

**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y**  
**Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica**



**AUTOMATIZACIÓN DE UNA SUBESTACION DE TRANSFORMADORES  
SECOS ENCAPSULADOS E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO  
DE PRUEBA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA Y  
PROTECCIÓN EN APLICACIONES DE CENTRALES  
ELECTRICAS FOTOVOLTAICAS  
T - SOLAR AREQUIPA**

**Tesis Presentada por el Bachiller:**  
Montes Quispe, Jorge Richard

Para optar el Título Profesional de:  
**Ingeniero Electrónico**

**Asesor:**  
Ing. Copa Pineda, Juan Carlos

**Arequipa – Perú**  
**2018**

UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA  
URB. SAN JOSE S/N - UMACOLLO



**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS**

Los que suscriben:

Ing. Raul Sullá Torres  
Ing. Juan Copa Pineda

Jurado Dictaminador del Borrador de Tesis titulado:

Automatización de una subestación de transformadores secos encapsulados e implementación de un prototipo de prueba para el control de temperatura y protección en aplicaciones de convertidores eléctricos fotovoltaicos - T solar Arequipa  
Nombrados con Decreto N°: 002-DEPIE-2018, de fecha: 20 Marzo 2018

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

1. Montes Quispe, Jorge Richard
2. \_\_\_\_\_

cumple con emitir su dictamen:

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

Arequipa, 22 marzo 2018

R. Sullá  
Ing. Raul Sullá Torres  
Código Nro.: 1707

J. Copa  
ING. JUAN CARLOS COPA P.  
Código Nro.: 1886

## PRESENTACIÓN

Señores:

Sr. Decano de la facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y formales de la Universidad Católica de Santa María.

Sr. Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Católica de Santa María.

Miembros del Jurado.

Habiendo cumplido con el reglamento de Grados y Títulos de la Universidad, pongo a vuestra disposición la presente Tesis, que tiene como título: “AUTOMATIZACIÓN DE UNA SUBESTACION DE TRANSFORMADORES SECOS ENCAPSULADOS E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PRUEBA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA Y PROTECCIÓN EN APLICACIONES DE CENTRALES ELECTRICAS FOTOVOLTAICAS T-SOLAR AREQUIPA”,

Para optar el título de Ingeniero Electrónico.

Espero que el presente trabajo de investigación logre cubrir las expectativas y exigencias académicas requeridas para su aprobación.

*Dedicatoria:*

*A mi hermano que siempre me apoyó en cada paso que he dado y sobre todo a mi madre por su inmenso amor incondicional ya que ella es pieza importante en mi vida.*

*A mi padre y hermana que me apoyaron a dar este paso importante en vida profesional.*

*A Dios que me da vida para seguir dando lo mejor de mí para alcanzar mis metas.*

*A mi persona que siempre creeré en mí para seguir luchando por mis sueños.*

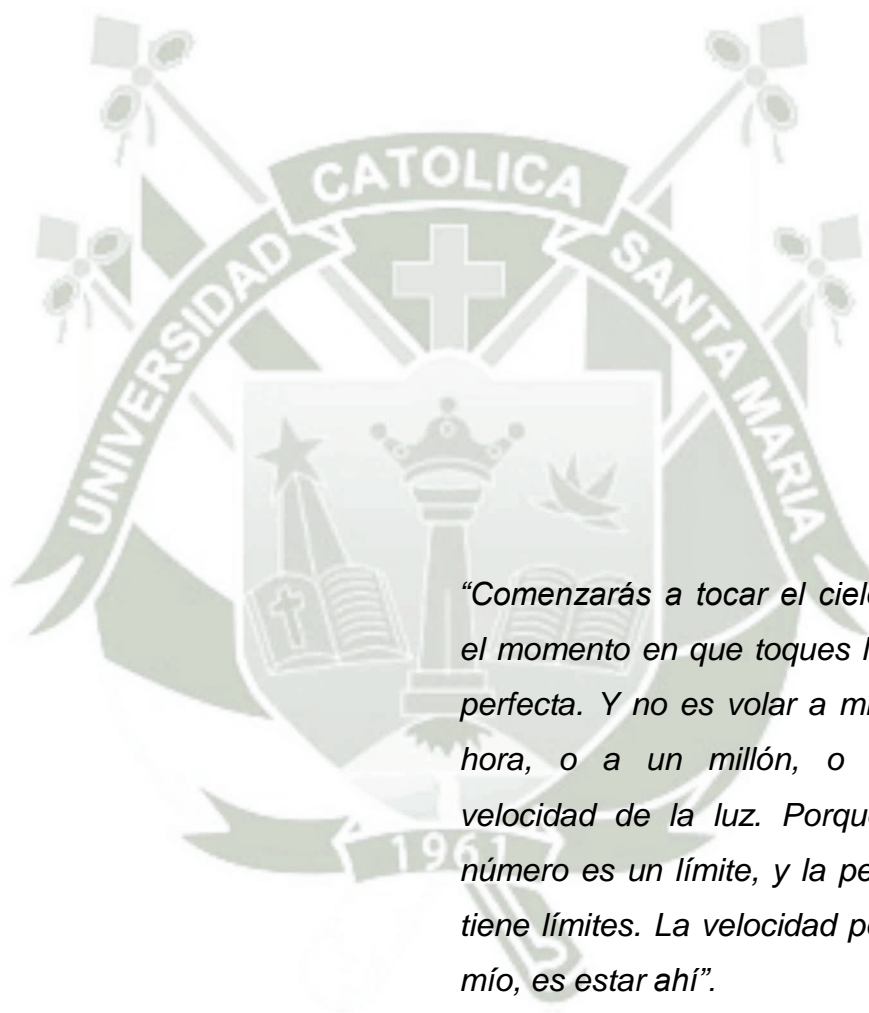
*Jorge Richard Montes Quispe*

*Mi más sincera gratitud:*

*A mi hermano y madre por su incondicional apoyo que ha permitido alcanzar esta meta, ya que me llena de satisfacción como profesional.*

*Al Ingeniero Juan Carlos Copa Pineda por su paciencia y desinteresado apoyo.*





*“Comenzarás a tocar el cielo, Juan, en el momento en que toques la velocidad perfecta. Y no es volar a mil millas por hora, o a un millón, o volar a la velocidad de la luz. Porque cualquier número es un límite, y la perfección no tiene límites. La velocidad perfecta, hijo mío, es estar ahí”.*

*Fragmento del libro Juan Salvador Gaviota*

## CONTENIDO GENERAL

**RESUMEN**

**ABSTRACT**

**INTRODUCCIÓN**

### **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO ..... 1**

1.1	Antecedentes .....	2
1.2	Descripción del Problema .....	2
1.3	Objetivos .....	2
1.3.1	Objetivo general.....	2
1.3.2	Objetivo específico .....	3
1.4	Hipótesis .....	3
1.4.1	Hipótesis específica .....	3
1.4.2	Hipótesis secundaria.....	4
1.5	Justificación de la investigación.....	4
1.6	Alcances de la investigación.....	4
1.7	Variables e Indicadores .....	4
1.7.1	Variable independiente.....	4
1.7.2	Variable dependiente .....	5
1.8	Técnicas e Instrumentos a utilizar .....	6
1.9	Campo de verificación .....	8
1.10	Estrategia.....	8

### **CAPÍTULO II: MARCO TEORICO ..... 10**

2.1	La energía solar .....	11
2.2	¿Qué es el control de procesos? .....	12
2.3	Control en Cascada .....	12
2.3.1	Concepto de control en cascada: .....	12
2.3.2	Estructura .....	12
2.3.3	Sistema de control cascada en serie .....	13

2.3.4	Ventajas del control en cascada .....	14
2.3.5	Limitaciones de aplicación del control en cascada .....	15
2.4	¿Por qué la utilización de un sistema de Control Cascada para mi proceso? .....	15
2.5	Control Proporcional Integrativo Derivativo .....	15
2.6	Sistema SCADA .....	18
2.6.1	Aplicaciones SCADA .....	18
2.6.2	Filosofía Operacional .....	19
2.6.3	Esquema básico conceptual de un sistema SCADA .....	20
2.6.4	Requisitos de un SCADA .....	21
2.6.5	Red de comunicación .....	21
2.6.6	Instrumentos de Campo .....	22
2.7	Sistema de protección y monitoreo .....	22
2.7.1	Sistema de Protección .....	22
2.7.2	Protecciones y control de transformadores encapsulados .....	23
2.8	Transformadores secos encapsulados .....	23
2.8.1	¿Qué se entiende por el ensayo en vacío? .....	25
2.8.2	¿Por qué realizamos el ensayo de cortocircuito? .....	26
2.9	El efecto Joule .....	26
2.9.1	¿Qué es la energía y el calor? .....	26
2.10	Ley de Gay Lussac .....	29
2.11	Principio de Venturi .....	30
2.12	Presión negativa .....	30
<b>CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....</b>		<b>31</b>
3.1	Instalación de la central FV conectada a la red .....	32
3.2	Ubicación Geográfica .....	32
3.3	Lazo de control de temperatura .....	35
3.4	Central T-154 .....	35
3.5	Conexión eléctrica del controlador de temperatura T154 .....	37
3.6	Transformador trifásico en seco encapsulado 1400KVA .....	38
3.7	Descripción del container .....	41

3.8	Rejillas.....	42
3.9	Ventilador.....	43
3.10	Panel sándwich.....	45
3.11	Compartimento inversores.....	46
3.12	Inversores.....	47
3.13	Descripción celdas media tensión.....	48
3.14	Diseño de celdas individuales y de bloques de celdas.....	49
3.15	Sistema de embarrado.....	50
3.16	Celdas de media tensión.....	50
3.17	Características celda de protección de transformador.....	52

**CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN Y DISEÑO DEL PROTOTIPO ..... 53**

4.1	Ensayos de pérdidas de potencia del transformador trifásico de prueba.....	54
4.1.1	Criterios de ejecución:.....	54
4.1.2	Datos recogidos en placa:.....	55
4.1.3	Ensayo en vacío.....	55
4.1.4	Ensayo en cortocircuito.....	60
4.2	Cálculos del circuito equivalente.....	64
4.3	Determinación de los paráme. del circuito equivalente referidos al primario. .	64
4.4	Calculo de la perdida de potencia con carga a 75°C:.....	69
4.5	Cálculos con cargas equilibradas:.....	72
4.6	Ventilación.....	75
4.6.1	Compartimento del transformador.....	75
4.6.2	Caudal de aire necesario.....	75
4.6.3	Sección mínima de la rejilla.....	76
4.6.4	Elección ventilador.....	77
4.6.5	Diseño del compartimiento de transformación.....	79
4.7	Equipamiento.....	80
4.7.1	Controlador Lógico Programable.....	80
4.7.1.1	Introducción.....	80
4.7.1.2	PLC: MicroLogix™ 1100/1763.....	81

