al Set Point de temperatura



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 149: Respuesta proceso de temperatura con parámatros recomendados 1



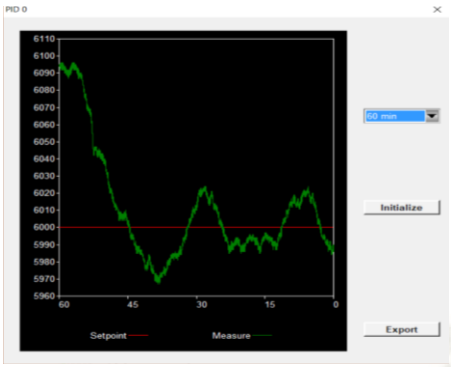
Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

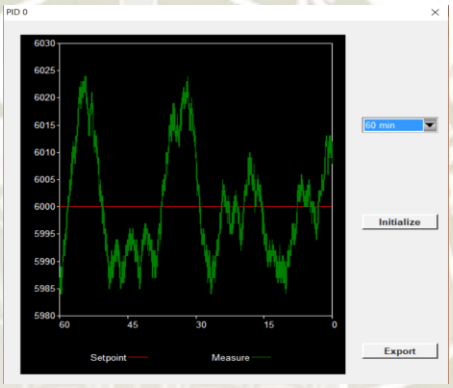
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura N° 150: Respuesta proceso de temperatura con parámatros recomendados 2



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 151: Respuesta proceso de temperatura con parámatros recomendados 3

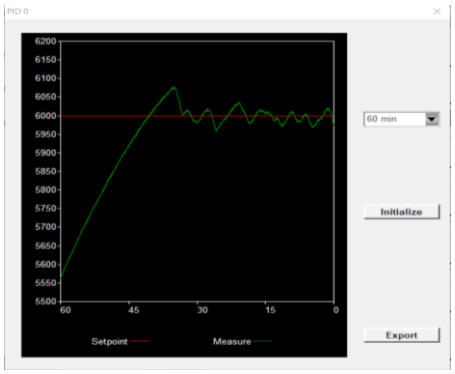


Fuente: Elaboración Propia

Lazo interno: KP = 3603 Ki = 1350

Lazo externo: KP = 5000 Ki = 810 Kd = 198

Figura N° 152: Respuesta proceso de temperatura con parámatros manipulados 1



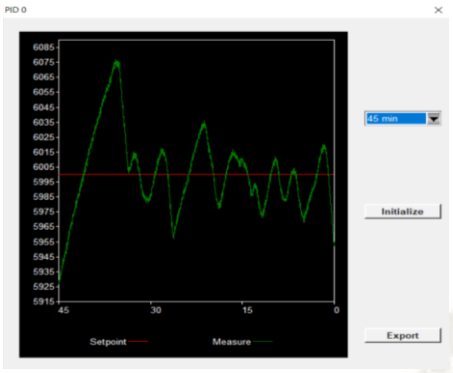
Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

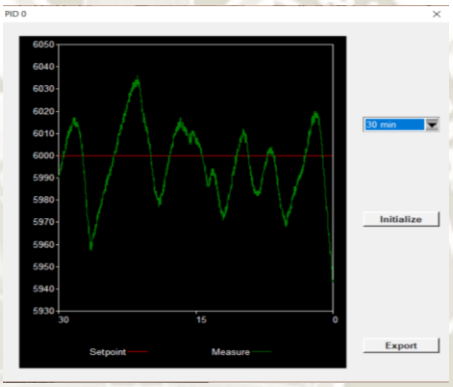
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura N° 153: Respuesta proceso de temperatura con parámatros manipulados 2



Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 154: Respuesta proceso de temperatura con parámatros manipulados 2



Fuente: Elaboración Propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CONCLUSIONES

1. Se llegó a concluir según la teoría de control en cascada que el lazo secundario debe de contener las perturbaciones más serias y su reacción debe de ser más rápida que el lazo maestro, se concluyó que la presión es la variable más seria por la constante salida de vapor que se genera, se probó que el lazo esclavo de presión figura N°137 es más rápido que el lazo maestro de temperatura figura N°141 realizando la prueba por lazos separados e independientes. Como se puede comparar en las figuras se puede observar que en el lapso de 1 hora el control de maestro PID solo realiza un periodo mientras que en el lazo esclavo realiza casi el triple más rápido de periodo por lo cual se puede concluir que el lazo esclavo es más rápido que el lazo maestro el cual corregirá las perturbaciones de presión más rápido que el de temperatura porque las perturbaciones más constantes son de presión.

2. Se pudo concluir y demostrar por medio de graficas cómo funciona el control en cascada para el proceso de presión y temperatura e identificando como la salida del lazo maestro es el punto de consigna para el lazo esclavo como también el control de presión es más rápido que el control de temperatura. Se puede apreciar en la figura N°142 y figura N°143 el proceso de medición de la temperatura en el cual esta variable (línea color verde) se intenta estabilizar en el setpoint asignado (línea color roja) siendo un proceso normalmente lento por ser un control PID y porque es un proceso de temperatura. Luego se puede observar en la figura N° 144 que el setpoint (linea color rojo) se mantiene en el valor de 1000 (el rango lenguaje maquina designado para el proceso es de 0 – 1000) el cual es el mayor valor porque aun no llega el proceso de temperatura al setpoint, una vez alcanzado el setpoint de temperatura figura N°145 se ve como la linea roja comienza a bajar esto quiere decir que el error entre la salida del lazo maestro (setpoint de lazo esclavo) y el valor medido de presion es minima por lo cual el setpoint se alineara con el valor medido (linea verde) figura N°146, una vez que la temperatura baje menos del setpoint el error del lazo esclavo volvera a subir por lo que la linea roja se elevara figura N° 147 y asi sucesivamente realizara el control mas rapido el de presion que el de temperatura por lo cual se concluye el proceso de control en cascada efectivo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3. Se concluye que según el autotuning del MatLab(R) nos recomienda unos parámetros idóneos para el proceso se hizo la prueba y se ratificó que son los ideales realizando una óptima estabilización minimizando el error entre el setpoint y la variable medida. Se decidió manipular los parámetros de sintonización que nos recomendó el autotuning por el hecho que como es un módulo de entrenamiento y los alumnos de la carrera profesional de ingeniería electrónica cuentan con 2 horas en sus cursos de prácticas, la sintonización del autotuning si bien es muy estable demora en hacerlo en 4 horas aproximadamente. Se encontró unos parámetros que realizan la estabilización si bien es cierto con un poco más de error a comparación del autotuning, no es tan perjudicial para el proceso porque igual se mantiene en 120°C y 1.1 Bar sin salirse de los valores deseados por lo cual con estos parámetros se estabiliza en 1:40 horas. Como se puede observar en la figura N°148 y figura N°149 se ve que el proceso es muy lento y baja poco a poco la temperatura y en la figura N°150 y figura N°151 luego de un largo tiempo se puede ver que el proceso se estabiliza muy cerca del setpoint, recordemos que cada 1°C es 50 en lenguaje máquina. En este caso el setpoint es 6000 por lo cual se mantiene dentro de 6025 y 5975 esto quiere decir que mantiene 120°C. Comparando con la figura N°152, figura N°153 y figura N°154 que son con los parámetros manipulados se observa que el proceso se controla más rápido que con la configuración anterior teniendo un poco más de error (1/2 °C más que en la configuración anterior) igual se puede observar que se mantiene en el setpoint deseado. Se debe de aclarar que se usó estos parámetros de sintonización para que los alumnos de la carrera profesional de ingeniería electrónica tengan la oportunidad de manipular y controlar las variables del proceso.

4. Se logró la implementación del módulo de entrenamiento de un sistema de control en cascada aplicado a una caldera industrial con pre-calentamiento usando energía solar, la implementación cuenta con equipos industriales utilizados en sistemas de control como podemos verificar según las hojas de datos adjunta en los anexos.

5. Se logró controlar las variables de presión y temperatura, las cuales son imprescindibles para un óptimo funcionamiento de las calderas

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

6. Se implementó el módulo de entrenamiento de una caldera utilizando un control PI enlazando el segundo bloque con un sistema de control PID en cascada para el control de presión y temperatura para la caldera.

7. Se logró la implementación del economizador con energía solar para mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor, aprovechando las condiciones climatológicas de la región acoplamos el calentamiento de agua desde la toma de alimentación haciendo pasar esta por paneles que mantienen el calor de la energía solar

8. Los instrumentos de control y seguridad no son eternos ni perfectos, cabe la posibilidad que presente una falla, por ello se recomienda darle mantenimiento mínimo cada 6 meses a los instrumentos.

9. Al aumentar al máximo la eficiencia total de la caldera, hay un mayor aprovechamiento del gasto en gas y costos mínimos de operación. Al ingresar agua pre-calentada, reducimos un gasto económico y también pérdida de gas del 20%, el agua pre-calentada llega a la caldera con 45°C. Cuando ingresamos agua sin pre-calentar el proceso demora 100% de tiempo en llegar al set point pero al ingresar agua pre-calentada el proceso reduce un 37.5% el tiempo en llegar al set point, concluimos que con agua pre-calentada reducimos tiempo de demora en llegar al objetivo, gasto económico y perdida de combustible.

10. Concluimos que un proceso automatizado y controlado por un PLC reduce costos de mano de obra, como también la calidad y exactitud del producto que proporcionan es mucho mejor comparado a que si una persona manipulara este proceso manualmente.

11. Se pudo concluir que no todos los métodos de sintonización funcionan para todos los procesos, hay procesos que solo se pueden sintonizar con unos métodos específicos, dependiendo de cómo quieran controlarlo y bajo que parámetros quieran que trabaje el proceso.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

RECOMENDACIONES

1. Para la implementación de este proyecto de tesis se propone desarrollar a posterior la programación y configuración de un sistema SCADA del proceso, el sistema SCADA compatible con el TWIDO es el hardware HMI bajo Vijeo Designer el cual nos permitirá visualizar, controlar, supervisar el proceso y las variables de proceso, también se recomienda al implementar el sistema SCADA crear especialmente la visualización de alarmas para tener un mayor control de las variables con la finalidad que si se produce un error darle solución inmediatamente gracias al aviso de las alarmas.

2. Se recomienda implementar para mayor seguridad un botón de paro de emergencia para tener un control efectivo al momento que se encuentre un error o mal funcionamiento del proceso. Con este botón se podrá dar fin al proceso en funcionamiento y cerrar la electroválvula que permite el paso de combustible.

3. Para un mayor control de sistemas de generación de vapor se requiere de mayor cantidad de válvulas y sensores como por ejemplo para hacer que el proyecto trabaje de forma continua y automática se necesitaría la implementación de otra válvula proporcional para regular el flujo de agua de manera continua.

4. En el proceso de construcción se recomienda cumplir con los estándares y así hacer mejoras en el proceso.

5. El uso de la energía solar como parte del funcionamiento de las calderas podría ser una opción a nivel industrial que ayude a reducir los costos de producción debido a un menor consumo energético y que puede ser aprovechado en ciudades que en la mayoría del año cuentan con alta radiación solar, además de contribuir a que haya un menor impacto ambiental.

6. Esta tesis podría ser el inicio para el uso de calderas a base de energía solar y que puedan ser utilizadas en otros diversos campos industriales.

7. Se podría implementar una bomba en la entrada de agua para cuando el proceso tenga bajo de agua esta bomba inyecte el mismo aplicando una presión mayor a la que se encuentra dentro de la caldera.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

8. Para una mayor exactitud y control de ingreso de gas que pasa por el actuador se podría implementar un flujómetro el cual determine la cantidad inyectada a la caldera.

9. Para poder manipular y operar la caldera, el estudiante debe de estar previamente capacitado sobre su funcionamiento y reacción en caso de que presente alguna anomalía. Para eso antes de manipular la caldera leer el manual de uso al final de esta tesis.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. Miranda, «Calderas: clasificación, usos y mecanismos de transferencia de calor,» 2018. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/326904671. [Último acceso: 17 02 2019].

[2] D. Waldir, «diseño de la automatizacion del proceso de generacion de vapor de la caldera APIN en la empresa agroindustrial casa grande S.A.A.,» 2016.

[3] S. e. Edgar, «Diseño y construccion del sistema de control para un intercambiador de calor tubular,» Mexico , Mex. D.F., 2013.

[4] B. Augusto, «control y automatizacion de los sistemas de caldero y proceso de cocimiento para planta cervecera usando controladores logicos programables,» lima, universidad nacional de ingenieria, 1995.

[5] R. F. Proaño Chevara y C. P. Lugmaña Raimundo, «Diseño e implementación de un sistema de automatización y control de un caldero de vapor saturado para construcciones mecánicas S.A.,» Ecuador, 2012.

[6] J. R. Rodriguez Vásquez, Artist, *Desarrollo de un sistema de Control Avanzado de la Presion del Vapor en una Caldera de tubos de Fuego.* [Art]. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2006.

[7] G. S. C. Javier Armijo C., «Ahorro de energía en una caldera utilizando economizadores,» *Rev. Per. Quím. Ing. Quím.,* vol. 11, nº 1, pp. 42-46, 2008.

[8] A. Avila Reyna y J. M. Perez Brandt, «Modelado y Simulacion de una caldera para la implementacion de lazos de control con PLC,» Mexico, 2010.

[9] D. Chuk, «Los Sistemas de Primer Orden y los Controladores PID,» 2012.

[10] J. L. Ortega, «Controlador PID,» 2017.

[11] H. Ibérica, 17 02 2019. [En línea]. Available: https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/.

[12] J. Giménez, «Regulacion,» *El instalador,* pp. 4-5, 2016.

[13] M. T. Salcedo, «Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía solar,» 2013.

[14] A. C. Lapeña, «Estruplan,» 19 Mayo 2011. [En línea]. Available: https://estrucplan.com.ar/producciones/contenido-tecnico/p-seguridad-industrial/valvulas-de-seguridad/.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

[15] D. Industry, «El Salon de la Industria,» [En línea]. Available: http://www.directindustry.es/prod/henry-technologies/product-35792 484428.html.