4.7.1.2.1	Puerto de comunicación industrial.....	81
4.7.1.2.2	Características clave.....	81
4.7.1.2.3	Característica Semimodular. ....	84
4.7.1.2.4	Entradas analógicas: MicroLogix™ 1100/L16BWD .....	84
4.7.2	Compact Power Supply: 1606-XLP30E .....	85
4.7.3	Módulo de Salidas Digitales: 1762-OB8 .....	85
4.7.4	Módulo de Entradas Analógicas: 1762-IF4 .....	86
4.7.4.1	Selección del tipo de entrada .....	86
4.7.4.2	Disposición del bloque de terminales.....	87
4.7.4.3	Tipos de transmisores de detectores diferenciales.....	88
4.7.5	Cable Adaptador USB a Serie RS232 .....	88
4.7.6	Relay de Estado Solido 25A / 380V (3 – 32VDC) .....	90
4.7.7	Led Blink Power Supply: A – 15W – 5 .....	91
4.8	BOOTP/DHCP Server .....	92
4.9	Configuración del PLC MicroLogix 1100 para su programación .....	99
4.10	Configuración de módulos expansores.....	101
4.11	Código de control Ladder en RSlogix500.....	104
4.12	Sistema de supervisión y SCADA .....	116
4.13	Instrucciones de Operación del Prototipo.....	123
4.14	Sintonizador de lazo PID (RSTune) .....	125

**CAPÍTULO V: SISTEMA DE CONTROL..... 129**

5.1	Control de Procesos .....	130
5.1.1	Definiciones Previas de acciones: .....	130
5.1.2	Estrategia para la mejora de procesos .....	131
5.1.3	Pasos antes de sintonizar un Lazo de Control: .....	132
5.1.3.1	Conocer el objetivo de control del Proceso.....	132
5.1.3.2	Conocer las necesidades Operacionales .....	132
5.1.3.3	Identificar las causas reales del problema (lazo, instrumentación, etc.)	132
5.1.3.4	Conocer los peligros/ riesgos del sistema y proceso.....	133
5.1.3.5	Conocer mi proceso: obtener el modelo matemático .....	133

5.2	Control Cascada.....	133
5.2.1	Estructura .....	133
5.2.2	Control PID discreto .....	134
5.2.2.1	Introducción.....	134
5.2.2.2	Estudios de los sistemas a controlar:.....	135
5.2.2.3	Diseño de controladores tipo PID por las reglas de Ziegler - Nichols.....	136
5.2.2.4	Instrucción Proporcional Integral Derivativa (PID) .....	142

**CAPÍTULO VI: INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL..... 145**

6.1	Modelamiento.....	146
6.1.1	Introducción.....	146
6.1.2	Materiales y métodos.....	146
6.1.3	Dinámica de una cabina de transformación .....	146
6.1.4	Determinación de funciones .....	147
6.2	Transmisores .....	152
6.2.1	Transmisor de Temperatura, Modelo: REG48PUN1JHU .....	152
6.3	Implementación de un transductor de Velocidad (Encoder).....	153
6.4	Termocupla tipo J.....	153
6.4.1	Introducción.....	153
6.4.2	Tipos.....	153
6.5	Sensor óptico reflexivo: CNY70 .....	155
6.6	Sensor de corriente alterna: SCT-013 .....	155
6.7	Diseño del circuito acondicionador del sensor de Corriente .....	156
6.8	Diseño del circuito acondicionador del sensor de Velocidad .....	159
6.9	Configuración y definición del Módulo de entradas Analógica: 1762-IF4 .....	160
6.10	Instrucción para Escalamiento .....	162
6.10.1	Introducción.....	162
6.10.2	Escalamiento para el sensado de temperatura.....	162
6.10.3	Cálculo de la ecuación canónica de la recta de temperatura.....	163
6.10.4	Escalamiento para el sensado de Revoluciones por Minuto.....	164
6.10.5	Cálculo de la ecuación canónica de la recta de RPM .....	165

6.10.6	Escalamiento para el sensado de corriente de 1 Amperio .....	165
6.10.7	Cálculo de la ecuación canónica de la recta para 1 Amperio .....	166
6.10.8	Escalamiento para el sensado de corriente de 10 Amperios.....	167
6.10.9	Cálculo de la ecuación canónica de la recta para 10 Amperio .....	168
6.11	Nuevo lazo de control de temperatura.....	168

## **CAPÍTULO VII: INTERPRETA., ANÁLISIS DE PRUEBAS Y RESULTADOS .. 170**

7.1	Introducción.....	171
7.2	Pruebas de temperatura y velocidad.....	171
7.2.1	Interpretación y análisis de las pruebas.....	171
7.3	Pruebas de sobre corriente.....	173
7.3.1	Interpretación y análisis de las pruebas de sobre corriente .....	173

<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>175</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>178</b>
<b>COSTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>179</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>181</b>
<b>DEFINICIONES.....</b>	<b>184</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES DE PAGINAS WEB .....</b>	<b>190</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>195</b>

## LISTA DE FIGURAS

### INTRODUCCION

Figura 1 Mapa de Irradiación solar en Latinoamérica y el Caribe

Figura 2 Elementos que componen una central fotovoltaica

### CAPÍTULO II:

Figura 2.3.2.1.1 Estructura del control en cascada ..... 13

Figura 2.3.3.1.1 Sistema de control cascada en Serie ..... 14

Figura 2.5.1.1 Sistema realimentado empleando un controlador PID ..... 17

Figura 2.6.3.1.1 Sistema de adquisición, supervisión y control..... 20

Figura 2.8.1.1 Transformador seco trifásico ..... 24

Figura 2.9.1.1.1 Colisión de las partículas y liberación de energía calorífica ..... 26

Figura 2.9.1.1.2 Equilibrio de energía en un sistema de generación eléctrica ..... 29

### CAPÍTULO III:

Figura 3.1.1.1 Esquema conceptual de una central de generación ..... 32

Figura 3.2.1.1 Vista superior geográfica P.F.V- La joya ..... 33

Figura 3.2.1.2 Vista lateral geográfica P.F.V- La joya ..... 33

Figura 3.2.1.3 Vista superior geográfica P.F.V- Majes ..... 34

Figura 3.2.1.4 Vista lateral geográfica P.F.V- Majes ..... 34

Figura 3.3.1.1 Elementos que componen una cabina de transformación ..... 35

Figura 3.4.1.1 Central digital de control de temperaturas Modelo T-154 ..... 36

Figura 3.4.1.2 Sonda PT100 ..... 36

Figura 3.5.1.1 Elementos que componen el controlador de temperatura T-154 ... 37

Figura 3.6.1.1 Elementos que interactúan con uno de los transfo. en seco ..... 40

Figura 3.7.1.1 Contenedor metálico ..... 42

Figura 3.9.1.1 Curva de operación del ventilador de hélice de aluminio ..... 44

Figura 3.9.1.2 Dimensiones del ventilador de hélice de aluminio..... 44

Figura 3.11.1.1 Inversor GPTEch ..... 46

Figura 3.13.1.1 Contenedor Tipo Normal..... 48

Figura 3.13.1.2 Contenedor Tipo Cierre de Anillo .....	49
Figura 3.16.1.1 Celdas de media tensión.....	51
Figura 3.16.1.2 Dimensiones de las celdas de media tensión. ....	51
Figura 3.17.1.1 Características de las celdas de media tensión .....	52

#### **CAPÍTULO IV:**

Figura 4.1.1.1.1 Transformador seco trifásico de prueba.....	54
Figura 4.1.2.1.1 Datos de placa del transformador trifásico de prueba .....	55
Figura 4.1.3.1.1 Circuito equivalente del transformador para ensayo en vacío .....	57
Figura 4.1.3.1.2 Componentes vectoriales de la tensión en fase.....	58
Figura 4.1.3.1.3 Cálculo de voltaje de las pérdidas parasitas .....	59
Figura 4.1.3.1.4 Cálculo de la corriente del lado primario del transformador .....	60
Figura 4.1.4.1.1 Circuito equivalente del trasfo. para ensayo de cortocircuito .....	61
Figura 4.1.4.1.2 Triangulo vectorial para el cálculo de $\phi$ .....	62
Figura 4.3.1.1 Circuito equivalente monofásico del transformador de potencia. ...	68
Figura 4.4.1.1 Temperatura versus el tiempo sometida a una carga de prueba ...	70
Figura 4.5.1.1 Circuito equivalente con respecto a una carga .....	73
Figura 4.6.4.1.1 Especificaciones técnicas del ventilador FP-108D/DC.....	77
Figura 4.6.4.1.2 Desempeño del ventilador .....	78
Figura 4.6.4.1.3 Dimensionamiento del ventilador de prueba .....	79
Figura 4.6.5.1.1 Cabina de transformación .....	80
Figura 4.7.1.2.2.1.1 MicroLogix™ 1100 .....	82
Figura 4.7.1.2.2.1.2 Especificaciones técnicas del MicroLogix™ 1100.....	83
Figura 4.7.1.2.3.1.1 MicroLogix™ 1100 y sus módulos expansores .....	84
Figura 4.7.4.1.1 Módulo de Entradas Analógicas.....	86
Figura 4.7.4.1.1.1 Configuración del módulo de entradas analógicas 1762-IF4 ...	87
Figura 4.7.4.2.1.1 Distribución del bloque de terminales del módulo 1762-IF4.....	87
Figura 4.7.4.3.1.1 Distri. y colocación de un sensor analógico en el 1762-IF4 .....	88
Figura 4.7.5.1.1 Convertidor de USB a serial RS232.....	89
Figura 4.7.6.1.1 Relé de estado sólido (SSR – 25 DA) .....	91
Figura 4.7.7.1.1 Fuente de poder de 5V DC – 3A – 15W.....	92