[16] M. T. Salcedo, «Sistema de Calentamiento de Agua con Energía Solar: una alternativa para el Gerenciamiento por el lado de la demanda,» Tacna, 2013.

[17] J. M.-J. g.-A. giudici, «Compendio de Calculo estructural ll,» 2015.

[18] F. R. Lezama, «Instituto Politecnico Nacional Esime,» [En línea].

[19] I. J. González, «2valvulas-130731143006-phpapp02.pdf,» 31 Julio 2013. [En línea].

[20] L. d. Vargas, «Tratamiento de agua para,» Lima, 2004.

[21] Mavainsa, «Control de Procesos,» Bogota, 2011.

[22] M. A. C. Ramires, «Automatizacion y Control de Planta de Tratamiento de Agua Rio Cauca,» Sartenejas, 2011.

[23] U. T. N. F. R. Avellaneda, «http://www.fra.utn.edu.ar/download/carreras/ingenierias/electrica/materias/planestudio/quintonivel/electronicaII/apuntes/variadores_de_frecuencia.pdf,» 18 04 2017. [En línea]. Available: http://www.fra.utn.edu.ar. [Último acceso: 18 04 20017].

[24] W. L. M. C. &. S. Julian, «Operaciones Basicas de Ingenieria Qímica,» 1981. [En línea]. Available: http://www.http://procesosbio.wikispaces.com/Agitador.

[25] D. Chuck, «Los sistemas de primer orden y controladores PID,» 2012.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

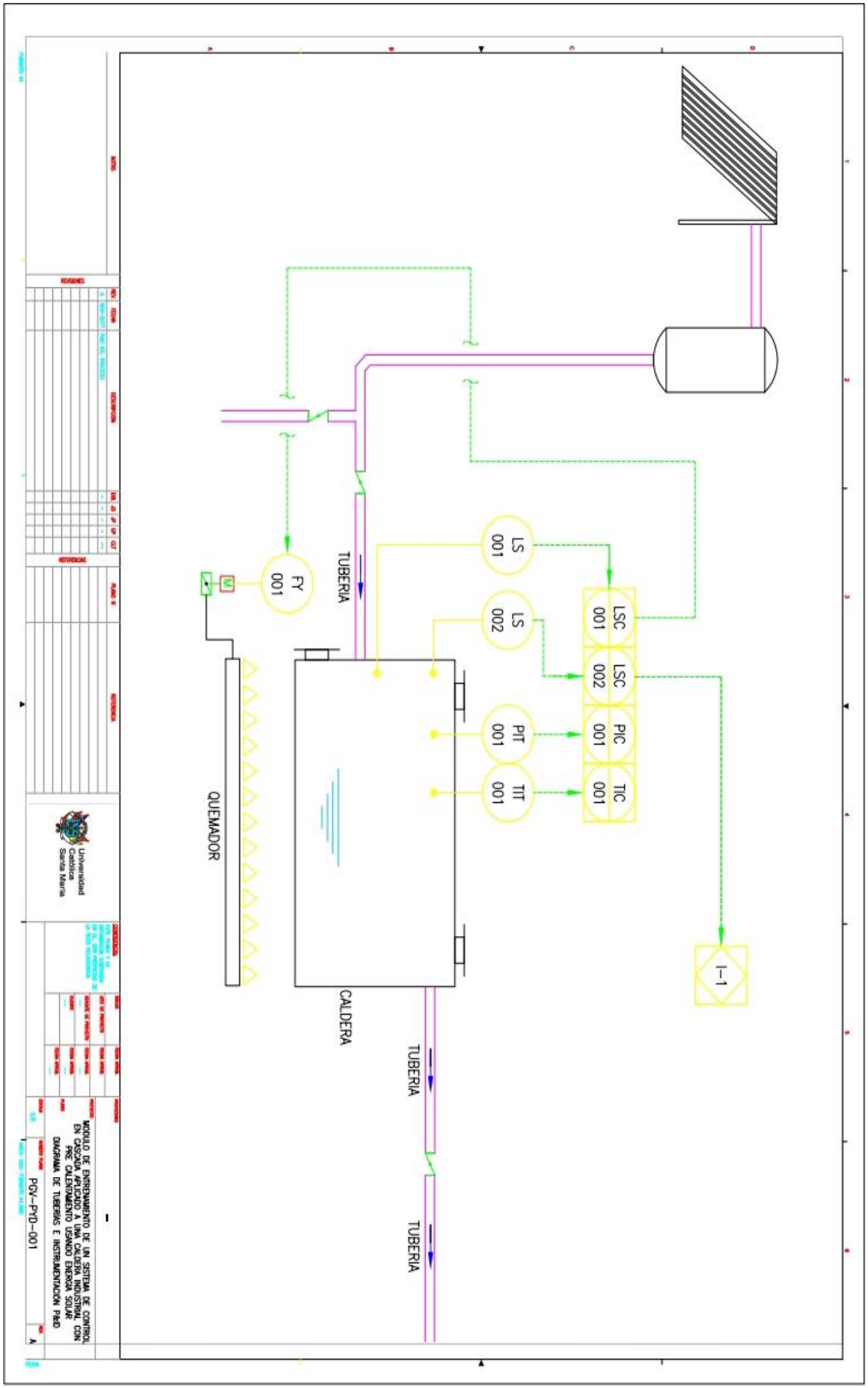
ANEXOS

ANEXO 1. PLANO P&D

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

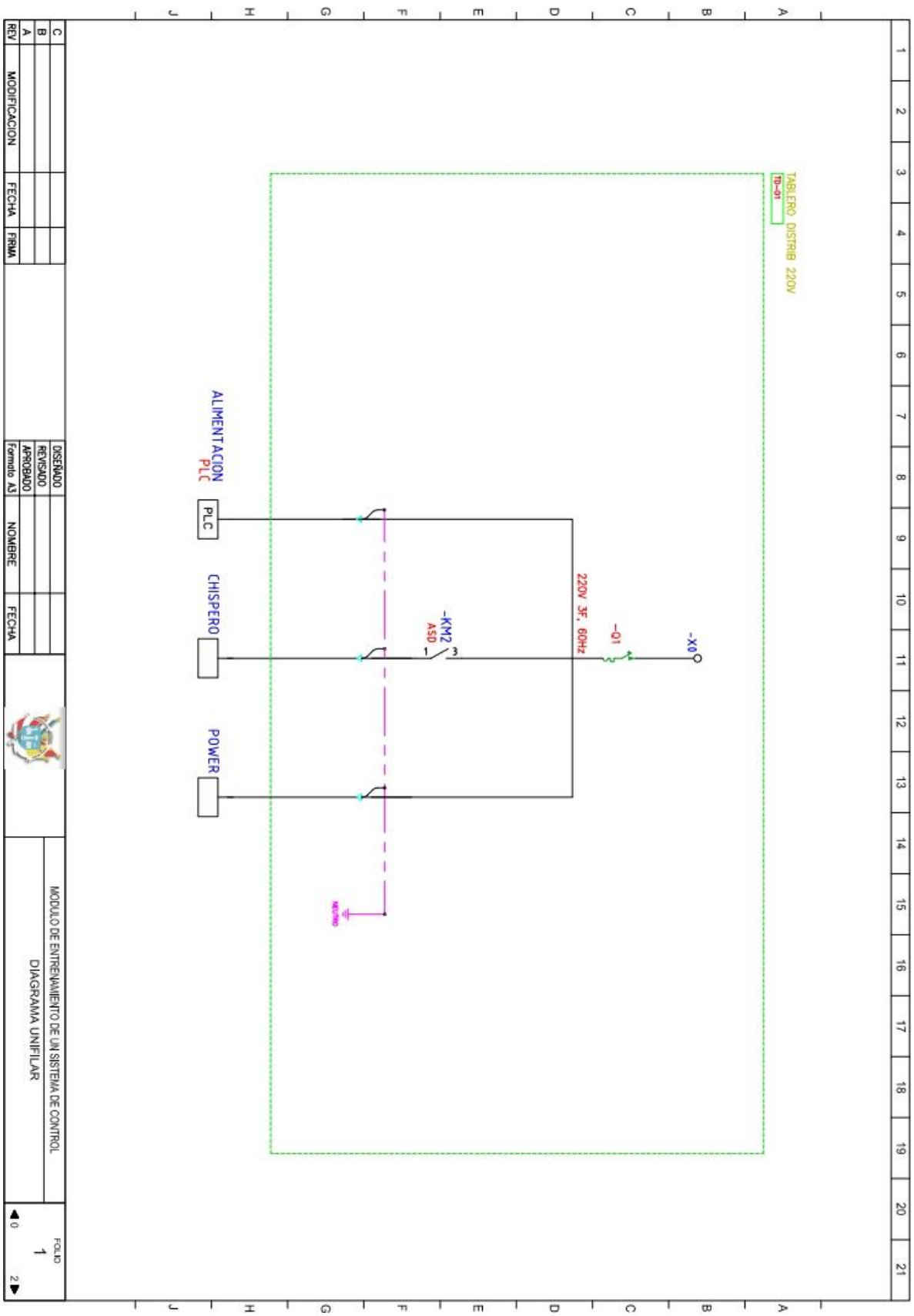
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ANEXO 2. PLANOS ELECTRICOS

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

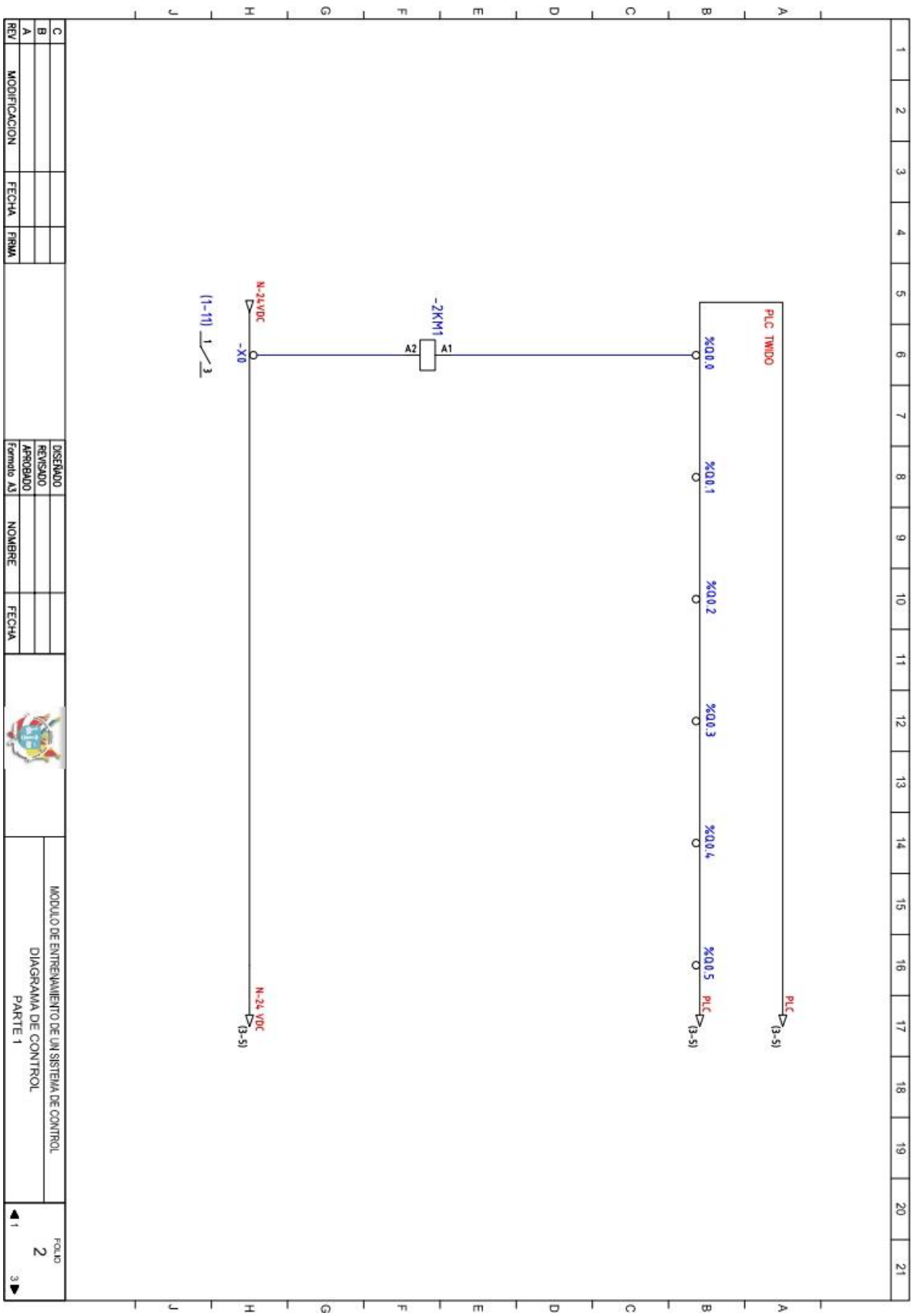
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