Figura 4.8.1.1 Ventana de Inicio de Windows XP .....	93
Figura 4.8.1.2 Conexiones de red del panel de control.....	93
Figura 4.8.1.3 Propiedades de Protocolo de Internet (TCP/IP).....	94
Figura 4.8.1.4 Ventana de Inicio de Windows XP .....	95
Figura 4.8.1.5 Configuración y asignación de IP al MicroLogix 1100.....	95
Figura 4.8.1.6 Dirección MAC del MicroLogix 1100 .....	96
Figura 4.8.1.7 Asignación de una dirección IP al MicroLogix 1100 .....	96
Figura 4.8.1.8 Asignación de una dirección IP al MicroLogix 1100 .....	97
Figura 4.8.1.9 Añadir un nuevo controlador de RSLinx.....	97
Figura 4.8.1.10 Configuración de un dispositivo RS-232 DF1 .....	98
Figura 4.8.1.11 Auto. utilizando protocolo de comunicación RS-232 .....	98
Figura 4.8.1.12 RSLinx con el dri. confi. y habi. del mód. Se. del PLC ML1100 ...	99
Figura 4.9.1.1 Proto.de comunicación entre MicroLogix 1100 y el ordenador .....	99
Figura 4.9.1.2 Selección del tipo de procesador para el MicroLogix 1100 .....	100
Figura 4.9.1.3 Selección del driver para el MicroLogix 1100.....	100
Figura 4.9.1.4 Entorno de programación para el MicroLogix 1100.....	101
Figura 4.10.1.1 Configuración de entradas y salidas .....	101
Figura 4.10.1.2 Configuración de driver del módulo expensor requerido.....	102
Figura 4.10.1.3 Módu externos y controlador lógico programable habilitados ....	102
Figura 4.10.1.4 Entradas analógicas del módulo externo habilitado .....	103
Figura 4.10.1.5 Salidas digitales del módulo externo habilitado .....	103

## CAPÍTULO V:

Figura 5.1.2.1.1 Diagrama de bloques para la mejora del proceso.....	131
Figura 5.2.1.1.1 Estructura para la implementación del Control en Cascada ....	134
Figura 5.2.2.2.1.1 Curva de tempe. de trabajo del transformador de prueba.....	135
Figura 5.2.2.2.1.2 Curva de arranque del motor DC .....	136
Figura 5.2.2.3.1.1 Caracte. de la respu. Tempo. de un siste. de primer orden ...	137
Figura 5.2.2.3.1.2 Car.. de la respu. Tempo. de un siste. de segundo orden .....	139
Figura 5.2.2.3.1.1 Caracte. de la respu. Tempo. de un siste. de primer orden ...	137
Figura 5.2.2.3.1.2 Caracte. de la respu. temporal de un siste. de segu. orden...	139

Figura 5.2.2.4.1.1 Configu. de bloque de control de temperatura (maestro).....	144
Figura 5.2.2.4.1.2 Configu. de bloque de control de velocidad (esclavo).....	144

## **CAPÍTULO VI:**

Figura 6.2.1.1.1 Controlador de temperatura Zelio - REG48PUN1JHU .....	152
Figura 6.4.2.1.1 Termocupla tipo J.....	153
Figura 6.5.1.1 Elementos del sensor óptico CNY70.....	155
Figura 6.6.1.1 Características técnicas de los modelos SCT – 013.....	156
Figura 6.7.1.1 Circuito acondicionador de señal de corriente de 1A y 10A.....	158
Figura 6.7.1.2 Placa de fibra de vidrio de los circuitos de acondi. de corriente...	158
Figura 6.8.1.1 Diag. eléc. del circu. acondi. de señal para el sensor de velo.....	159
Figura 6.8.1.2 Placa de fibra de vidrio.....	160
Figura 6.9.1.1 Definición de una de las entradas analógicas.....	160
Figura 6.9.1.2 Definición de la serie para el MicroLogix 1100.....	161
Figura 6.9.1.3 Ventana para la confi. de un canal analó. del módu. 1762-IF4 ....	161
Figura 6.9.1.4 Configuración de un canal analógico del módulo 1762-IF4 .....	162
Figura 6.10.2.1.1 Ecuación de la recta par el escalamiento de temperatura .....	163
Figura 6.11.1.1 Nuevo lazo de control de tempe. para una sola C.T.....	169

## **CAPÍTULO VII:**

Figura 7.2.1.1.1 Respuesta de temperatura utilizando Control Cascada .....	172
Figura 7.2.1.1.2 Respuesta de la velocidad utilizando Control Cascada .....	172
Figura 7.4.1.1.1 Comportamiento de la carga respecto al tiempo.....	174

## LISTA DE TABLAS

### CAPÍTULO III:

Tabla 3.6.1 Caracte. generales del trasfo. Trifá. en seco encap. 1400KVA.....	39
Tabla 3.7.1 Dimensiones del container metálico.....	41

### CAPÍTULO IV:

Tabla 4.1.2.1 Datos de placa del transformador trifásico de prueba .....	55
Tabla 4.1.3.1 Datos experimentales del ensayo en vacío .....	56
Tabla 4.1.4.1 Datos experimentales del ensayo en cortocircuito .....	60
Tabla 4.11.1 Elementos del programa LADDER.....	116

### CAPÍTULO V:

Tabla 5.2.2.3.1 Tiempos de retraso - Ziegler – Nichols.....	137
Tabla 5.2.2.3.2 Regla heurística .....	138
Tabla 5.2.2.3.3 Regla heurística .....	140
Tabla 5.2.2.3.4 Composición de la ecuación matemática en el dominio de S ....	141
Tabla 5.2.2.4.1 Características del Bloque de funciones PID .....	142
Tabla 5.2.2.4.2 Rango de consta. de ganancias del Bloque de funciones PID...	143

### CAPÍTULO VI:

Tabla 6.4.2.1 Tipos de termocuplas existentes .....	154
Tabla 6.10.2.1 Escalamiento del sensado de temperatura .....	162
Tabla 6.10.4.1 Escalamiento del sensado de velocidad .....	164
Tabla 6.10.6.1 Escalamiento del sensado de corriente de 1 Amperio .....	165
Tabla 6.10.8.1 Escalamiento del sensado de corriente de 10 Amperio .....	167

## COSTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Tabla 8.1 Elementos Utilizados para el proyecto de investigación..... 180



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación tiene como objetivo implementar un prototipo de prueba de una subestación eléctrica de media tensión que logre simular un control avanzado de temperatura y velocidad utilizando control cascada, además de su respectiva protección eléctrica.

El sistema de ventilación existente se observa perturbaciones y deficiencias que generan problemas en el estado, operación de los transformadores secos de media tensión en planta.

La técnica de control que se propone va a solucionar los problemas de sobre calentamiento de estos transformadores, el sobre consumo de energía de los ventiladores, la deficiente supervisión de la misma, una posible perturbación de la velocidad en los ventiladores y la eliminación de toda perturbación en el proceso.

Sumada a esta se diseña e implementa un prototipo donde se realizaran varias pruebas para demostrar que un control avanzado (cascada) aplicada al control de temperatura para este tipo de subestaciones es un importante beneficio para la planta.

Además se diseña e implementa un sistema de protección eléctrico para el prototipo con el propósito de cumplir con la normativa existente para este tipo de instalaciones. Se ha diseñado un dispositivo transductor electro-opto-mecánico que es utilizado para el control de velocidad y un circuito de acondicionamiento de señal para el sensado de corriente.

Este trabajo de investigación está orientado a la mejora del mantenimiento y reducción de costos de operación, toda la data producida es almacenada y monitoreada por el sistema SCADA utilizando el software RSVIEW 32 que será de ayuda para el planeamiento del mantenimiento preventivo.

El trabajo de investigación está conformada por 7 Capítulos: en el Capítulo 1, esta propuesta para el análisis del problema, se identifica las variables dependientes independientes e indicadores presentes en este trabajo de investigación. El Capítulo 2 está conformado por la teoría que nos ayuda a comprender los fenómenos físicos, leyes, conceptos que son aplicados para el desarrollo de esta investigación. En el Capítulo 3 se describe de manera global el proceso y operación de este tipo de generadoras dándonos una idea más clara de las partes, equipos relevantes que la componen, con esto sumado a lo expuesto en el Capítulo 1 muestra la importancia de la investigación. En el Capítulo 4 se desarrolla el diseño y la implementación del prototipo de prueba en donde se resalta los cálculos, el arte estructural, eléctrico e instrumental necesarios. En el Capítulo 5 se da una base teórica del control de procesos para luego aplicar una metodología de los aspectos previos para la sintonización de lazos de control para luego elegir y aplicar un método que nos permita llegar a este fin. En el Capítulo 6 se muestra el modelo matemático, los sensores utilizados, el escalamiento para cada una de ellas y la configuración de los módulos expansores del PLC. En el Capítulo 7 se muestra el análisis de los resultados de los ensayos, pruebas del prototipo de prueba.

Y finalmente las conclusiones, recomendaciones, costos de la investigación, generalidades que nos da una idea de algunos términos y definiciones que son utilizados en este tipo de instalaciones, las referencias bibliografía y enlaces web que se consultaron, anexos.

Palabras Clave: Control Cascada, Motor DC, Transformadores en Seco, Velocidad, Protección Eléctrica, Prototipo de Prueba, Temperatura, Sobrecalentamiento, Subestación Eléctrica, Generación Eléctrica Fotovoltaica.

## ABSTRACT

In this research work aims to implement a prototype test of a medium voltage electrical substation that manages to simulate an advanced control of temperature and speed using cascade control, in addition to its respective electrical protection.

The existing ventilation system is observed disturbances and deficiencies that generate problems in the state, operation of the dry transformers of medium voltage in the plant.

The control technique that is proposed will solve the problems of overheating of these transformers, the over consumption of energy of the fans, the poor supervision of the same, a possible disturbance of the speed in the fans and the elimination of any disturbance in the process.

Added to this, a prototype is designed and implemented where several tests will be carried out to demonstrate that an advanced control (cascade) applied to the temperature control for this type of substations is an important benefit for the plant.

In addition, an electrical protection system for the prototype is designed and implemented in order to comply with the existing regulations for this type of facility. An electro-opto-mechanical transducer device has been designed that is used for speed control and a signal conditioning circuit for current sensing.

This research work is aimed at improving maintenance and reducing operating costs, all the data produced is stored and monitored by the SCADA system using RSVIEW 32 software that will be of help for the planning of preventive maintenance.

The research work is made up of 7 Chapters: in Chapter 1, this proposal for the analysis of the problem identifies the independent dependent variables and indicators present in this research work. Chapter 2 is formed by the theory

that helps us to understand the physical phenomena, laws, concepts that are applied to the development of this research. Chapter 3 describes in a global way the process and operation of this type of generators giving us a clearer idea of the parts, relevant equipment that compose it, with this, added to that presented in Chapter 1 shows the importance of the investigation. In Chapter 4, the design and implementation of the test prototype is developed, where the calculations, the necessary structural, electrical and instrumental art are highlighted. In Chapter 5 a theoretical basis of process control is given to then apply a methodology of the previous aspects for the tuning of control loops to then choose and apply a method that allows us to reach this end. Chapter 6 shows the mathematical model, the sensors used, the scaling for each of them and the configuration of the PLC expansion modules. Chapter 7 shows the analysis of the results of the tests, tests of the test prototype.

And finally the conclusions, recommendations, costs of the investigation, generalities that give us an idea of some terms and definitions that are used in this type of facilities, bibliography references and web links that were consulted, annexes.

Keywords: Cascade Control, DC Motor, Dry Transformers, Speed, Electrical Protection, Test Prototype, Temperature, Overheating, Electric Substation, Photovoltaic Electric Generation.

## INTRODUCCIÓN

### Energía renovable en el Perú

En marzo del 2013, el presidente Ollanta Humala inauguró dos plantas de energía fotovoltaica en Moquegua y Tacna, que cuentan con una potencia de 40 MW y proporcionan electricidad a 70 mil hogares de la zona. Sumadas a otras dos plantas solares puestas en marcha el 2013 en Arequipa, el Perú genera una potencia total de 80 MW. El potencial para este tipo de fuente energética [1]:

En enero del 2018, se encuentra en operación la planta de generación fotovoltaica Rubí que proporciona 180 MW adicionales en el departamento de Moquegua.

En la figura 1 se muestra el mapa de irradiación en Latinoamérica y el caribe en donde muestra una idea regional del potencial de este tipo de instalaciones en el Perú y la ubicación específica en donde se tiene mayor aprovechamiento de la misma.



Figura 1 Mapa de Irradiación solar en Latinoamérica y el Caribe

Fuente: <https://fundacionsolon.org>

## Centrales Fotovoltaicas

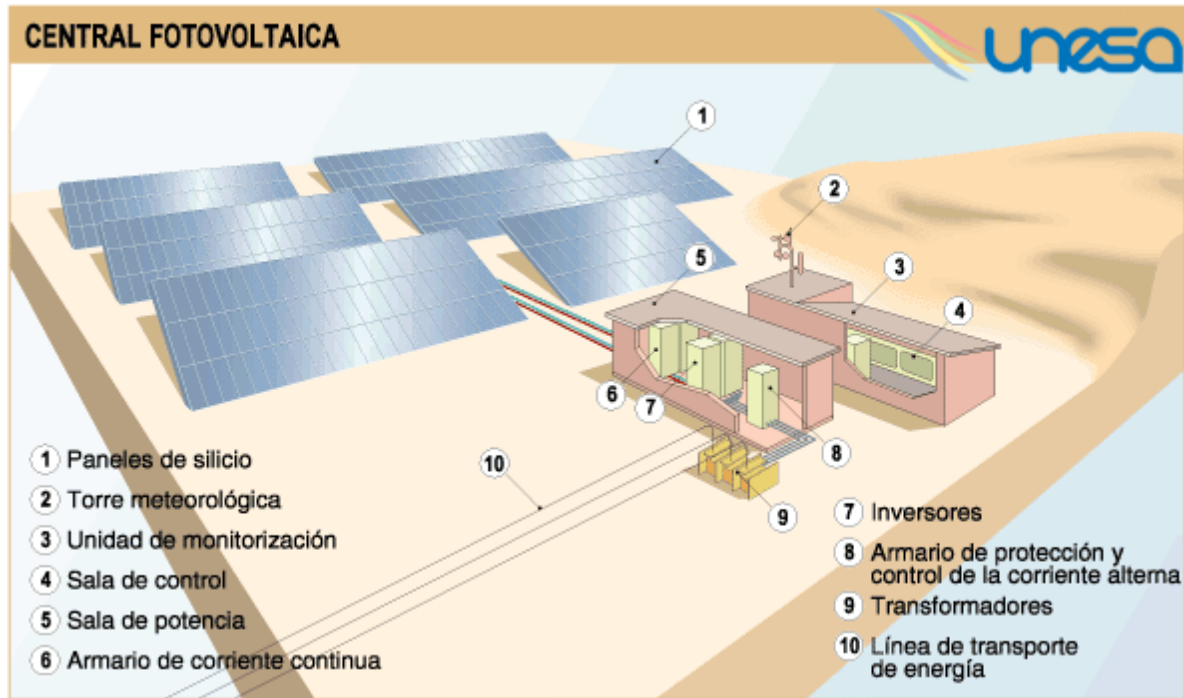


Figura 2 Elementos que componen una central fotovoltaica

Fuente: <http://www.unesa.es>

El funcionamiento de una central fotovoltaica puede resumirse de la siguiente forma:

El elemento básico de una central fotovoltaica es el conjunto de células fotovoltaicas, que captan la energía solar, transformándola en corriente eléctrica continua mediante el efecto fotoeléctrico. Están integradas, primero, en módulos y luego se forman con ellos los paneles fotovoltaicos.

Lógicamente, la producción de electricidad de dichas células depende de las condiciones meteorológicas existentes en cada momento, fundamentalmente de la insolación. Dichas condiciones son medidas y analizadas con la ayuda de una torre meteorológica.

El funcionamiento de todos los equipos de la central se supervisa desde la sala de control, en la que se recibe información de los distintos sistemas de la instalación: torre meteorológica, inversor, armarios de corriente continua y alterna, centro de transformación, etc.

Como la energía eléctrica que circula por la red de transporte lo hace en forma de corriente alterna, la corriente continua generada en los paneles solares debe ser transformada a corriente alterna. Es conducida, entonces, primeramente a un armario de corriente continua.

Para ser convertida en corriente alterna por medio de un inversor.

Es finalmente transportada a un armario de corriente alterna.

Posteriormente, la energía eléctrica producida pasa por un centro de transformación.

Donde se adapta a las condiciones de intensidad y tensión de las líneas de transporte para su utilización en los centros de consumo.

Es el equipo que se encarga de elevar el voltaje para después ser enviada esa energía por las líneas de transmisión.

Son las encargadas de transportar la energía producida para su distribución

En la figura 2 se tiene gráficamente estos elementos. [11]



**CAPÍTULO I**  
**PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

## 1.1 Antecedentes

Como en el Perú no hay una investigación preliminar para la implementación de este tipo de prototipos de prueba para subestaciones de media tensión en centrales F.V ya que son relativamente nuevas en nuestro país, espero que esta investigación sirva como referente en el alcance de la Ingeniería, ya que podría aplicarse en un futuro.

## 1.2 Descripción del Problema

En las centrales eléctricas fotovoltaicas de Arequipa - Repartición y Majes cada una cuenta con 16 subestaciones de media tensión y en ellas sus respectivos transformadores en seco encapsulados, controladores de temperatura, ventiladores para su enfriamiento. Se observa deficiencias ya que utilizan un control ON/OFF para su ventilación haciéndolo lento y poco estable, como consecuencia se tiene un sobre consumo de energía, se percibe sobre calentamiento en los transformadores, disminuyendo así el tiempo de trabajo de los equipos, daños en el recubrimiento de los cables de media tensión y pérdida de producción de energía eléctrica. Los controladores de temperatura no poseen un puerto de comunicación industrial (Capítulo III 3.5), siendo este un problema para el monitoreo a distancia del estado de operación de los ventiladores y los datos de la temperatura solo en campo.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Controlar y automatizar subestaciones de transformadores secos encapsulados e implementar un prototipo de prueba para el control de temperatura y protección en aplicaciones de centrales eléctricas fotovoltaicas de la empresa T- solar Arequipa

### 1.3.2 Objetivo específico

- Investigar consideraciones físicas, eléctricas, normativa europea, ingeniería de detalle para la implementación de un prototipo de prueba.
- Desarrollar una técnica de control avanzado para mantener la temperatura aceptable que permita un mejor performance en el sistema de refrigeración de las subestaciones de media tensión de planta.
- Implementar una protección de sobre corriente para un prototipo de prueba en base de las subestaciones de media tensión de planta.
- Diseñar los componentes eléctricos y electrónicos para un prototipo de prueba en base a las subestaciones de media tensión de planta.
- Implementar un sistema SCADA capaz de monitorear, supervisar los eventos relevantes de operación como del sistema de refrigeración para un prototipo de prueba en base a las subestaciones de media tensión de planta.
- Desarrollar un análisis comparativo de los ensayos, pruebas y resultados.

## 1.4 Hipótesis

### 1.4.1 Hipótesis específica

Si logro implementar un prototipo de prueba para el control de temperatura y su respectiva protección podría hacerlo aplicable para fines de investigación.

- Sera posible mejorar el sistema SCADA existente en planta ya que lograría tener datos de temperatura y el estado de operación de los ventiladores en la sala de control y también un control de temperatura más estable y robusto además un sistema de protección para el prototipo con ello cumpliría con la normativa en implementación de subestaciones de media tensión en base a las centrales eléctricas F.V. T- solar Arequipa.

#### **1.4.2 Hipótesis secundaria**

Si logro implementar un prototipo de prueba para los fines expuestos anteriormente podría ser utilizado como referente si el organismo estatal correspondiente quisiera normalizar la implementación de este tipo de instalaciones.

#### **1.5 Justificación de la investigación**

Esta investigación está formulada para dar solución a los problemas encontrados en el estado del aislamiento de los conductores del transformador trifásico como son rajaduras, quemaduras en el esmaltado de la misma. Tomando en cuenta los pocos años de operación, las altas temperaturas geográficas. Sumado a esta la falta de información del estado de operación de los ventiladores en Sala de Control además de sobre consumo de energía para su operación.

#### **1.6 Alcances de la investigación**

En la presente investigación se va hacer el análisis y diseño de una subestación eléctrica para construir un prototipo de prueba así mismo automatizar subestaciones de 32 transformadores secos encapsulados de una central eléctrica fotovoltaica a su vez se controlará la temperatura utilizando un control cascada además contará con supervisión a distancia para satisfacer los requerimientos de la actual gestión.

#### **1.7 Variables e Indicadores**

##### **1.7.1 Variable independiente**

- **Implementación del prototipo de prueba**

##### **Control Cascada**

Dentro del PLC se puede mirar el lenguaje ladder en donde se muestra el control cascada de temperatura como maestro y de velocidad

como esclavo, las acciones de control, la interacción con los dispositivos de control del proceso, alarmas, configuración de comunicación con el ordenador, los tags que son los nexos con el sistema SCADA.