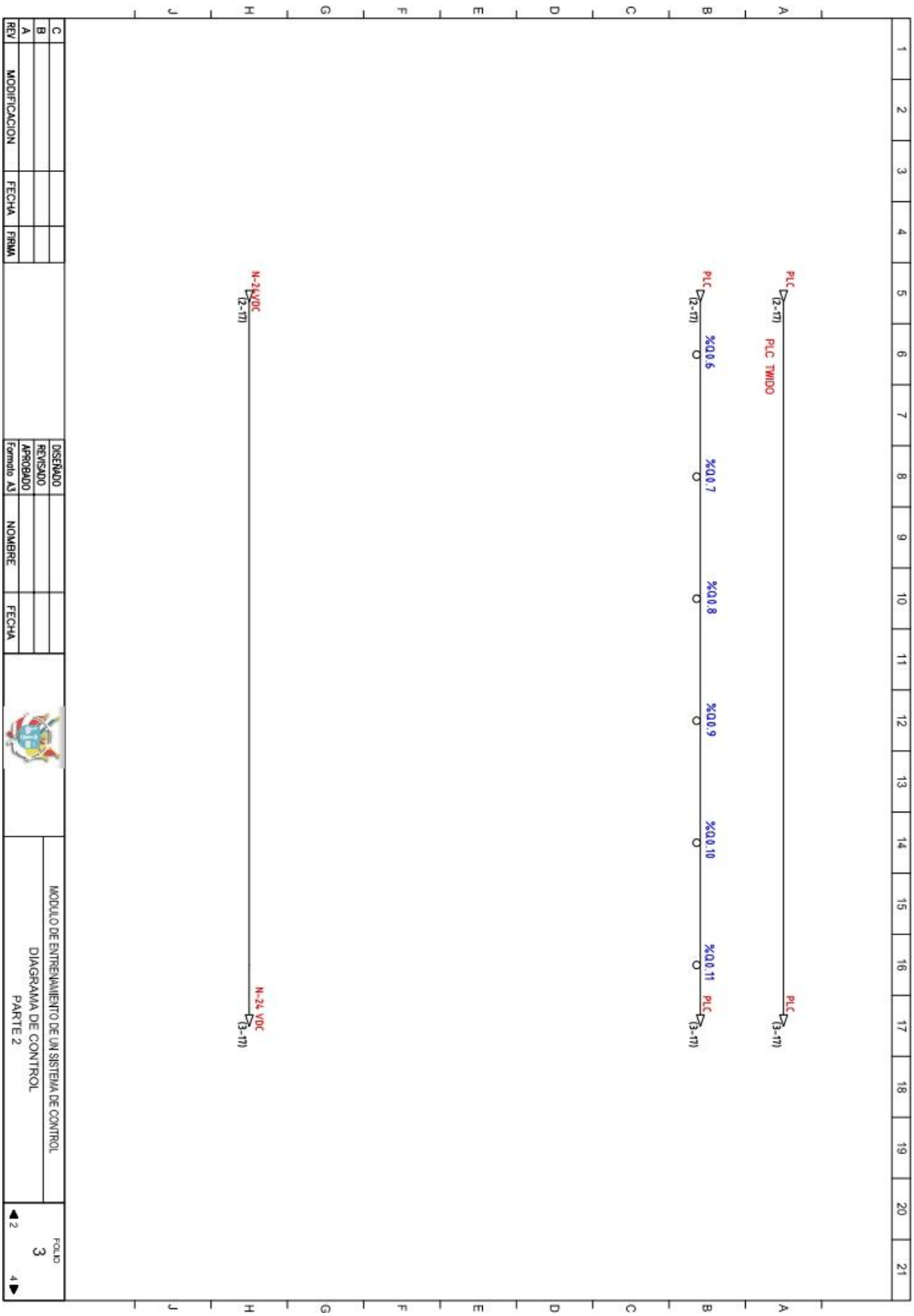
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

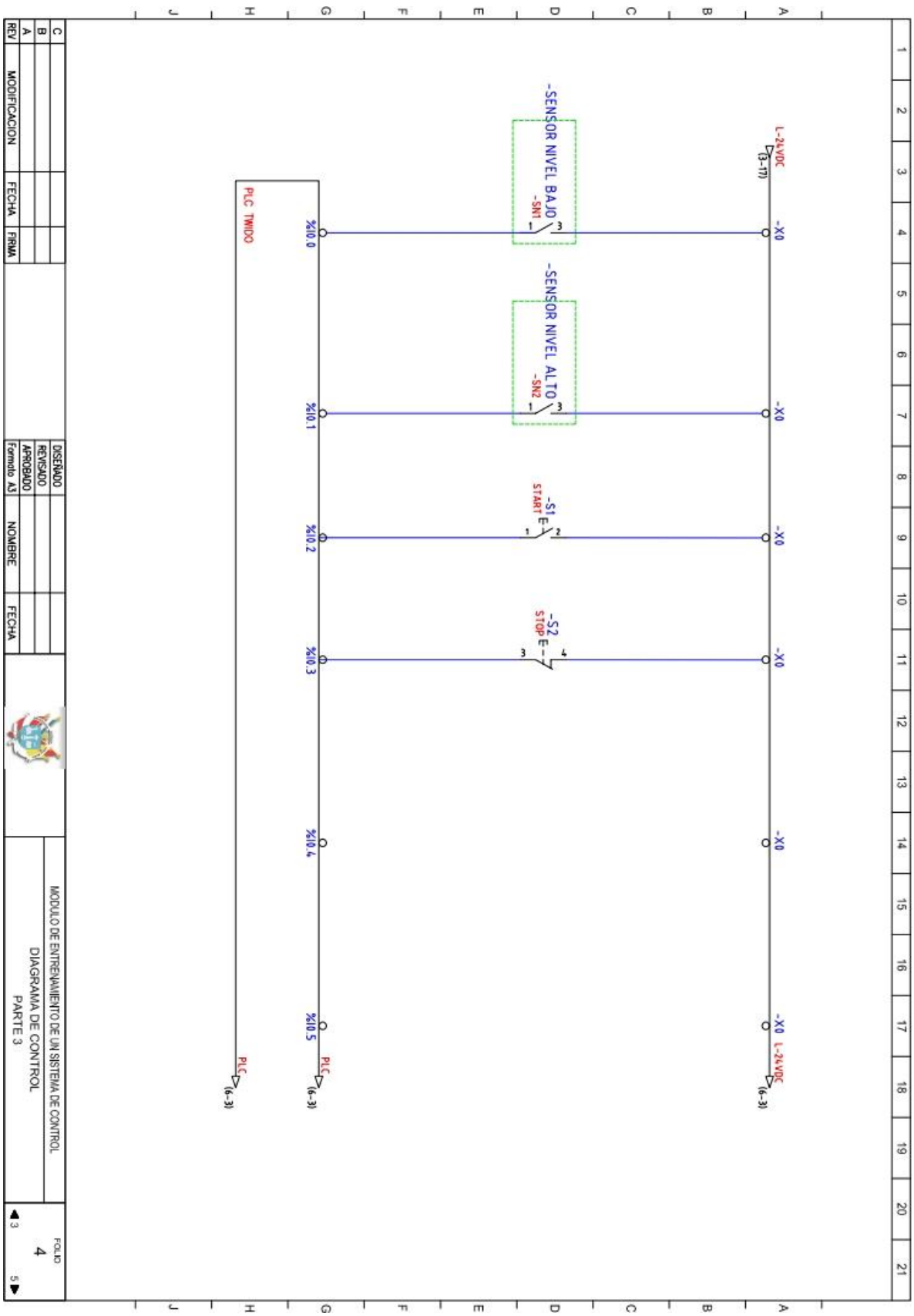
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

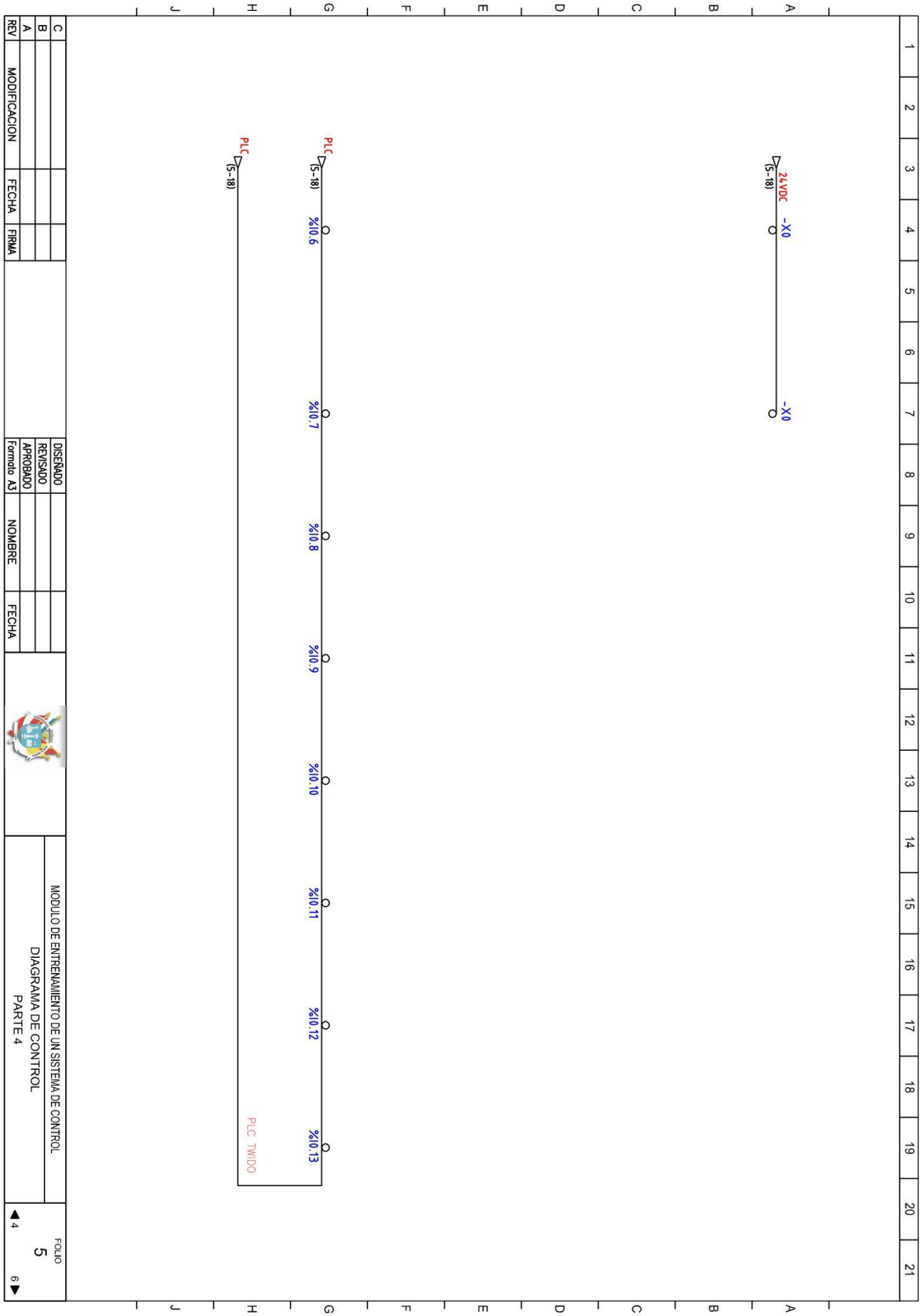
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

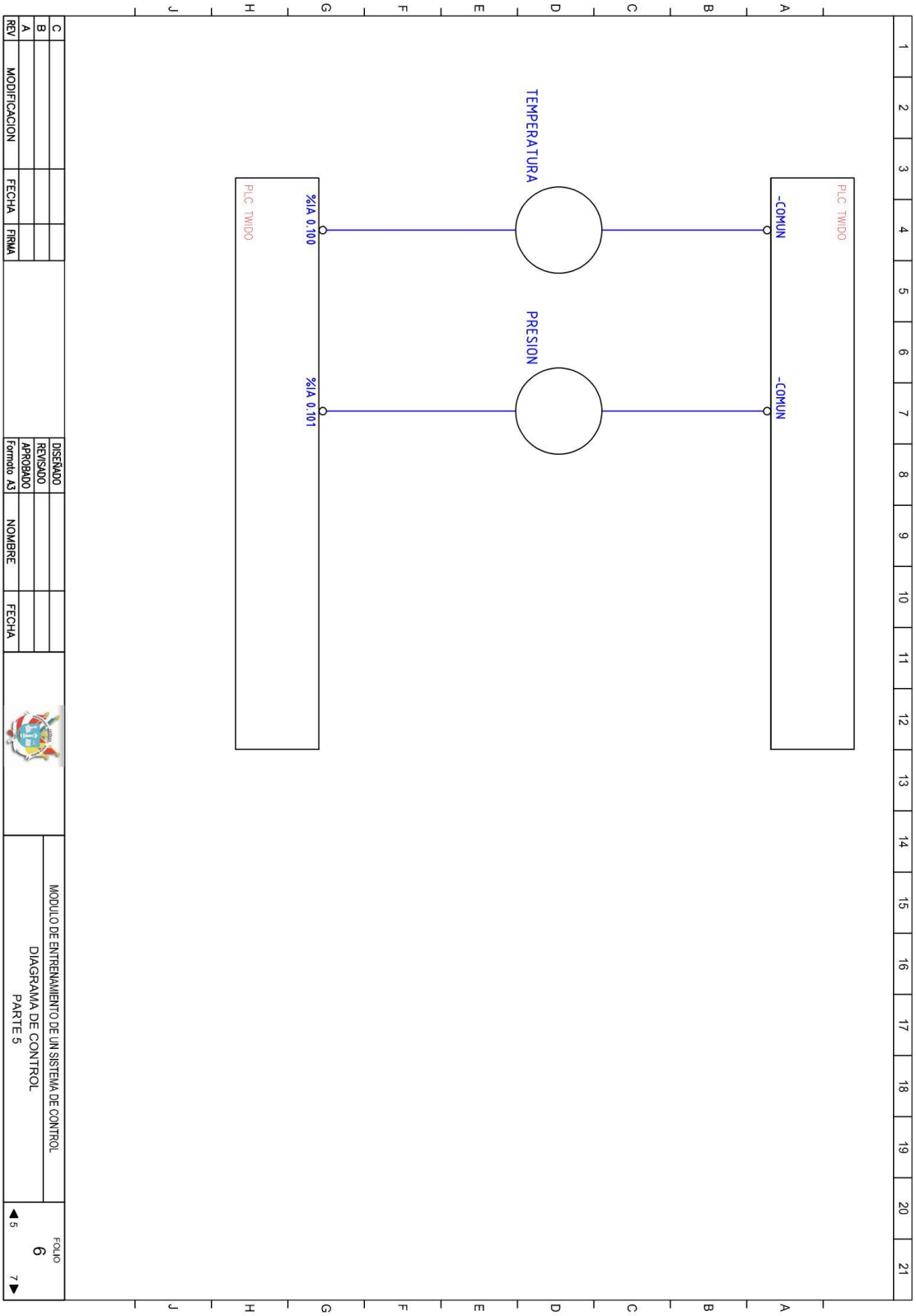
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