### **Sistemas SCADA**

En el sistema SCADA se pueden ver las ventanas de supervisión y medición de control de temperatura, velocidad y corriente en campos de lectura, diagramas de tendencias, también se pueden ver si se encuentra operativo el prototipo mostrándose así una correcta supervisión.

### **Sistema de protección**

En el prototipo de prueba se puede ver montado los sensores de corriente en la línea correspondiente de prueba en el primario y secundario, las señales de salida analógica del sensor hacia el PLC, las señales de control del módulo de salidas discretas hacia los relés de estado sólido.

#### **1.7.2 Variable dependiente**

##### **- Cálculos y equipamiento**

##### **Ingeniería de detalle**

Se tiene impresos los manuales de configuración de todos los equipos con esto se tiene en conocimiento las especificaciones funcionales, el cálculo de las dimensiones de los conductores, tuberías y normas de instalaciones eléctricas e instrumental como son código de colores según norma técnica, listado de materiales, accesorios para la construcción del prototipo, los planos eléctricos, estructural e instrumentación.

### **Números ANSI para dispositivo de protección**

Se tiene implementado según la norma ANSI/IEEE C37.2-2008 para el diseño de sistemas de protección el dispositivo y número: Relé de protección de sobre corriente / 76

### **Instrumentación Industrial**

Se tiene los cálculos para el escalamiento de los sensores de temperatura, corriente y velocidad, sensores instalados e mantienen una interacción con PLC, diseño montaje del acondicionador de señal para el conteo de revoluciones por minuto, establecido de comunicación serial hacia el ordenador.

### **Modelamiento del Proceso**

Para la elaboración se tiene en cuenta las variables físicas como flujo del calor, temperatura de los materiales, nivel de voltaje, capacidad térmica, resistencia térmica, capacitancia térmica, potencia, presión atmosférica, ensayos en vacío y cortocircuito, para obtener el modelo matemático de un transformador trifásico en seco encapsulado.

## **1.8 Técnicas e Instrumentos a utilizar**

El desarrollo de este proyecto de tesis, se utiliza diferentes acciones de configuración y ejecución de los equipos, dispositivos de control y comunicaciones. Para la programación del PLC se dispondrá de técnicas estandarizadas para el desarrollo de los sistemas de control del proceso. El PLC MicroLogix 1100 se configurará el tipo de protocolo que nos permita una adecuada comunicación con los dispositivos que interactúen con esta. Como son la red industrial serial que soporta. Para el diseño del sistema SCADA la configuración está determinada por el

requerimiento del área de operaciones y mantenimiento para el correcto control de proceso, como son la visualización, alarmas para su seguridad, indicador del accionamiento, etc, con esto pretende cumplir con los requerimientos solicitados.

- Puerto serie RS232 (DB9 directo (Straight Through)) y Puerto de comunicación del PLC serial (One RS-232 / RS-485 Combo Port)
- Con una computadora (procesador de 2,8GHz, memoria RAM 3,88 GB y un sistema operativo Windows 7)
- PLCs, con módulos de extensión de entradas y salidas analógicas, de salidas discretas y su respectivo módulo de comunicación incorporado por defecto.
- Sensor de temperatura, sensor de velocidad, relés de estado sólido (para la acción de protección eléctrica).
- Programa de diseño para sistemas SCADA RSVIEW32.
- Fuente de alimentación principal alterna trifásica de (220VAC), continua (24VDC), fuente de alimentación de (5VDC), multímetro, pinza amperimétrica para la medición de corriente necesaria de prueba.
- También se consultó manuales, catálogos, especialistas relacionados a energía renovable no convencional, textos, revistas, bibliografía especializada, anteriores trabajos de investigación, equipamiento necesario para construcción (que me ayude al montaje de los equipos).

### 1.9 Campo de verificación

Esta investigación está diseñada y planificada para recoger los datos de dos fuentes de información en el periodo de los años 2012 hasta el fin de la misma:

- En laboratorio se reunirán todos los datos de pruebas de ensayo, experiencias, cálculos matemáticos para su análisis y con esta permitirá hacer una comparación en campo.
- En campo donde recogemos datos físicos, fotografías, textos, que nos ayuden a comprender y profundizar los fenómenos físicos que puedan interactuar con la investigación.

### 1.10 Estrategia

En primer lugar se iniciarán los estudios necesarios para determinar la posible problemática en el proceso, se decidirá y planteará las acciones para llegar a los objetivos necesarios, se tomará una estrategia de diseño en donde nos soporte todas las variables de investigación, costos y presupuestos, tiempo para su desarrollo, estudio de las consecuencia que podríamos tener.

Se diseñará los circuitos eléctricos e instrumentación tomando siempre consideraciones técnicas, estándares internacionales, presupuesto económico, los equipos seleccionados necesitan tener propiedades físicas necesarias para poder ser utilizados en un prototipo a escala.

Luego se diseña la estructura mecánica movable donde se encontrará nuestro prototipo, tomando en cuenta las dimensiones necesarias para sus posteriores montajes eléctricos e instrumental.

Se hará el montaje del tablero eléctrico y de la cabina de transformación con su respectivo transformador de prueba, ayudado por el esquema eléctrico diseñado con anterioridad se hará el montaje de los equipos de control, cableado eléctrico e instrumental, fuentes de

alimentación, módulos expansores, dispositivo de protección, iluminarias, botoneras, equipos de conexión y desconexión eléctrico, borneras.

Se hará las conexiones de alimentación de fuerza e instrumentación a la cabina de transformación como son las señales del ventilador, transmisor de temperatura, transductores de velocidad y corriente.

Después el montaje de las resistencias calculadas necesarias para poder cumplir con la tarea propuesta.

Se configurará una red serial con el dispositivo de control (PLC), para la comunicación con el ordenador, programación en lenguaje ladder con la lógica necesaria tomando en cuenta todos los dispositivos que interactúan en ella, luego se hará la configuración de los equipos anexos como los módulos expansores, trasmisor de temperatura, circuito de acondicionamiento de señal de revoluciones por minuto, sensor de corriente con sus respectivos protocolos de comunicación y niveles de tensión y corriente.

Se harán las pruebas de continuidad para asegurarnos el correcto montaje eléctrico de las mismas.

Se hará el diseño del sistema SCADA en RSview32 para la supervisión y control del proceso con sus respectivos protocolos de comunicación.

Se hará las mediciones y pruebas de funcionamiento.



## **CAPÍTULO II**

# **MARCO TEORICO**

## 2.1 La energía solar

Es una fuente de energía gratuita. Ofrece un potencial energético renovable que es infinitamente inagotable y puede ser aplicado a muchas actividades de nuestra vida cotidiana.

En quince minutos el sol nos puede proveer a la tierra de la misma cantidad de energía que en un año de consumo equivalente a  $1.69 \times 10^{14}$  KW. No toda esta cantidad se puede utilizar pero su potencial es mil veces superior al consumo anual de la humanidad.

Mediante una correcta orientación, iluminación, utilización de materiales, diseño de infraestructura la energía solar se puede aprovechar de modo realmente eficiente. También esta energía es convertida en calor y es denominada energía solar térmica con ella también se puede generar electricidad.

Tiene muchas aplicaciones desde el traslado de agua a lugares desérticos utilizando bombas, alimentación de fuentes de energía para equipos eléctricos e iluminación de ciudades.

Sin duda es una manera de generar energía abundante amigable para el medio ambiente.

Hoy en día se encuentra aceptada esta manera de generar energía, se ha llegado a demostrar que la orientación de los módulos fotovoltaicos no genera pérdidas en la productividad.

La infraestructura permite una óptima instalación (balcones, techos, ventanas, patios, autopistas etc.).

Es necesario reconocer los avances en la construcción de módulos de conversión, inversores etc. que están permitiendo reducir costos de factibilidad de los proyectos alrededor del mundo.

La energía solar fotovoltaica se define como la transformación de la radiación solar en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico de los materiales semiconductores que forman las células solares.

## 2.2 ¿Qué es el control de procesos?

Se trata del seguimiento a nuestras variables de control en planta sujeta a especificaciones, requerimientos, normas internacionales. Este control es llevado a un gráfico de tendencias que permite ver el estado del proceso y con esta tomar las medidas correctivas necesarias si fuese necesario.

## 2.3 Control en Cascada

### 2.3.1 Concepto de 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. Más exactamente, 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]

### 2.3.2 Estructura

Este sistema de control mejora mucho algunas aplicaciones de control con realimentación, suele ser usado cuando las perturbaciones perjudican a la variable de proceso como consecuencia perjudica a todo el proceso, produciendo perturbaciones que afecten la estabilidad del sistema de control, aplicando un sistema de control cascada se logra disminuir de manera significativa las perturbaciones que hacen un sistema inestable. [2]

En la figura 2.3.2.1.1 se muestra la estructura del control cascada y está conformado por dos lazos uno interno o secundario (este es el lazo

maestro y su entrada de referencia es ajustada mediante la salida producida por el lazo externo o lazo esclavo)

También este control es conocido como controlador maestro y esclavo respectivamente.

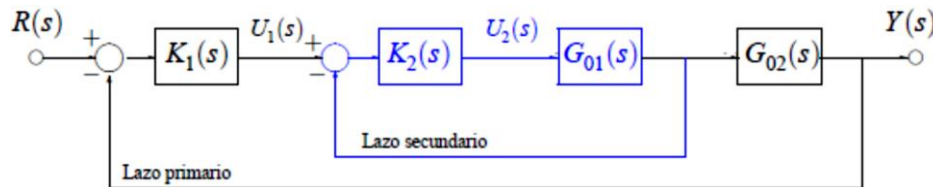


Figura 2.3.2.1.1 Estructura del control en cascada

Fuente: [http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/img\\_C15\\_02.html](http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/img_C15_02.html)

Entonces:

$Y(s)$ : Salida del proceso 02.

$R(s)$ : Señal de referencia o set point para el controlador primario.

$K_1(s)$ : Controlador primario.

$G_{01}(s)$ : Proceso 01

$K_2(s)$ : Controlador secundario.

$G_{02}(s)$ : Proceso 02

$U_1(s)$ : Variable de control del controlador 1, también es la señal de referencia para el controlador 2.

$U_2(s)$ : Variable de control del controlador 02.