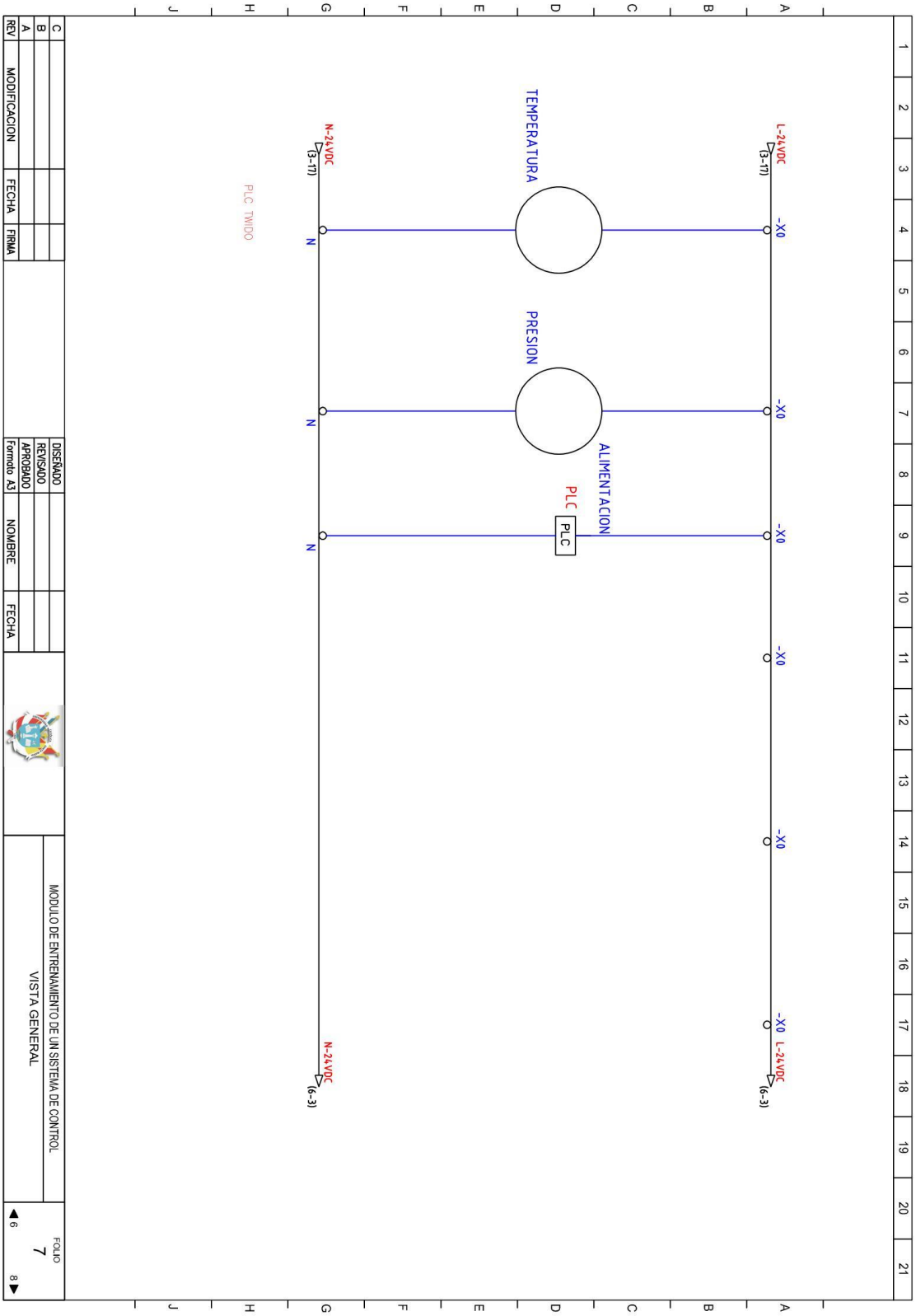
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

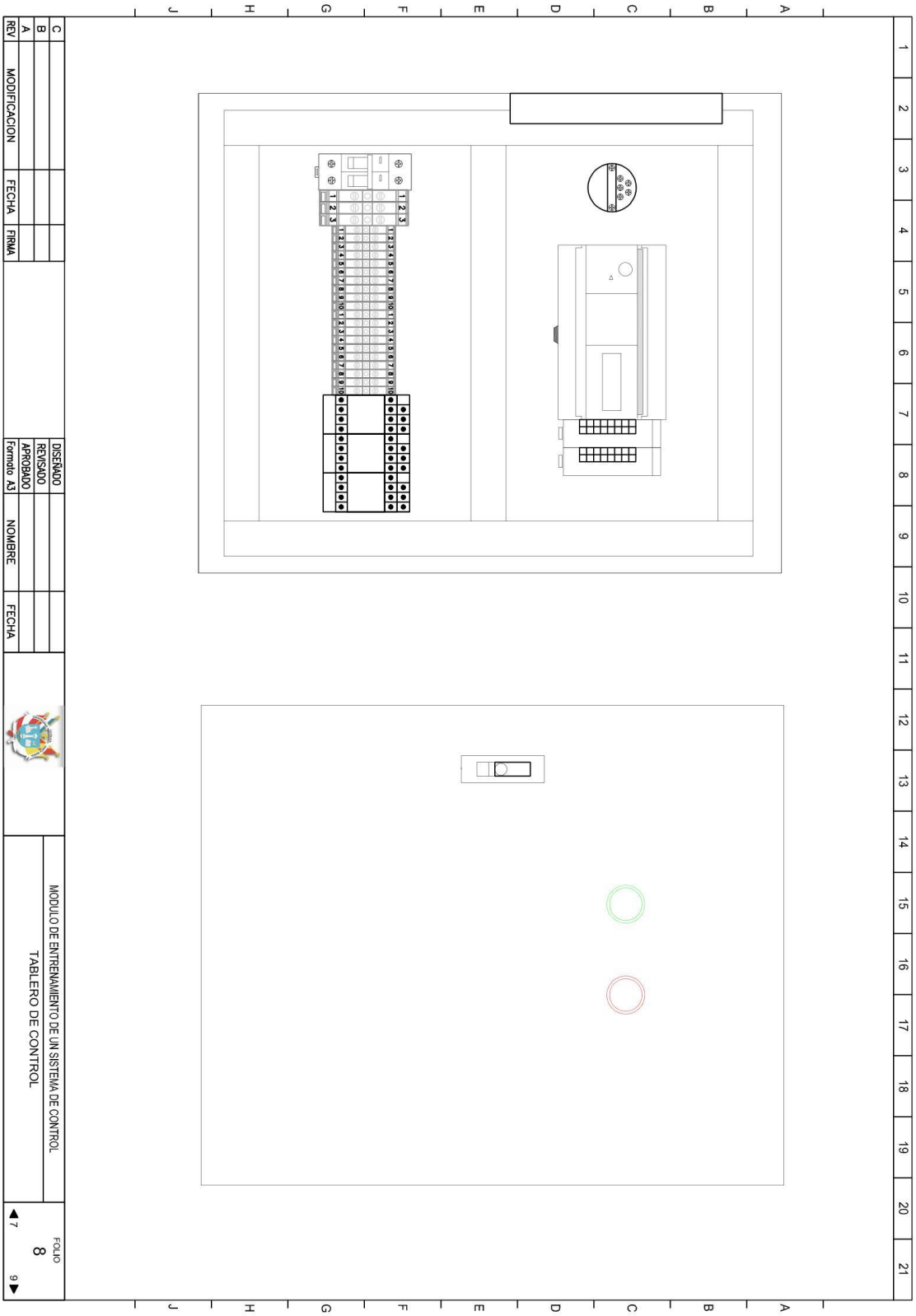
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

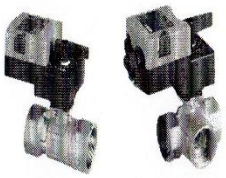
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ANEXO 3. DATA SHEET

- **VALVULA**

TF FLUID CONTROL SYSTEMS

TF Proportional Valve (0-10V or 4-20mA)



Description:

TF proportional valve consists of TFV4- series rotary actuator and DN15-DN50 brass ball valve. Equal percentage flow characteristic guarantees the valve performances of stability. Control ball valves are widely used in HVAC system, heating system, water treatment equipment, and water running control in industrial automation, such as: AHU, flesh air-handling unit, differential pressure control unit and heat ex-changer for flow regulation and on/off control.

Application:

HVAC system, Heating system, Water treatment system, Industrial equipment

Operational mode:

TF proportional valve is motor-operated by a type of, TFV4-304, TFV4-306 and TFV-310 actuator. The actuator is controlled by a modulating on/off, or proportional control system and move the ball of the valve, to the opening position dictated by the control signal.

Technical data:

Valve body:

Medium: cold/hot water, with 50% glycol — Temperature of medium: 2°C...90°C

Rated pressure: PN20 — Pipe connector: BSP internal thread

Ambient temp. Range: -5...+60°C; 0...90%RH — Size: 1/2" -2"

Valve type: 2-way and 3-way — Flow characteristic: equal percentage, on/off

Material:

Valve body: forged brass, Hpb59-1 — Seal: ball: EPDM+PTFE

Ball: chrome-plated brass — Stem: EPDM

Valve connector: PC — Valve spindle: aluminum alloy

Valve Type	DN(mm)	Inch	Kvs(m^3/h)	△Pmax (MPa)	△ Ps (KPa)
2 Way	DN15	1/2"	6.3	0.6Mpa	1400
	DN20	3/4"	6.3	0.6Mpa	1400
	DN25	1"	10	0.6Mpa	1400
	DN32	11/4"	16	0.6Mpa	1400
	DN40	11/2"	25	0.6Mpa	1400
	DN50	2"	43	0.6Mpa	1400
3-way	DN15	1/2"	6.3	0.6Mpa	1400
	DN20	3/4"	6.3	0.6Mpa	1400
	DN25	1"	10	0.6Mpa	1400
	DN32	11/4"	16	0.6Mpa	1400
	DN40	11/2"	25	0.6Mpa	1400
	DN50	2"	43	0.6Mpa	1400

r:

4VAC/DC±15%, proportional (0(2)-10VDC)

VAC/DC±15%, proportional (0(2)-10VDC/0(4)-20Ma)

TF FLUID CONTROL SYSTEMS

TFV4-310 24VAC/DC±15%, proportional (0(2)-10VDC/0(4)-20Ma)

Output torque: 4N.m, 6N.m and 10N.m Angle of rotation: 90°

Manual handle Automatic overload protection system

Manual selection of ball rotation direction: C.W. /C.C.W, factory setting is C.W.

Protect rank: IP54 Operation time: 50S-120S

Function (on/off and proportional type)

The actuator is controlled by a modulating on/off, and proportional control signal, using high transmitting ratio gear drive to fix and lock.

TFV4-304/306/310 24VAC/DC ± 15%, proportional (0(2)-10VDC/0(4)-20Ma)

Black wire and brown wire are the power wire.

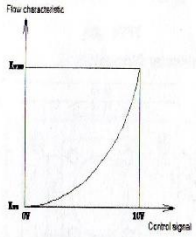
Yellow wire accept 0-10V control signal to control the valve's open angle

TFV4-304/306/310 Flow characteristic:

Input 0-10VDC control signal

Flow characteristic: equal percentage

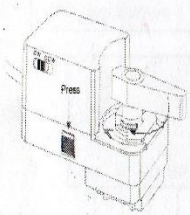
Flow range: 0%-100%



Model No.	Working Voltage	Actuator type	Output torque	Consumption	Suitable Valve body
TFV4-304	24VAC/DC±15%	0(2)-10VDC	4N.m	3VA	DN25,DN20,DN15
TFV4-306		(0(2)-10VDC/0(4)-20Ma)	6N.m	6VA	DN50、DN40,DN32,
TFV4-310		(0(2)-10VDC/0(4)-20Ma)	10N.m		DN50

Installation:

1. Ensure that the valve body is in the full open status.
2. Ensure that the actuator is in the fully open position as the follow picture:



3. Aligning the valve stem, press down the aluminum alloy spindle.

Change of running direction:

The rotation can be reversed by pushing the CCW/CW switch on the casing.



Factory settings: "CW"

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

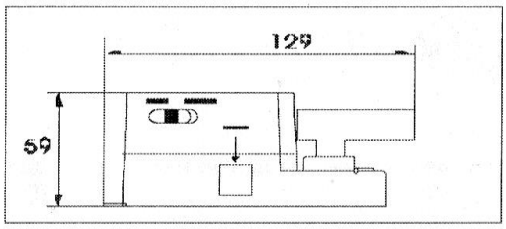
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

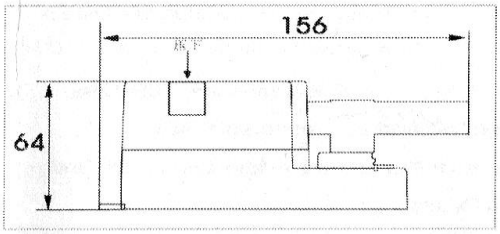
TF FLUID CONTROL SYSTEMS

Dimension and Wiring

Actuator:

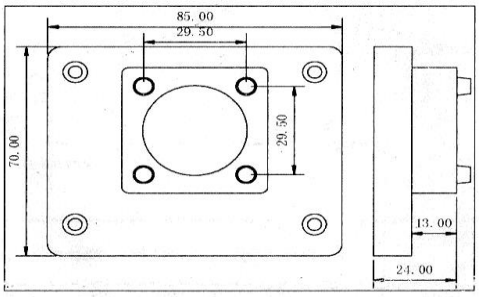


TFV4-304

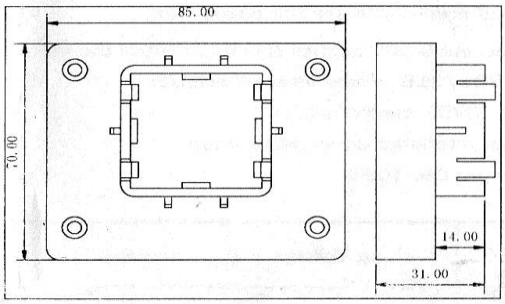


TFV4-306, TFV4-310

Connector Dimension:



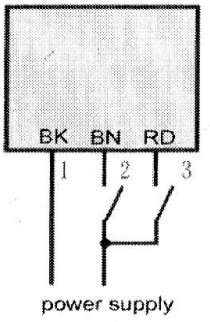
TFS-1



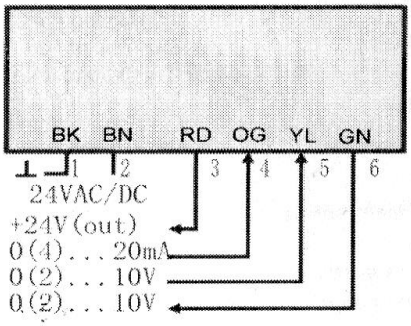
TFS-2

Model No	Commodity	Application	Actuator	Suitable Valve body
TFS-1	Connector	Be used to connect the actuator and the valve body	TFV4-304	2 Way DN15,DN20,DN25 3 Way DN15,DN20,DN25
TFS-2			TFV4-306, TFV4-310,	2 Way DN32,DN40,DN50 3 Way DN32,DN40,DN50

Wiring diagram:



TFV4-304/306
(ON/OFF Valve TYPE)



TFV4-304, TFV4-306, TFV4-310
(Proportional Valve Type)

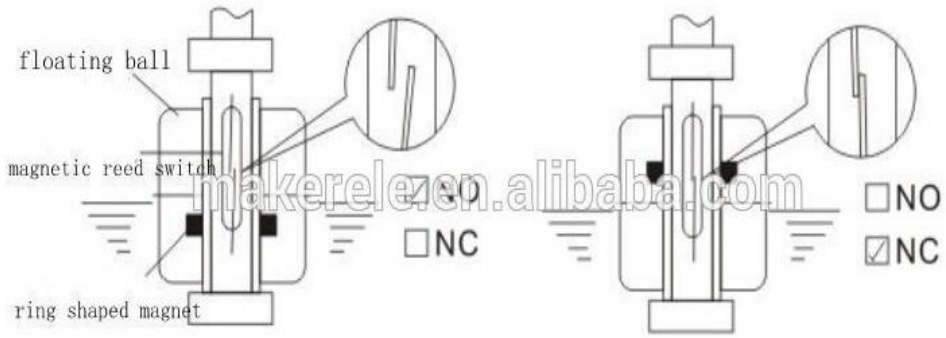
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- **SENSOR DE NIVEL**

Mini interruptor de nivel de bola flotante de acero inoxidable MK-SCFS11Principio de trabajo: Cuando la bola flotante se levanta o cae con el líquido al nivel del interruptor, la fuerza magnética del imán que se encuentra dentro de la bola flotante hará que el interruptor de lengüeta se encienda. Cuando la bola flotante se aleje del interruptor de lengüeta, el interruptor de lengüeta se apagará.



makereleen.alibaba.com

Características:

(1) Elección de apertura normal o cierre normal

(2) No requiere energía en espera.

(3) El cliente puede definir la distancia activada, la longitud del cable y el conector.

(4) herméticamente sellado, adecuado para un entorno resistente y una larga vida útil.

Especificaciones:

Nombre del producto	De acero inoxidable de la bola de flotador interruptor
Contactos	NO + NC
Max contacto, nominal	10 W
De entrada Tensión de	220VDC
Interruptor de corriente	0.5A
Max llevar actual	1.0A
Max resistencia de contacto	100 m ohm

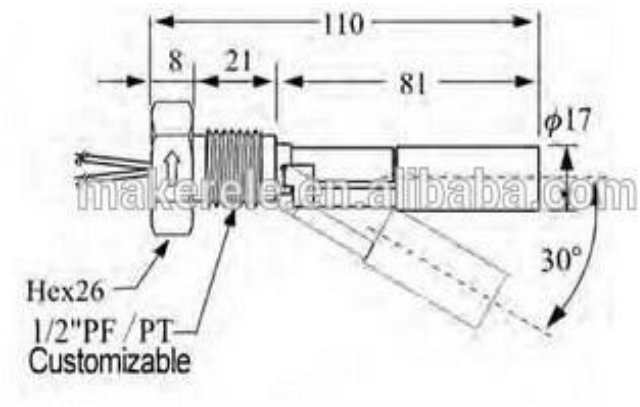
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Anti-explosión	No
Sonda de material	SUS304/SUS316L
Material del cuerpo de	SUS304/SUS316L
Tipo de montaje	1/8 ”PF (personalizable
Instalación	Vertical

Tamaño:



- **SENSOR DE TEMPERATURA PT100**

El sensor de temperatura PT100 es un tipo específico de RTD. Un RTD (del inglés: Resistance Temperature Detector) es un detector de temperatura resistivo, es decir, un sensor de temperatura cuyo principio de medición es la variación de la resistencia de un conductor en función de su temperatura. Al aumentar la temperatura en un metal habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, teniendo como consecuencia el aumento de la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia.

Los sensores PT100 consisten en un alambre de platino encapsulado con una resistencia de 100 Ohm a 0°C (característica principal que da nombre al sensor). La resistencia del PT100 varía en función de su temperatura, por lo que si logramos medir el valor de resistencia podremos saber cuál es la temperatura en ese instante. Existen sensores PT100 de dos, tres y cuatro hilos de conexión.

Los PT100 son levemente más costosos y mecánicamente no tan rígidos como las termocuplas, pero los superan en precisión especialmente en aplicaciones de temperaturas bajas (-100°C a +200°C). Una ventaja del sensor PT100 es que al contrario que otros sensores que se degradan con el tiempo y dan lecturas erróneas, el PT100 abre el circuito y se puede saber cuándo es necesario cambiarlo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Para leer el sensor con Arduino se pueden utilizar diversas técnicas. La manera más sencilla (pero no la más recomendable) de medir el sensor es utilizando un divisor de tensión. Para aplicaciones de mayor precisión se recomiendo usar configuraciones de amplificador operacional o puente de Wheatstone.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Rango de Trabajo: -100°C hasta 400°C
- Conexión: 3 Hilos
- Dimensiones: D5mm x L100mm
- Longitud del cable: 0.5m
- Diámetro de la rosca: 8mm/0.31"
- Longitud de cable: 1m
- Material de sonda: acero inox.
- Resistente al agua

- **TRASDUCTOR DE PT 100**

Rango: 0-200 grados Celsius

1. Corriente de excitación :< = 800uA
2. Precisión: +/-0.2% F.S
3. Coeficiente de temperatura :< = 150ppm/K.F.S
4. Temperatura de funcionamiento:-20 85
5. Humedad de funcionamiento: <98% RH
6. Presión de aire operativa: 80-110kPa
7. Potencia: 24 V CC +/-10%
8. Salida: 4-20mA
9. Límite de corriente de salida: 26mA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ANEXO 4. EJERCICIOS PRACTICOS

PRIMERA PRÁCTICA DE LABORATORIO:

CONTROL PI

I. *OBJETIVOS*

1. Obtener los parámetros de sintonización de un control PI
2. Visualizar la forma de onda característica de un sistema de control PI
3. Sintonizar en una caldera un control PI

II. TEMAS A TRATAR

1. Concepto de control PI
2. Concepto de parámetros de sintonización
3. Métodos para obtener los parámetros de sintonización

III. MARCO TEORICO

a) Control PI

Proporcional: (algunas veces llamado ganancia o sensibilidad) es una acción de control que reproduce cambios de la entrada con cambios en la salida. La acción proporcional del controlador responde a los cambios presentes en la entrada y generara inmediatamente y proporcionalmente cambios en la salida. Cuando pensamos en una "acción proporcional" (P), pensamos puntualmente: esta acción de control trabaja inmediatamente (nunca muy pronto o muy tarde) para que los cambios coincidan con la señal de entrada.

Matemáticamente se define, como la relación de cambio de la salida respecto al cambio de la entrada. Esto puede ser expresado como el cociente de diferencias:

$$\textbf{Valor de Ganancia} = \Delta\textbf{Output} / \Delta\ \textbf{Input}$$

$$\textbf{Valor de Ganancia} = d\textbf{Output} / d\ \textbf{Input} = dm/de$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Por ejemplo, si la entrada PV de un controlador proporcional con ganancia de 2 repentinamente cambia ("salto") a 5 por ciento, y entonces la salida inmediatamente cambiará a 10 por ciento (ΔOutput = Ganancia x Δ Input). La dirección de este salto en la salida relacionada con la dirección del cambio en la entrada, depende si el controlador está configurado para una acción directa o inversa.

Un término que también se usa para expresar el mismo concepto es la "banda proporcional", el inverso de la ganancia. "la banda proporcional" es definida como una cantidad de cambio de entrada necesaria para evocar un cambio en la salida a full escala (100%) en un controlador proporcional:

Valor de banda proporcional = Δ Input / ΔOutput

Usando el mismo ejemplo de un controlador proporcional que realiza un paso en su salida de 10% en respuesta a un cambio en la PV de 5%, la banda proporcional seria 50%. Es decir, inverso a la ganancia 1/2 = 50%.

La integral: (algunas veces llamado reset o control flotante) es una acción de control que provoca un cambio en la señal de salida respecto del tiempo a una razón proporcional de la cantidad de error (la diferencia entre el valor de PV y SP). La acción integral del controlador responde a un error acumulado en el tiempo, cambiando la señal de salida tanto como se necesite para eliminar completamente el error. Si la acción proporcional (P) le dice a la salida tanto desplazarse cuando un error aparece, la acción integral (I) le dice a la salida que tan rápido moverse cuando un error aparece. Si la acción proporcional (P) actúa en el presente, la acción integral (I) actúa en el pasado. Por lo tanto, que tan rápido la señal de salida es controlada por la acción integral depende de la historia del error en el tiempo: cuanto error existió, y que duración. Cuando pensemos en "la acción integral" (I), pensemos en "impaciencia": esta acción de control maneja la salida para aumentar y aumentar su valor conforme haya una diferencia entre PV y SP.

Matemáticamente, la acción integral se define como el cociente entre la velocidad de salida y el error de entrada:

El valor integral (repeticiones por minuto) = Velocidad de Salida / Error de Entrada

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El valor integral (repeticiones por minuto) = (dm/dt)/e

Una manera alternativa de expresar la acción integral es usar su unidad reciproca en "minutos por repetición". Si definimos la acción integral en esos términos, la ecuación se definiría:

El valor integral (minutos por repetición) = Ti = Error de Entrada / Velocidad de Salida

El valor integral (minutos por repetición) = Ti = e / (dm/dt)

Por ejemplo, si un error de 5% aparece entre PV y SP entonces un controlador integral (solo integral) con un valor integrativo de 3 repeticiones por minuto (o un tiempo integral de 0.333 minutos por repetición), la salida empezara a cambiar a una tasa de 15% por minuto (dm/dt = Valor Integral X e, o dm/dt = e/Ti). En múltiples controladores PI y PID, la respuesta integral también es multiplicada por la ganancia proporcional, entonces para las mismas condiciones del ejemplo anterior aplicado a un controlador PI (con ganancia de 2) resultaría que la salida cambiaria a una tasa de 30% por minuto (dm/dt = Valor Ganancia X Valor Integral X e, o dm/dt = Valor Ganancia X e/Ti). La dirección de este cambio en relación a la dirección (signo) del error depende si el controlador está configurado con una acción directa o reversa.

b) Parámetros de Sintonización

La sintonización de los controladores Proporcional – Integral – Derivativo o simplemente controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros (Kp, Ti, Td), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido. Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso, y a partir de esta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado.

KP = ganancia proporcional.

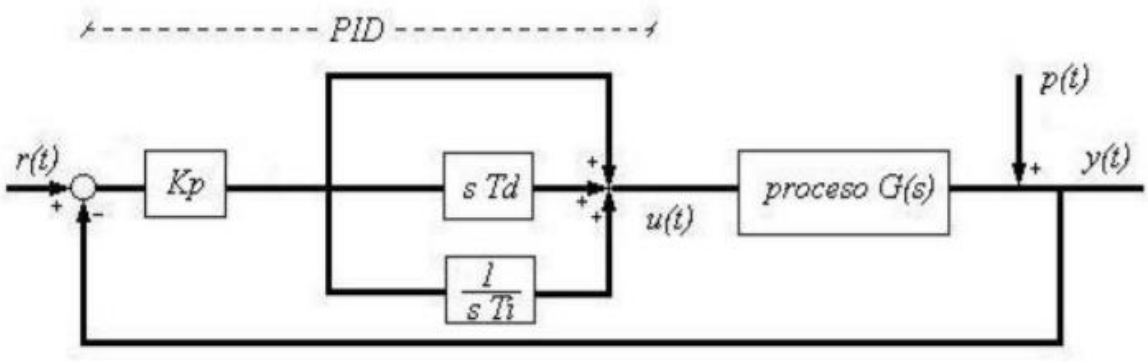
Ti = constante (o tiempo) integral.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Td = constante (o tiempo) derivativa.



La sintonía del controlador se reduce al ajuste de las constantes Kp, Ti y Td a los fines de verificar las especificaciones preestablecidas. En muchas aplicaciones, estos tres parámetros no son suficientes para satisfacer en forma simultánea las especificaciones de rechazo a perturbaciones y de seguimiento.