### 2.3.3 Sistema de control cascada en serie

En la figura 2.3.3.1.1 se muestra la variable manipulada “u” que tiene un efecto tipo “domino” sobre la variable a controlar “y”, el esquema de control se denomina en serie porque la variable “u” afecta a una variable intermedia “yi” que a su vez, afecta a la variable que se desea controlar “y”, se tiene también en cuenta que el bloque  $G_2$  es el proceso

para el control interno y el bloque  $G_1$  es el proceso para el control externo. [3]

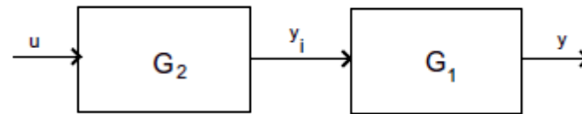


Figura 2.3.3.1.1 Sistema de control cascada en Serie

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/37587340/Control-Cascada>

Un requisito importante para que la aplicación del esquema de control en cascada presente ventajas sobre un controlador feedback puro, es que la respuesta dinámica de la planta  $G_2$  sea más rápida que la correspondiente respuesta dinámica de la planta  $G_1$ .

Si este requisito se cumple entonces es muy probable mejorar el desempeño del esquema de control a lazo cerrado usando el concepto de control en cascada. Por esta razón se acostumbra emplear un controlador puramente proporcional para el control de la planta  $G_2$ ; este controlador se sintoniza de manera tal que la respuesta obtenida de la planta  $G_2$  sea lo más rápida posible, sujeta a las restricciones de estabilidad sobre los valores de la ganancia del controlador. Para el control de la planta  $G_1$  podría emplearse un controlador PI o PID. [3]

#### 2.3.4 Ventajas del control en cascada

- Produce estabilidad en la operación.
- Las perturbaciones en el lazo interno o secundario son corregidas por el controlador secundario, antes de que ellas puedan afectar a la variable primaria.
- Cualquier variación en la ganancia estática de la parte secundaria del proceso es compensada por su propio lazo.

- d. Las constantes de tiempo asociadas al proceso secundario son reducidas drásticamente por el lazo secundario.
- e. El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria.
- f. Es menos sensible a errores de modelado.
- g. Incremento de la capacidad de producción. [2]

### **2.3.5 Limitaciones de aplicación del control en cascada**

- 1. Es aplicable solo cuando pueden obtenerse mediciones de variables adicionales de proceso.
- 2. Requiere medir las perturbaciones en forma explícita, y además es necesario un modelo para calcular la salida del controlador.
- 3. En algunas aplicaciones la variable controlada no puede medirse y la realimentación no puede realizarse. [2]

## **2.4 ¿Por qué la utilización de un sistema de Control Cascada para mi proceso?**

Como un Control Cascada tiene como propiedad un respuesta de regulación del sistema más estable y rápido se provee solucionar el problema de sobre temperatura ambiental que podría ser una causa raíz de la problemática ya expuesta en el apartado anterior o en su defecto otra avería con los ventiladores de baja tensión que fue un evento de alto riesgo.

En los resultados obtenidos se puede observar la mejora dinámica del lazo de control como podemos ver en las conclusiones de la investigación.

## **2.5 Control Proporcional Integrativo Derivativo**

En la figura 2.5.1.1 se muestra un controlador PID que es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas

de control industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado.

El algoritmo del control PID consiste de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional depende del error actual. El Integral depende de los errores pasados y el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio de un elemento de control como la posición de una válvula de control o la potencia suministrada a un calentador.

Cuando no se tiene conocimiento del proceso, históricamente se ha considerado que el controlador PID es el controlador más adecuado. Ajustando estas tres variables en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer una acción de control diseñado para los requerimientos del proceso en específico. La respuesta del controlador puede describirse en términos de la respuesta del control ante un error, el grado en el cual el controlador sobrepasa el punto de ajuste, y el grado de oscilación del sistema. Nótese que el uso del PID para control no garantiza control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo.

Algunas aplicaciones pueden solo requerir de uno o dos modos de los que provee este sistema de control. Un controlador PID puede ser llamado también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control. [4]

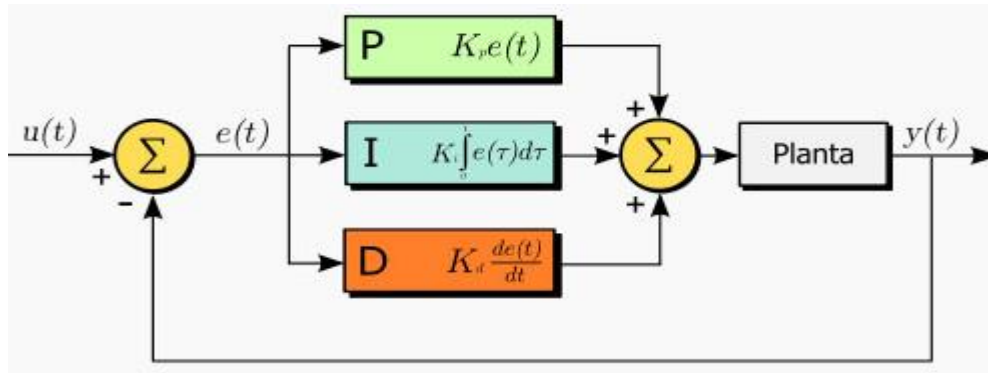


Figura 2.5.1.1 Sistema realimentado empleando un controlador PID

Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

La salida de estos tres términos, el proporcional, el integral, y el derivativo son sumados para calcular la salida del controlado PID. Definiendo  $y(t)$  como la salida del controlador, la forma final del controlador, la forma del algoritmo del PID esta expresado en la ecuación ( 1 ):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Dónde:

$y(t)$ : Salida del controlador.

$e(t)$ : Señal de error.

$u(t)$ : Entrada o señal deseada para el controlador.

$K_p$ : Ganancia del controlador proporcional.

$K_i$  = Constante de integración.

$K_d$  = Constante derivativa.

Tenemos las ecuaciones ( 2 ) y ( 3 ):

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (2)$$

$$K_d = K_p \cdot T_d \quad (3)$$

En donde:

$T_i$ : Tiempo integral

$T_d$ : Tiempo derivativo (o razón de cambio).

Reemplazando en la ecuación ( 1 ):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t)dt + K_p \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

El valor proporcional tiene una acción de control proporcional al error, el valor integral tiene una acción de control proporcional al error acumulado en el tiempo (esto implica una acción de control lenta), el valor derivativo tiene una acción de control proporcional a la velocidad de cambio del error. [4]

## 2.6 Sistema SCADA

SCADA es el acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) es un concepto que se emplea para realizar un software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención. [5]

### 2.6.1 Aplicaciones SCADA

Para desarrollar un sistema SCADA es necesario un IDE en el cual diseñar, entre otras cosas:

- El aspecto que va a tener el SCADA

- Las funciones y eventos que debe ejecutar cuando se interactúa con su interfaz HMI
- Las operaciones y cálculos que debe realizar con los datos adquiridos [6]

También funciona con otros controladores lógicos existentes en el mercado, haciendo a SCADA una herramienta bastante útil para los sistemas de control automatizado. Así pues, una de las soluciones en el control SCADA es utilizar la aplicación creada junto con un programa para monitorizar, controlar señales análogas y digitales. Uno de los programas más utilizados para este fin.

### 2.6.2 Filosofía Operacional

En vez de confiar en la intervención del operador o en la automatización de la estación maestra los RTU pueden ahora ser requeridos para operar ellos mismos, realizando su propio control sobre todo por temas de seguridad. El software de la estación maestra requiere hacer más análisis de datos antes de ser presentados a los operadores, incluyendo análisis históricos y análisis asociados con los requerimientos de la industria particular. Los requerimientos de seguridad están siendo aplicados en los sistemas como un todo e incluso el software de la estación maestra debe implementar los estándares más fuertes de seguridad en ciertos mercados.

Para algunas instalaciones, los costos que pueden derivar de los fallos de un sistema de control es extremadamente alto, es posible incluso que haya riesgo de herir a personas. El hardware del sistema SCADA es generalmente lo suficientemente robusto para resistir condiciones de temperatura, humedad, vibración y voltajes extremos pero en estas instalaciones es común aumentar la fiabilidad mediante hardware redundante y varios canales de comunicación. Una parte que falla puede ser fácilmente identificada y su funcionalidad puede ser

automáticamente desarrollada por un hardware de backup. Una parte que falle puede ser reemplazada sin interrumpir el proceso. La confianza en cada sistema puede ser calculado estadísticamente y este estado es el significado de tiempo medio entre fallos, el cual es una variable que acumula tiempos entre fallas. El resultado calculado significa que el tiempo medio entre fallos de sistemas de alta fiabilidad puede ser de décadas. [7]

### 2.6.3 Esquema básico conceptual de un sistema SCADA

En figura 2.6.3.1.1 se muestra el esquema básico de un sistema de Adquisición, supervisión y control donde se observa tres partes que la componen.

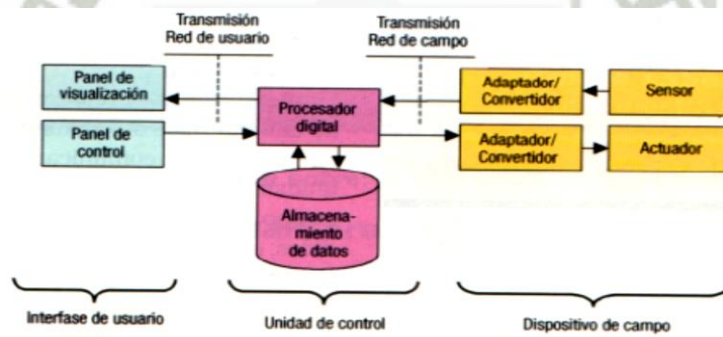


Figura 2.6.3.1.1 Sistema de adquisición, supervisión y control.

Fuente: <http://marielcastle.blogspot.pe/2009/04/>

- **Interfaz entre usuario y planta:** están basados en paneles de control repletos de indicadores luminosos, instrumentos de medida y pulsadores, están siendo sustituidos por sistemas digitales que implementan el panel sobre la pantalla de un ordenador.
- **Unidad de Control directo:** realizan los controladores autónomos digitales y/o autómatas programables y están conectados a un

ordenador que realiza las funciones de diálogo con el operador, tratamiento de la información y control de la producción, utilizando el SCADA.

- **Dispositivos de Campo:** controladores autónomos, autómatas programables, sistemas de protección, sensores, etc.