En general estas dos especificaciones están en contraposición. Efectivamente, en control de procesos es común requerir un comportamiento relativamente subamortiguado para rechazar perturbaciones (las cuales son normalmente pequeñas frente al valor de la referencia) de modo que la variable controlada entre rápidamente en la zona de tolerancia. Este comportamiento subamortiguado suele ser no tolerable para cambios en el setpoint, ya que puede dar origen a sobrepicos de valor absoluto importantes.

c) Métodos para obtener los parámetros de sintonización

Existen varias alternativas para diseñar y sintonizar controladores:

- Mediante el lugar de las raíces
- Técnicas de la respuesta en frecuencia de Bode
- Criterios de sintonización de Nyquist
- Criterios de sintonización de Nichols
- Sintonización ensayo – error

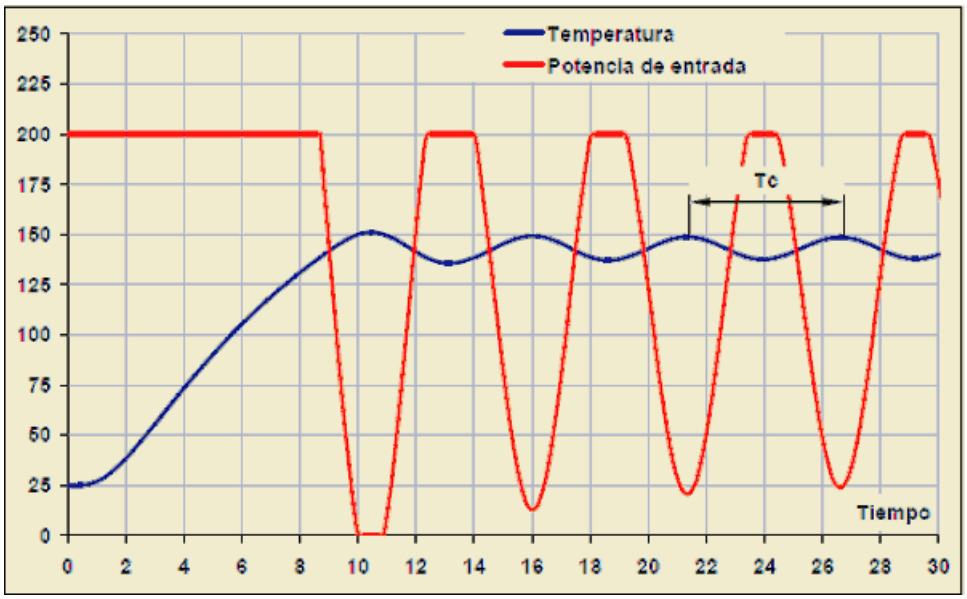
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La cual nos enfocaremos en el criterio de sintonización de Ziegler – Nichols específicamente en:

Sintonización por la ganancia critica en lazo cerrado: Este método no requiere retirar el controlador PID del lazo cerrado. En este caso solo hay que reducir al mínimo la acción derivativa y la acción integral del regulador PID. El ensayo en lazo cerrado consiste en aumentar poco a poco la ganancia proporcional hasta que el sistema oscile de forma mantenida ante cualquier perturbación. Esta oscilación debe ser lineal, sin saturaciones. En este momento hay que medir la ganancia proporcional, llamada ganancia crítica o Kc, y el periodo de oscilación Tc en segundos.



Una vez hallados estos dos parámetros se pueden calcular los parámetros del controlador PID con acción solo proporcional (P), proporcional e integral (PI) o proporcional integral y derivativa (PID):

	Kp	Ti	Td
P	0.50*Kc		
PI	0.45*Kc	0.83*Tc	
PID	0.59*Kc	0.50*Tc	0.125*Tc

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

IV. CUESTIONARIO PREVIO

1. Defina con sus palabras que es un control Proporcional?

2. Defina con sus palabras que es un control Integral?

3. Cuáles son las constantes de control y para qué sirven?

4. Explique con sus palabras en que consiste la Sintonización por la ganancia crítica en lazo cerrado?

V. ACTIVIDADES

Para los ejercicios propuestos a continuación

- Desarrolle la solución

1. Se sintonizara por el método de la ganancia crítica en lazo cerrado por lo cual reduciremos al mínimo la acción derivativa y la acción integral del regulador PID.

		Us	Address	Symbol	Current	Retained	Format
1		☑	%MW10		6025	0	Decimal
2		☑	%MW11		0	0	Decimal
3		☑	%MW12		0	0	Decimal
4		☑	%MW13		0	0	Decimal
5		☑	%MW16		0	0	Decimal
6		☑	%MW17		0	0	Decimal
7		☑	%MW18		0	0	Decimal
8							

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2. Luego iremos aumentando poco a poco la ganancia proporcional

Kp con 4000

2	☑	%MW11		4000	0	Decimal

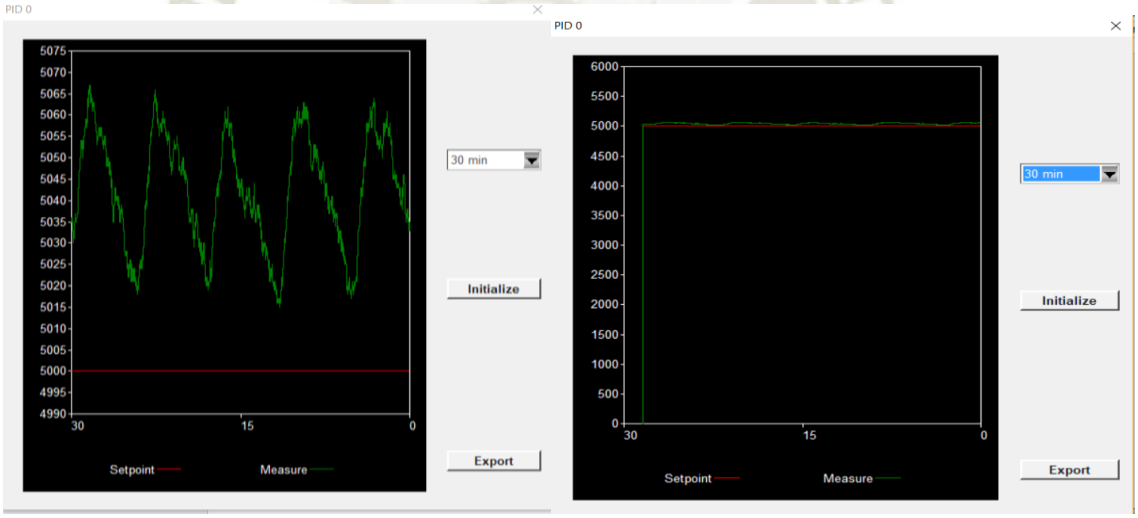
Kp con 6000

1	☑	%MW10		6000	0	Decimal

Kp con 8000

2	☑	%MW11		8000	0	Decimal

3. Una vez que el valor de Kp haga una oscilación estable y mantenida se debe de mantener ese valor Kp=8000



4. Luego que obtenemos la salida oscilando constantemente procedemos a hallar la constante de tiempo para poder conseguir los parámetros de sintonización:

Nuestra constante de tiempo en este caso seria 2.7 minutos

Aplicamos las fórmulas para hallar los parámetros:

	Kp	Ti	Td
P	0.50*Kc		
PI	0.45*Kc	0.83*Tc	
PID	0.59*Kc	0.50*Tc	0.125*Tc

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Kc = 8000 Tc = 2.7 minutos

Hallamos Kp

Kp = 0.45*Kc

Kp = 3600

Hallamos Ti

Ti = 0.83*Tc

Ti = 0.83*2.7 = 2.24 minutos

Ahora convertimos el Ti de minutos a segundo:

Ti = 2.24*60 = 134.46

Por último es necesario ingresar este dato al programa twido por ende lo convertimos a su lenguaje

Ti = 134.46*10 = 1345

5. Ingresamos los valores al twido y corremos el programa

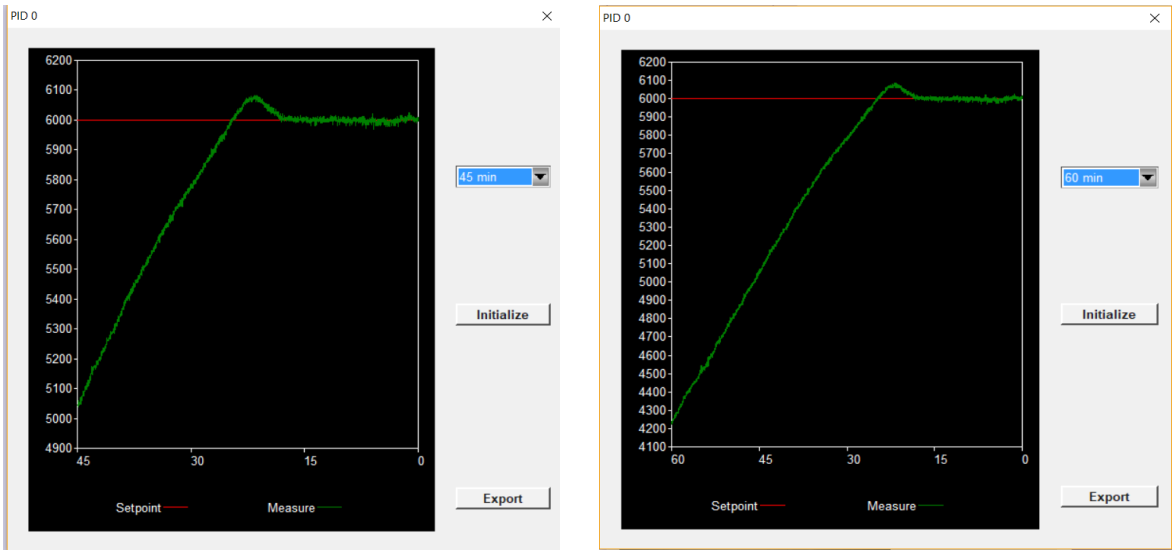
		Us	Address	Symbol	Current	Retained	Format
1		☑	%MW10		6025	0	Decimal
2		☑	%MW11		3600	0	Decimal
3		☑	%MW12		1345	0	Decimal
4		☑	%MW13		0	0	Decimal

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

6. Obtenemos nuestras graficas del proceso:



VI. CONCLUSIONES

Emita al menos 5 conclusiones alrededor de la obtención de los parámetros de sintonización para un control PI

VII. CUESTIONARIO/EJERCICIOS

1. Es posible hallar en este proceso los parámetros de sintonización para un Kp=5000? Porque?

2. Explique brevemente los otros métodos de diseño y sintonización de controladores?

3. Al agregarse una perturbación al proceso como cree que reaccionara el controlador?

4. Nombre algunas diferencias entre un control PI vs un control PID

.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

SEGUNDA PRÁCTICA DE LABORATORIO:

CONTROL PID

I. *OBJETIVOS*

1. Obtener los parámetros de sintonización de un control PID
2. Visualizar la forma de onda característica de un sistema de control PID
3. Sintonizar en una caldera un control PID

II. TEMAS A TRATAR

1. Concepto de control PID
2. Concepto de parámetros de sintonización
3. Métodos para obtener los parámetros de sintonización

III. MARCO TEORICO

a) Control PI

Proporcional: (algunas veces llamado ganancia o sensibilidad) es una acción de control que reproduce cambios de la entrada con cambios en la salida. La acción proporcional del controlador responde a los cambio presentes en la entrada y generara inmediatamente y proporcionalmente cambios en la salida. Cuando pensamos en una "acción proporcional" (P), pensamos puntualmente: esta acción de control trabaja inmediatamente (nunca muy pronto o muy tarde) para que los cambios coincidan con la señal de entrada.

Matemáticamente se define, como la relación de cambio de la salida respecto al cambio de la entrada. Esto puede ser expresado como el cociente de diferencias:

Valor de Ganancia = ΔOutput /Δ Input

Valor de Ganancia = dOutput /d Input = dm/de

Por ejemplo, si la entrada PV de un controlador proporcional con ganancia de 2 repentinamente cambia ("salto") a 5 por ciento, y entonces la salida inmediatamente cambiará a 10 por ciento (ΔOutput = Ganancia x Δ Input). La dirección de este salto en la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

salida relacionada con la dirección del cambio en la entrada, depende si el controlador está configurado para una acción directa o inversa.

Un término que también se usa para expresar el mismo concepto es la "banda proporcional", el inverso de la ganancia. "la banda proporcional" es definida como una cantidad de cambio de entrada necesaria para evocar un cambio en la salida a full escala (100%) en un controlador proporcional:

Valor de banda proporcional = Δ Input / ΔOutput

Usando el mismo ejemplo de un controlador proporcional que realiza un paso en su salida de 10% en respuesta a un cambio en la PV de 5%, la banda proporcional seria 50%. Es decir inverso a la ganancia 1/2 = 50%.

La integral: (algunas veces llamado reset o control flotante) es una acción de control que provoca un cambio en la señal de salida respecto del tiempo a una razón proporcional de la cantidad de error (la diferencia entre el valor de PV y SP). La acción integral del controlador responde a un error acumulado en el tiempo, cambiando la señal de salida tanto como se necesite para eliminar completamente el error. Si la acción proporcional (P) le dice a la salida tanto desplazarse cuando un error aparece, la acción integral (I) le dice a la salida que tan rápido moverse cuando un error aparece. Si la acción proporcional (P) actúa en el presente, la acción integral (I) actúa en el pasado. Por lo tanto, que tan rápido la señal de salida es controlada por la acción integral depende de la historia del error en el tiempo: cuanto error existió, y que duración. Cuando pensemos en "la acción integral" (I), pensemos en "impaciencia": esta acción de control maneja la salida para aumentar y aumentar su valor conforme haya una diferencia entre PV y SP.

Matemáticamente, la acción integral se define como el cociente entre la velocidad de salida y el error de entrada:

El valor integral (repeticiones por minuto) = Velocidad de Salida / Error de Entrada

El valor integral (repeticiones por minuto) = (dm/dt)/e

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Una manera alternativa de expresar la acción integral es usar su unidad reciproca en "minutos por repetición". Si definimos la acción integral en esos términos, la ecuación se definiría:

El valor integral (minutos por repetición) = Ti = Error de Entrada / Velocidad de Salida

El valor integral (minutos por repetición) = Ti = e / (dm/dt)

Por ejemplo, si un error de 5% aparece entre PV y SP entonces un controlador integral (solo integral) con un valor integrativo de 3 repeticiones por minuto (ó un tiempo integral de 0.333 minutos por repetición), la salida empezara a cambiar a una tasa de 15% por minuto (dm/dt = Valor Integral X e, o dm/dt = e/Ti). En múltiples controladores PI y PID, la respuesta integral también es multiplicada por la ganancia proporcional, entonces para las mismas condiciones del ejemplo anterior aplicado a un controlador PI (con ganancia de 2) resultaría que la salida cambiaria a una tasa de 30% por minuto (dm/dt = Valor Ganancia X Valor Integral X e, o dm/dt = Valor Ganancia X e/Ti). La dirección de este cambio en relación a la dirección (signo) del error depende si el controlador está configurado con una acción directa o reversa.

La derivada: algunas veces llamado rate (razón) o pre-act, es una acción de control que realiza un desplazamiento en la señal de salida proporcional a la tasa a la cual cambia la entrada. La acción derivativa del controlador reacciona a que tan rápido cambia la entrada respecto al tiempo, alterando la señal de salida en proporción con la tasa de cambio de entrada. Si la acción proporcional (P) le dice a la salida que tan lejos ir cuando un error aparece, la acción derivativa (D) le dice a la salida que tan lejos ir cuando la entrada cambia. Si la acción proporcional (P) actúa en el presente y la acción integral (I) actúa en el pasado, la acción derivativa (D) actúa en el futuro: eficazmente "anticipa" los overshoot (sobre impulso) intentando una respuesta de salida acorde que tan rápido la variable de proceso está creciendo o cayendo. Cuando pensamos en una "acción derivativa" (D), pensemos discreción: esta acción de control actúa prudente y cuidadosamente, trabajando en contra del cambio.

Matemáticamente, se define la acción derivativa como una relación del desplazamiento de salida con la velocidad de entrada:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Constante de tiempo derivativo (minutos) = Td = Desplazamiento de salida / Velocidad de entrada

Constante de tiempo derivativo (minutos) = Td = ΔSalida / (de/dt)

Por ejemplo, si la señal PV empieza a cambiar a una tasa de 5% por minuto en un controlador de procesos con un tiempo constante de 4 minutos, la salida inmediatamente tendrá un desplazamiento de 20% (ΔSalida = Valor Derivativo X de/dt). En la mayoría de controladores PD y PID, la respuesta derivativa también es multiplicada por la ganancia proporcional, entonces en las mismas condiciones del controlador anterior con una ganancia de 2 el resultado sería un desplazamiento inmediato de 40% (ΔSalida = Valor de Ganancia X Derivativo X de/dt). La dirección (signo) de este desplazamiento en relación de la dirección del cambio en la entrada depende si el controlador está configurado para una acción directa o inversa.

b) Parámetros de Sintonización

La sintonización de los controladores Proporcional – Integral – Derivativo o simplemente controladores PID, consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros (Kp, Ti, Td), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido. Para poder realizar la sintonización de los controladores, primero debe identificarse la dinámica del proceso, y a partir de esta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado.

KP = ganancia proporcional.

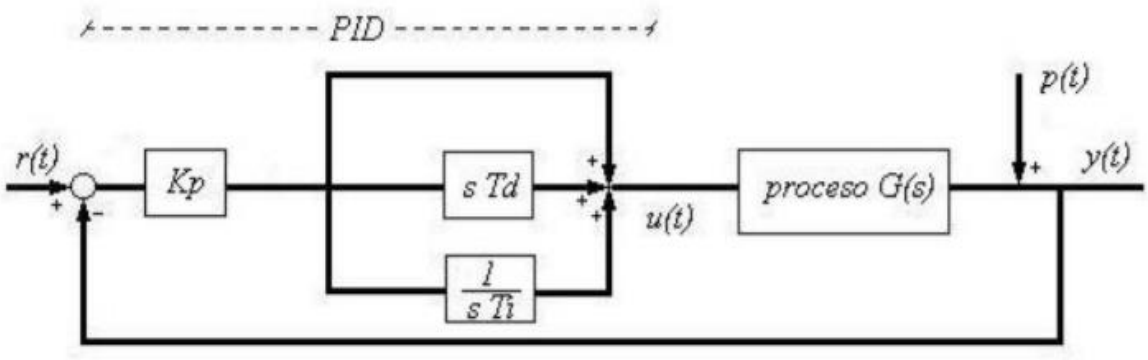
Ti = constante (o tiempo) integral.

Td = constante (o tiempo) derivativa.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA



La sintonía del controlador se reduce al ajuste de las constantes Kp, Ti y Td a los fines de verificar las especificaciones preestablecidas. En muchas aplicaciones, estos tres parámetros no son suficientes para satisfacer en forma simultánea las especificaciones de rechazo a perturbaciones y de seguimiento.

En general estas dos especificaciones están en contraposición. Efectivamente, en control de procesos es común requerir un comportamiento relativamente subamortiguado para rechazar perturbaciones (las cuales son normalmente pequeñas frente al valor de la referencia) de modo que la variable controlada entre rápidamente en la zona de tolerancia. Este comportamiento subamortiguado suele ser no tolerable para cambios en el setpoint, ya que puede dar origen a sobrepicos de valor absoluto importantes.

c) Métodos para obtener los parámetros de sintonización

Existen varias alternativas para diseñar y sintonizar controladores:

- Mediante el lugar de las raíces
- Técnicas de la respuesta en frecuencia de Bode
- Criterios de sintonización de Nyquist
- Criterios de sintonización de Nichols
- Sintonización ensayo – error

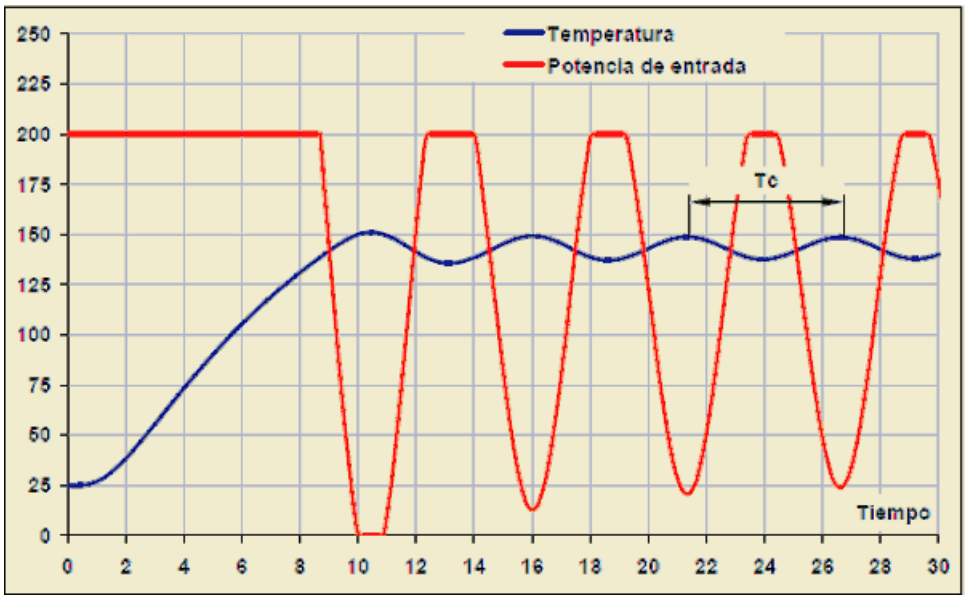
La cual nos enfocaremos en el criterio de sintonización de Ziegler – Nichols específicamente en:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Sintonización por la ganancia critica en lazo cerrado: Este método no requiere retirar el controlador PID del lazo cerrado. En este caso solo hay que reducir al mínimo la acción derivativa y la acción integral del regulador PID. El ensayo en lazo cerrado consiste en aumentar poco a poco la ganancia proporcional hasta que el sistema oscile de forma mantenida ante cualquier perturbación. Esta oscilación debe ser lineal, sin saturaciones. En este momento hay que medir la ganancia proporcional, llamada ganancia crítica o Kc, y el periodo de oscilación Tc en segundos.



Una vez hallados estos dos parámetros se pueden calcular los parámetros del controlador PID con acción solo proporcional (P), proporcional e integral (PI) o proporcional integral y derivativa (PID):

	Kp	Ti	Td
P	0.50*Kc		
PI	0.45*Kc	0.83*Tc	
PID	0.59*Kc	0.50*Tc	0.125*Tc

IV. CUESTIONARIO PREVIO

1. Defina con sus palabras que es un control Proporcional?

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2. Defina con sus palabras que es un control Integral?

3. Defina con sus palabras que es un control Derivativo?

4. Cuáles son las constantes de control y para qué sirven?

5. Explique con sus palabras en que consiste la Sintonización por la ganancia critica en lazo cerrado?

V. ACTIVIDADES

Para los ejercicios propuestos a continuación

- Desarrolle la solución

1. Se sintonizara por el método de la ganancia crítica en lazo cerrado por lo cual reduciremos al mínimo la acción derivativa y la acción integral del regulador PID.

		Us	Address	Symbol	Current	Retained	Format
1		☑	%MW10		6025	0	Decimal
2		☑	%MW11		0	0	Decimal
3		☑	%MW12		0	0	Decimal
4		☑	%MW13		0	0	Decimal
5		☑	%MW16		0	0	Decimal
6		☑	%MW17		0	0	Decimal
7		☑	%MW18		0	0	Decimal
8							

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2. Luego iremos aumentando poco a poco la ganancia proporcional

Kp con 4000

2	☑	%MW11		4000	0	Decimal

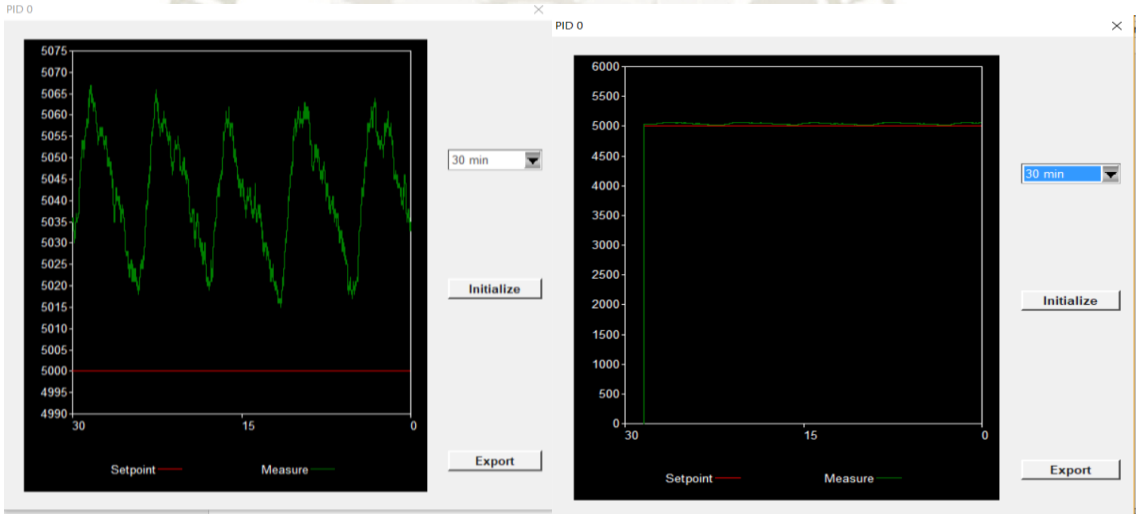
Kp con 6000

1	☑	%MW10		6000	0	Decimal

Kp con 8000

2	☑	%MW11		8000	0	Decimal

3. Una vez que el valor de Kp haga una oscilación estable y mantenida se debe de mantener ese valor Kp=8000



4. Luego que obtenemos la salida oscilando constantemente procedemos a hallar la constante de tiempo para poder conseguir los parámetros de sintonización:

Nuestra constante de tiempo en este caso seria 2.7 minutos

Aplicamos las fórmulas para hallar los parámetros:

	Kp	Ti	Td
P	0.50*Kc		
PI	0.45*Kc	0.83*Tc	
PID	0.59*Kc	0.50*Tc	0.125*Tc

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Kc = 8000 Tc = 2.7 minutos

Hallamos Kp

Kp = 0.59*Kc

Kp = 4720

Hallamos Ti

Ti = 0.50*Tc

Ti = 0.50*2.7 = 1.35 minutos

Ahora convertimos el Ti de minutos a segundos:

Ti = 1.35*60 = 81 segundos

Por último es necesario ingresar este dato al programa Twido por ende lo convertimos a su lenguaje

Ti = 81*10 = 810

Hallamos Td

Td = 0.125*Tc

Td = 0.125*2.7 = 0.33 minutos

Ahora convertimos el Td de minutos a segundos:

Td = 0.33*60 = 19.8 segundos

Por último es necesario ingresar este dato al programa twido por ende lo convertimos a su lenguaje

Td = 19.8*10 = 198

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

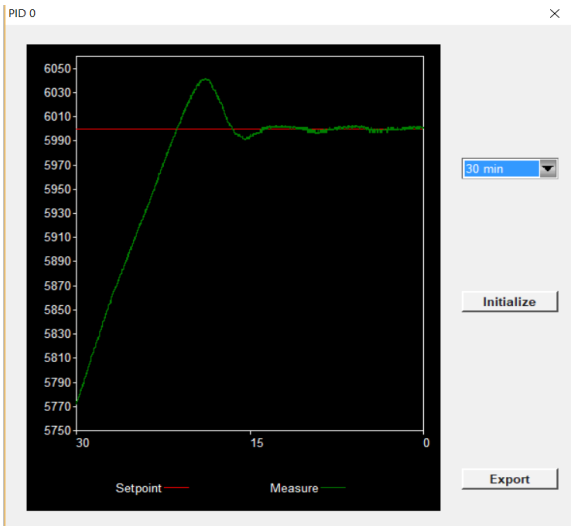
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