#### 2.6.4 Requisitos de un SCADA

Estos son algunos de los requisitos que debe tener un sistema SCADA para sacarle el máximo provecho:

- Deben ser sistemas de arquitecturas abiertas, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Deben comunicarse con total facilidad y de forma transparente para el usuario con el equipo de planta (drivers) y con el resto de la empresa (acceso a redes locales y de gestión).
- Los programas deben ser sencillos de instalar, sin excesivas exigencias, y fáciles de utilizar, con interfaces amables con el usuario (sonido, imágenes, pantallas táctiles, etc.). [8]

#### 2.6.5 Red de comunicación

Este es el nivel que gestiona la información que los instrumentos de campo envían a la red de ordenadores desde el sistema. El tipo de BUS utilizado en las comunicaciones puede ser muy variado según las necesidades del sistema y del software escogido para implementar el sistema SCADA, ya que no todos los softwares (ni los instrumentos de campo como PLC) pueden trabajar con todos los tipos de BUS. Hoy en día, gracias a la estandarización de las comunicaciones con los dispositivos de campo, se puede implementar un sistema SCADA sobre prácticamente cualquier tipo de BUS. Se encuentran SCADA sobre formatos estándares como los RS-232, RS-422 y RS-485 a partir de los cuales, y mediante un protocolo TCP/IP, se puede conectar el sistema

sobre un bus en configuración DMS ya existente; pasando por todo tipo de buses de campo industriales hasta formas más modernas de comunicación como Bluetooth (Bus de Radio), microondas, satélite, cable. A parte del tipo de BUS, existen interfaces de comunicación especiales para la comunicación en un sistema SCADA, como pueden ser módems para estos sistemas que soportan los protocolos de comunicación SCADA y facilitan la implementación de la aplicación. Otra característica de SCADA es que la mayoría se implementa sobre sistemas WAN de comunicaciones, es decir, los distintos terminales RTU pueden estar deslocalizados geográficamente. [9]

#### **2.6.6 Instrumentos de Campo**

Son todos aquellos que permiten realizar tanto la automatización o control del sistema (PLC, controladores de procesos industriales y actuadores en general) como los que se encargan de la captación de información del sistema (sensores y alarmas). Una característica de los SCADA es que sus componentes son diseñados por distintos proveedores, sin coordinación entre sí. De manera que se tienen diferentes proveedores para las RTU (incluso es posible que un sistema utilice RTU de más de un proveedor), módems, radios, minicomp. [9]

### **2.7 Sistema de protección y monitoreo**

#### **2.7.1 Sistema de Protección**

Las subestaciones forman parte indispensable de los sistemas eléctricos de potencia pues son centros de transformación de energía que enlazan las líneas eléctricas de alta tensión con las líneas de media tensión o viceversa dependiendo del tipo de subestación que se esté analizando, ya que una subestación es un conjunto de aparatos de maniobra y circuitos instalados en un lugar determinado que tienen la función de modificar los parámetros de potencia eléctrica (tensión y corriente). De ahí la importancia que tiene la protección en la subestación

ya que cada elemento está sujeto a una falla o corto circuito y otro tipos de eventos que afectarán a la subestación, para lo cual se utiliza relés numéricos que detectaran las fallas, e iniciarán la operación de los dispositivos de interrupción en los circuitos y aislar los equipos o aparatos con falla, de manera que se minimice el efecto de la falla y se mantenga la continuidad del servicio en el resto del sistema. Para dar la importancia que tienen las protecciones en la subestación, se puede establecer una distribución de probabilidad de ocurrencia de fallas.

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/56290416/Sistemas-de-Protecciones-en-Las-Subestaciones>

### **2.7.2 Protecciones y control de transformadores encapsulados**

El transformador debe protegerse en todo momento frente a estados de servicio no permitidos para evitar daños.

Para ello en este tipo de aplicaciones se utilizan celdas de protección de media tensión.

## **2.8 Transformadores secos encapsulados**

Las bobinas de este transformador como se muestra en la figura 2.8.1.1. se encuentran aisladas de un material llamado resina que no permite acceder a su interior. Esta resina es de tipo termoendurecible (resina epoxy) y están encapsuladas sus arrollamientos, ligada a una (carga activa) que está formada de aluminio y sílice hidratada con un aditivo que endurece y se adapta.

Estos transformadores secos son ideales para ser utilizados cerca de los puntos de utilización de potencia lo cual permite una correcta operación de diseño minimizando los circuitos de baja tensión y alta intensidad. Los transformadores secos son medioambientalmente seguros, proporcionan un excelente comportamiento a los cortocircuitos y robustez mecánica.

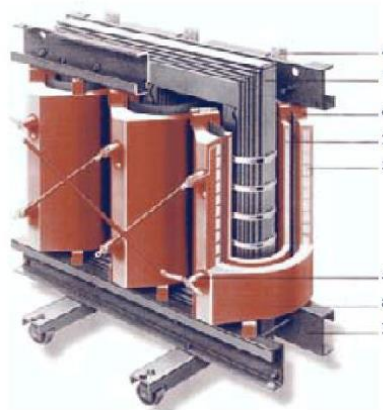


Figura 2.8.1.1 Transformador seco trifásico

Fuente: <http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448141784.pdf>

1. Núcleo de tres columnas construido a base de chapas magnéticas de grano orientado de bajas pérdidas aisladas por ambos lados.
2. Arrollamiento de baja tensión construido con banda de aluminio; las espiras están fijamente pegadas entre sí, mediante materiales aislantes laminados.
3. Arrollamiento de alta tensión a base de bobinas individuales de aluminio, bobinados en fleje; la resina se trata en vado.
4. Terminales de baja tensión; arriba, por el lado posterior, y abajo, mediante consulta.
5. Terminales de alta tensión: disposición variable para optimizar el diseño del C.T.
6. Separadores elásticos: eliminación de vibraciones entre núcleo y devanados, lo que reduce el ruido.
7. Armazón y chasis con ruedas orientables para desplazamiento longitudinal y transversal.

Aislamiento de resina epoxy/cuarzo molido exento de mantenimiento, seguro contra la humedad y tropicalizado, de difícil combustión y autoextinguible.

Los transformadores de distribución en seco como se muestra en la figura se utilizan para disminuir o aumentar las tensiones de distribución suministradas por las empresas eléctricas a niveles de baja y media tensión para la distribución de potencia principalmente en áreas metropolitanas, subestaciones de distribución, aplicaciones industriales, centros comerciales, centrales de generación fotovoltaica en específico.

Estos equipos están diseñados a prueba de humedad y son adecuados para funcionar en ambientes húmedos o muy contaminados. Son los transformadores idóneos para funcionar en ambientes que presenten una humedad superior al 95 % y en temperaturas por debajo de los  $-25^{\circ}\text{C}$ .

#### **Algunas características:**

- Son seguros y respetan el medio ambiente
- Sin riesgo de fugas de sustancias inflamables o contaminantes
- Fabricación segura para el medio ambiente (sistema cerrado)
- Apropriados para zonas húmedas o contaminadas
- Impactos medioambientales mínimos
- Alto reciclado (90 %). [12]

#### **2.8.1 ¿Qué se entiende por el ensayo en vacío?**

La salida en el secundario no está dispuesta una carga o una impedancia entonces podemos decir que es infinita.

En lado primario aplicamos progresivamente tensión hasta llegar a la tensión nominal donde conectamos un amperímetro y un voltímetro que nos servirá para verificar la tensión nominal que nos arroja el Varier.

La potencia obtenida en lado primario serán las pérdidas en el hierro y la corriente que circula en lado primario es muy baja entonces las pérdidas en el cobre son despreciables. Las pérdidas en el hierro

dependen del ciclo de histéresis y corrientes de parasitas o de Foucault.  
La potencia en el hierro es la potencia en vacío.

### 2.8.2 ¿Por qué realizamos el ensayo de cortocircuito?

Por qué podemos determinar la potencia e impedancia de cortocircuito y las pérdidas en el cobre, asumimos las pérdidas en el hierro despreciable ya que son muy bajas. Para esto cortocircuitaremos el lado secundario de nuestro transformador.

Si un transformador se produjera un cortocircuito en el secundario la corriente sería muy elevada produciendo así el efecto Joule traducida en temperatura hasta que se corte uno de los conductores como consecuencia se produce daño en el barniz y el equipo. Nuestras condiciones de experimentación serán tales que no llegaran a mayores.

Empezaremos inyectando tensiones pequeñas hasta que circule por el secundario la corriente nominal o corriente de cortocircuito de placa y produciendo así la tensión de corto circuito.

## 2.9 El efecto Joule

### 2.9.1 ¿Qué es la energía y el calor?

El calor es la liberación de energía de un sistema por consecuencia del movimiento de las partículas que lo componen tal como se muestra en la figura 2.9.1.1.1

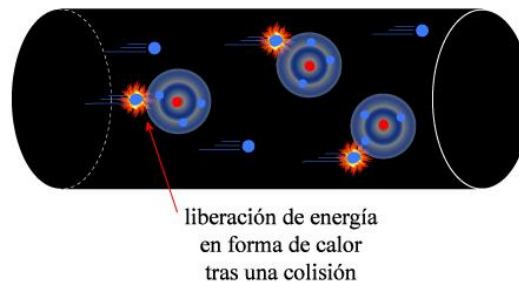


Figura 2.9.1.1.1 Colisión de las partículas y liberación de energía calorífica

Fuente: [www.academico.cecyt7.ipn.mx](http://www.academico.cecyt7.ipn.mx)

Si un metal es calentado se obtiene un incremento de la energía del sistema, visto a nivel molecular, se comprende como un aumento de movimiento de las partículas que componen dicho sistema.

Esta energía asimilada después se libera nuevamente al exterior en forma de calor, siempre y cuando el entorno en la que se encuentra dicho material tenga unos niveles de energía menores que podría tratarse de la temperatura ambiente.

La energía no se conserva en el metal porque por naturaleza busca en la medida de lo posible disminuir el movimiento de partículas. Cuando ese estado de reposo pierde equilibrio los sistemas intercambian energía con los que interactúan para tratar de aproximarse lo máximo posible a dicho estado. En el caso de un metal que emite calor al exterior para tratar de disminuir la interacción de las partículas que la componen a esto le llamamos calor.

El efecto Joule es la liberación de calor como resultado del movimiento de electrones por el paso de la corriente eléctrica en un conductor. La colisión con otros átomos y partículas subatómicas con los electrones resultan en mayor o menor movimiento, aumentado su energía como resultado libera calor al exterior. Esta liberación natural sería evitable si el material en donde interactúan sea totalmente perfecto. Esta energía calorífica se entiende como efecto Joule.

El concepto de intensidad de corriente está dado por la cantidad de electrones que pasan por unidad de tiempo. Cuando mayor sea el diámetro del conductor mayor será la cantidad de electrones que puedan moverse por este. Cuando mayor sea la resistencia del conductor menor será la cantidad de electrones en movimiento en función del tiempo.

La cantidad de calor desprendida se eleva en función al paso del tiempo.

El efecto Joule es despreciable porque afecta la vida útil de cualquier material que para este caso tiene repercusiones en nuestros transformadores además de ello impide la obtención de máxima cantidad

de energía de la corriente eléctrica que alimenta al sistema eléctrico dándonos a esto pérdidas en la producción.

*“La energía no se crea ni se destruye solo se transforma”*

Tomando en cuenta el principio de la conservación de la energía, en la Figura 2.9.1.1.2 se muestra el equilibrio de energía. La energía generada es la sumatoria de las energías perdidas en el transporte y la consumida por la carga que es este caso es el cliente, como se muestra en la siguiente ecuación matemática (5).

$$E_{entregada} = E_{perdida\ en\ el\ transporte} + E_{usuario} \quad (5)$$

Dónde:

$E_{entregada}$  : Es la energía generada por la planta

$E_{perdida\ en\ el\ transporte}$  : Pérdida de energía en el transporte.

$E_{usuario}$ : Energía aprovechada por el cliente.

$I$ : Corriente generada

Con la ecuación (5) podemos llegar a determinar las pérdidas de energía que se produce en todo el recorrido que sigue la corriente eléctrica, como se muestra en la ecuación (6).

$$E_{perdida\ en\ el\ transporte} = E_{entregada} - E_{usuario} \quad (6)$$

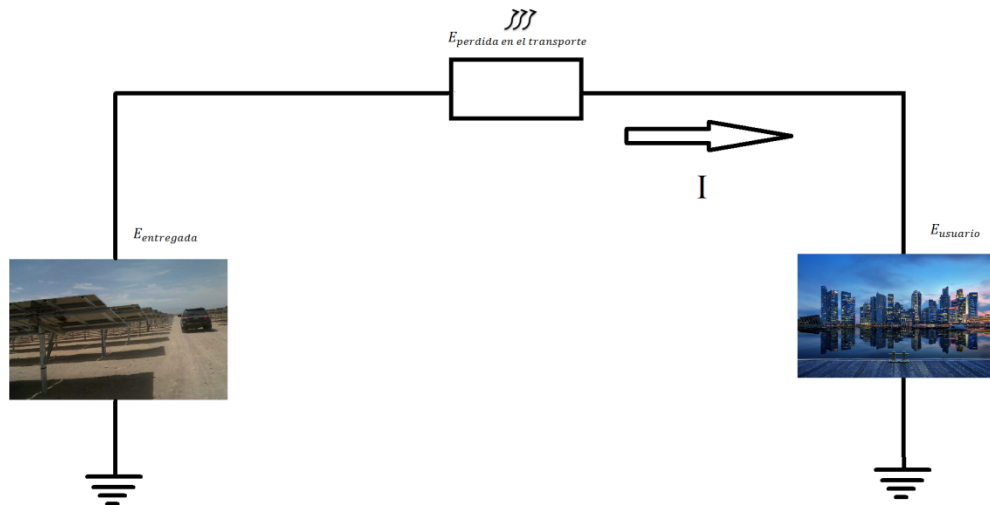


Figura 2.9.1.1.2 Equilibrio de energía en un sistema de generación eléctrica

Fuente: Elaboración propia

## 2.10 Ley de Gay Lussac

El aire está compuesto principalmente por oxígeno y nitrógeno. Con esto se puede considerar que el aire también es un gas.

La ley de Gay Lussac establece que el aumento de la temperatura de un gas (aire) se produce un aumento de la presión como consecuencia del movimiento de las moléculas del gas y aumenta el número de choques contra las paredes por una unidad de tiempo ya que no puede cambiar su volumen, produciendo una disminución de la densidad. Haciendo que el aire caliente se mueva hacia arriba y el aire frío ocupe su lugar.

Gay Lussac propone que en cualquier momento del proceso, el cociente entre la presión y la temperatura absoluta tenía un valor constante.

Tenemos esta ecuación matemática ( 7 ) en donde:

$T_1$  = Temperatura inicial

$T_2$  = Temperatura final

$P_1$  = Presión inicial

$P_2$  = Presión final

$$\frac{T_1}{P_1} = \frac{T_2}{P_2} \quad (7)$$

### 2.11 Principio de Venturi

Al aumentar la velocidad del aire en las aspas del ventilador rotatorio disminuye la presión estática en el ducto lo que permite que se succione el aire de la cabina de transformación.

### 2.12 Presión negativa

Consiste en extraer aire desde un espacio cerrado hasta el exterior. Se utiliza un equipo mecánico que produce un flujo de aire que para este caso se utiliza un ventilador. De esta manera se genera un efecto Venturi o succión hacia el exterior. Es necesario proporcionar la suficiente ventilación en la cabina para poder tener un mayor flujo de aire. En resumen la física de gases depende de tres factores interrelacionados que son presión, volumen y temperatura.

¿Cuándo implementar un sistema de ventilación forzada?

- Cuando el tipo de edificación no utiliza una ventilación natural.
- Cuando el elemento o elementos que contiene esta edificación se encuentra expuesta a temperaturas que perjudiquen a este.
- Cuando el elemento se encuentre inaccesible.
- Cuando el elemento se encuentra en un ambiente peligroso al ser humano que para este caso es la existencia de alta tensión.



**CAPÍTULO III**  
**DESCRIPCIÓN DEL PROCESO**

### 3.1 Instalación de la central FV conectada a la red

Las centrales de producción fotovoltaica eléctrica son comparadas con una planta amigable al medio ambiente, que entrega la corriente generada a la red eléctrica como se muestra en la figura 3.1.1.1.



Figura 3.1.1.1 Esquema conceptual de una central de generación

Fuente: Elaboración propia

De manera simple, una instalación solar fotovoltaica conectada a la red tiene los siguientes componentes:

- Generador fotovoltaico
- Estructura de soporte del campo fotovoltaico
- Inversor
- Contador de energía y protecciones de interconexión
- Centro de transformación
- Red de distribución

### 3.2 Ubicación Geográfica

La planta de generación eléctrica fotovoltaica de la localidad de La Joya está ubicada en la región Arequipa, provincia de Arequipa cerca de la carretera Panamericana Sur como se muestran en las figuras 3.2.1.1 y 3.2.1.2.

- Potencia: 22 MWp.
- N° de paneles instalados: 56.800.

- Energía producida año: 40 GWh.
- Extensión: 102 ha.



Figura 3.2.1.1 Vista superior geográfica P.F.V- La joya  
Fuente: Google Maps



Figura 3.2.1.2 Vista lateral geográfica P.F.V- La joya  
Fuente: Google Maps

La planta de generación eléctrica fotovoltaica de la localidad de Majes está ubicada en la región Arequipa, provincia de Caylloma cerca

de la carretera Panamericana Sur como se muestran en las figuras 3.2.1.3 y 3.2.1.4.

- Potencia: 22 MWp.
- Nº de paneles instalados: 56.800.
- Energía producida año: 40 GWh.
- Extensión: 102 ha.



Figura 3.2.1.3 Vista superior geográfica P.F.V- Majes

Fuente: Google Maps



Figura 3.2.1.4 Vista lateral geográfica P.F.V- Majes

Fuente: Google Maps

### 3.3 Lazo de control de temperatura

En la figura 3.3.1.1. se muestra de manera gráfica el conexionado eléctrico e instrumental actual de uno de los 32 cabinas de transformación en donde se encuentran montados los transformadores trifásicos secos encapsulados, en la figura 3.5.1.1 se ve que no se cuenta con un puerto de comunicación industrial en el equipo T154 solo con 3 salidas de relays hacia tres entradas digitales del PLC y por medio de un módulo RS485 a fibra óptica hacia sala de control, el cual se tiene implementado un SCADA básico para mostrar el estado del transformador.

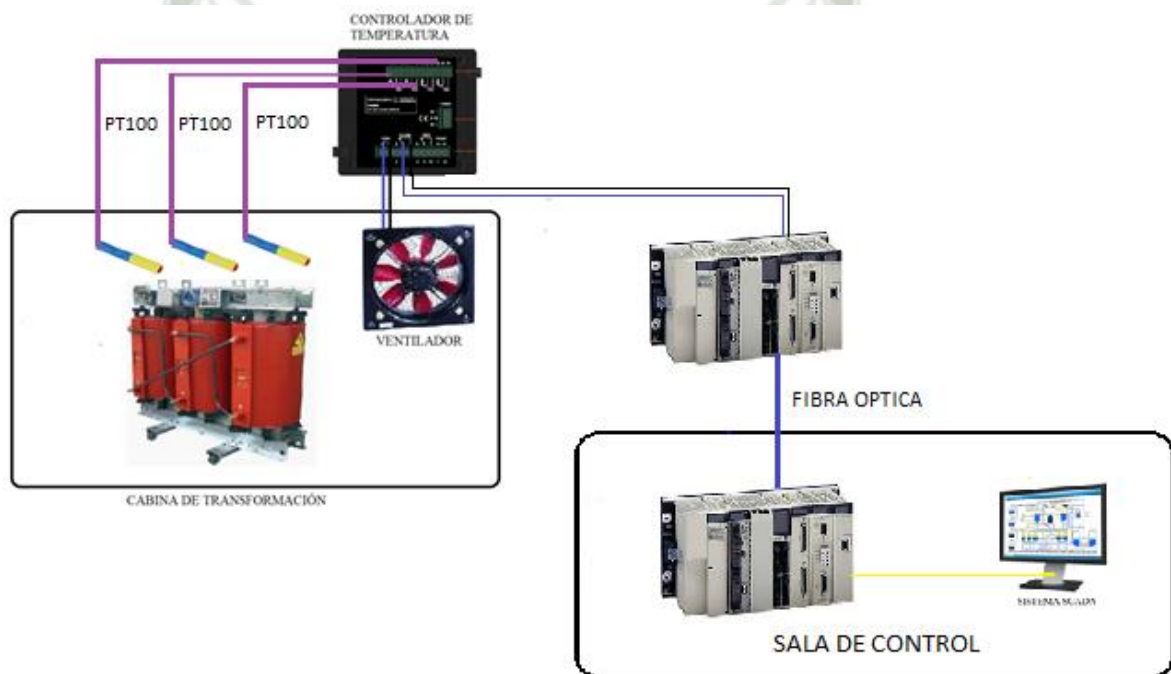


Figura 3.3.1.1 Elementos que componen una cabina de transformación

Fuente: Elaboración propia

### 3.4 Central T-154

Los transformadores se encuentran equipados con tres Sondas PT100 mostrada en la figura 3.5.1.1