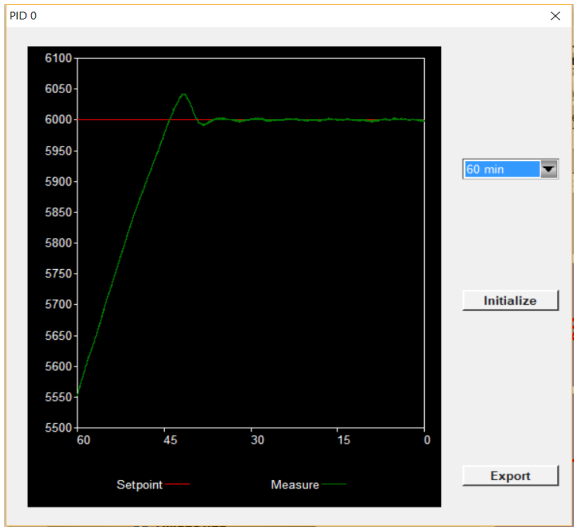
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

5. Ingresamos los valores al twido y corremos el programa

5	☑	%MW16		5000	0	Decimal
6	☑	%MW17		810	0	Decimal
7	☑	%MW18		198	0	Decimal

6. Obtenemos nuestras graficas del proceso:





VI. CONCLUSIONES

Emita al menos 5 conclusiones alrededor de la obtención de los parámetros de sintonización para un control PI

VII. CUESTIONARIO/EJERCICIOS

1. Es posible hallar en este proceso los parámetros de sintonización para un Kp=5000? Porque?

2. Explique brevemente los otros métodos de diseño y sintonización de controladores?

3. Al agregarse una perturbación al proceso como cree que reaccionara el controlador?

4. Nombre algunas diferencias entre un control PI vs un control PID.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ANEXO 5. MANUAL DE OPERACIÓN DE CALDERA

1. Conectar enchufe a corriente 220 VAC.
2. Energizar el tablero de control de caldera con llave termo magnética



3. Verificar que PLC se encienda.



4. Abrir mínimamente válvula manual de paso de gas natural (solo abrir un 5% la válvula, es suficiente para alimentar a la caldera y tenga un óptimo proceso).





5. Verificar que válvula manual de alimentación de agua que ingresa al economizador de energía solar (terma solar) esté abierta.



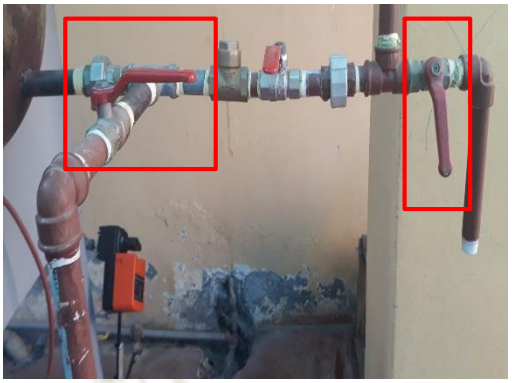


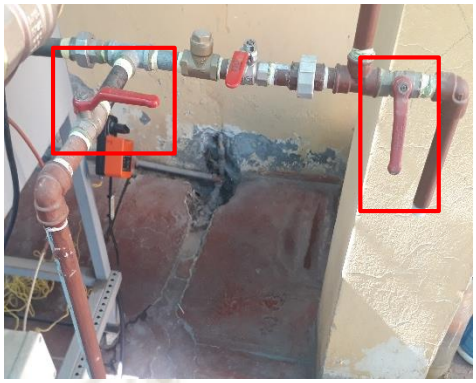
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

6. Verificar que las válvulas manuales tanto de purga de agua del economizador como de purga de agua de la caldera estén cerradas.





7. Colocar la manguera de salida de vapor en un balde o recipiente.



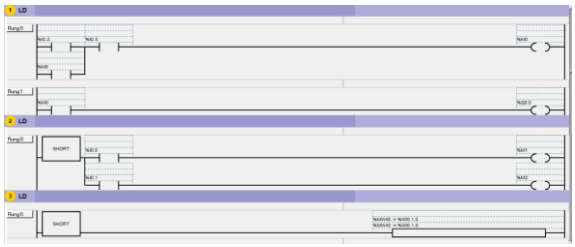


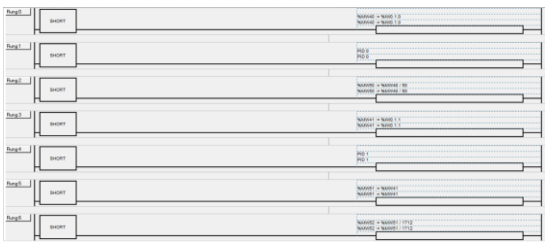
8. Conectar cable de programación tanto en PLC como en la PC.





9. Crear o abrir el programa final para el funcionamiento del proceso.





10. Traspasar o descargar programa de PC a PLC.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

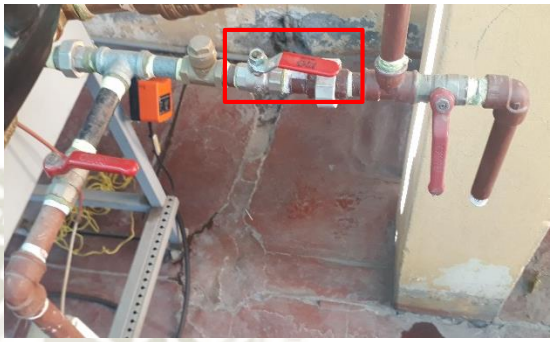
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

11. Colocar los parámetros de sintonización para el proceso.

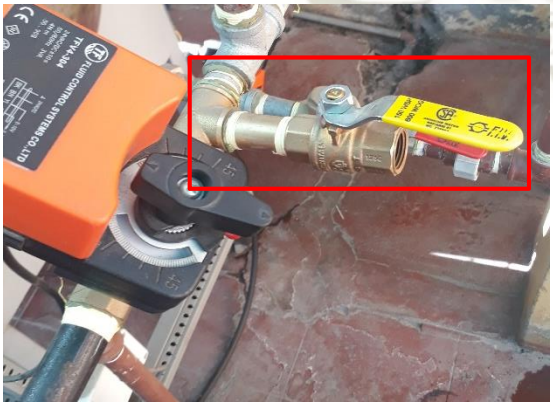
	Us	Address	Symbol	Current	Retained	Format
1	☑	%MW10		6025	0	Decimal
2	☑	%MW11		3603	0	Decimal
3	☑	%MW12		1350	0	Decimal
4	☑	%MW13		0	0	Decimal
5	☑	%MW16		5000	0	Decimal
6	☑	%MW17		810	0	Decimal
7	☑	%MW18		198	0	Decimal

12. Abrir válvula manual para ingresar agua pre-calentada a la caldera.





13. Mientras ingrese agua pre-calentada se debe monitorear las entradas de sensores de nivel bajo (%I0.0) y alto (%I0.1) en el PLC, una vez que el nivel de agua haga contacto con el sensor de nivel alto, este se confirmara activándose la entrada %I0.1. Cerrar la válvula manual de ingreso de agua pre-calentada.
14. Abrir válvula manual de purga de presión por 10 segundos para empezar el proceso en condiciones iniciales (al ingresar agua pre calentada se genera un poco de presión, se recomienda purgar esta presión antes de iniciar el proceso). Luego de 10 segundos cerrar válvula manual.





15. En el programa TWIDO SUITE una vez conectado el cable de programación, descargado el programa al PLC y agregado los parámetros de sintonización se presionara el botón RUN en la pantalla del programa (el programa empezara su control, la electroválvula de paso de gas de estar completamente cerrado 0%

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

empezara a abrirse lentamente según el programa le indique dejando pasar el gas a la hoguera).



16. Inmediatamente después de presionar el botón RUN en el programa, iremos al tablero de control y presionaremos la botonera verde (START) el cual activara el chispero y la entrada %I0.2 en el PLC.



17. En combinación al dejar pasar gas por la electroválvula, activar el chispero y hacer contacto con el oxígeno se producirá la llama que calentara el caldero.



18. Una vez creada la llama es opcional si se detiene la activación del chispero, presionar la botonera roja (STOP). En el caso que se detenga el chispero se debe estar pendiente de la llama que calienta la caldera, al llegar al setpoint es posible que el programa le indique a la electroválvula que cierre todo el paso del gas por lo que se perderá la llama, el programa al ver que no tiene fuego que caliente la caldera y perder tanto temperatura como presión ordenará abrir nuevamente la válvula por lo cual debería hacer contacto otra vez el gas con el chispero por lo que debería de presionarse nuevamente el botón START y así sucesivamente.
19. Dejar que el proceso haga su trabajo visualizando la gráfica de nuestras variables.
20. Una vez llegado al setpoint tener cuidado de tocar la caldera ya que estará muy caliente (120°C) por lo cual se recomienda no tocar el caldero.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

21. Una vez que ya obtuvimos nuestros resultados y queremos terminar y apagar el sistema se hará lo siguiente:
22. Presionar el botón STOP que se encuentra en nuestra pantalla del programa TWIDO SUITE en la PC, esto hará que todo el programa se detenga por lo que al detenerse la electroválvula que deja pasar el gas se cerrara automáticamente evitando algún contacto del combustible con el chispero.



23. Al apagar la llama igual seguirá saliendo vapor constantemente, si se desea eliminar el vapor o la presión más rápido se tendrá que abrir lentamente la válvula manual de purga de presión. Si se abre la válvula más del 20% (recomendable usar tapones de oído).



24. Para eliminar el agua caliente que quedo en la caldera se deberá de abrir la válvula de purga del caldero, tener un balde o recipiente resistente al agua caliente y tener cuidado de algún contacto con este líquido ya que expulsara agua a 120℃.



25. Por ultimo solo se tendrá que desconectar la PC del PLC en la opción DESCONECTAR del programa y luego cerraremos el programa TWIDO SUITE.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

IMPORTANTE

En este proyecto existen algunos riesgos que deben de ser tomados en cuenta antes de poner en funcionamiento el módulo de entrenamiento los cuales se detallan:

a) Solo debe de abrirse para comenzar un 5% la válvula manual del paso de gas natural, esta apertura es suficiente para alimentar con efectividad el caldero, si se abre más de lo indicado va a salir más gas del permitido en la hoguera por lo cual se va a desperdiciar gas o algo mucho peor va a haber fuga de gas al exterior de la hoguera poniendo en peligro a las personas que estén manipulando el modulo.
b) Mientras el modulo este en pleno calentamiento no se debe de tocar el caldero, los tubos de salida de vapor ni la tubería de entrada de agua a la caldera ya que este estará caliente por la temperatura deseada en este caso 120℃ y producir quemaduras a las personas que tengan contacto directo con estos.
c) Al momento de realizar mantenimiento al módulo verificar que las tuberías estén bien enroscadas ya que podría haber fuga de presión y dañar a la persona que esté manipulando el modulo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ANEXO 6. GASTOS DE CONSTRUCCIÓN DE CALDERA

A continuación se detallara el costo de cada componente que se usó para crear el módulo de entrenamiento de la caldera

GASTOTOS DE COSTRUCCION DE MODULO DE CALDERIN					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNIT	COSTO FINAL
1	ESTRUCTURA PARA SOPORTE DE CALDERIN	UNIDAD	1	120	120
2	CONFECCION DE CALDERA	UNIDAD	1	250	250
3	TERMA SOLAR	UNIDAD	1	1000	1000
4	TUBERIA METALICA DE 1/2"	UNIDAD	2	80	160
5	TUBERIAS Y CONEXIONES PVC HIDRO 1/2"	UNIDAD	3	40	120
6	VALVULAS MANUALES	UNIDAD	6	25	150
7	VALVULA DE SEGURIDAD	UNIDAD	1	30	30
8	NIPLES Y ACOPLES DE METAL	UNIDAD	6	7	42
9	CANALETA DE CABLEADO	UNIDAD	1	30	30
10	CHISPERO DE ENCENDIDO	UNIDAD	1	20	20
11	CAJA DE PASO	UNIDAD	1	5	5
12	QUEMADOR Y CONEXIONES	UNIDAD	1	20	20
13	TUBERIAS Y ACCESORIOS DE BRONCE	UNIDAD	1	60	60
14	GABINETE	UNIDAD	1	140	140
15	SENSOR DE NIVEL	UNIDAD	2	40	80
16	SENSOR DE PRESION	UNIDAD	1	350	350
17	RTD	UNIDAD	1	50	50
18	PT 100	UNIDAD	1	30	30
19	VALVULAS PROPORCIONALES	UNIDAD	2	500	1000
20	CABLE # 16	M	50	4	200
21	CONTACTORES	UNIDAD	3	15	45
22	LLAVE DIFERNCIAL	UNIDAD	1	35	35
23	FUENTE DE PODER	UNIDAD	1	60	60
24	PLC TWIDO	UNIDAD	1	1600	1600
25	MODULO DE AMPLIACION ANALOGICA	UNIDAD	2	900	1800
26	BORNERAS DE POTENCIA	UNIDAD	2	10	20
27	BORNERAS DE CONTROL	UNIDAD	17	7	119
28	CABLEA TIERRA	M	10	8	80
29	BOTONERAS	UNIDAD	2	9	18
30	ALIMENTACION DE GAS	UNIDAD	1	70	70
31	MANGUERAS A PRESION	UNIDAD	1	40	40
32	VALVULA REGULADORA DE GAS	UNIDAD	1	30	30
33	MANO DE OBRA	UNIDAD	1	4500	4500
34	*SOFTWARE	UNIDAD	1	0	0
			TOTAL	10085	12274

*Es preciso resaltar que el SOFTWARE usado TWIDO SUITE para su descarga e instalación es totalmente gratuito por lo cual no generó gasto en la implementación de la caldera.

Como se puede apreciar en la lista de materiales se gastó un aproximado de 12 274 (doce mil doscientos setenta y cuatro) soles en el armado, componentes, materiales, instrumentos, mano de obra, etc. Para la creación de la caldera.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis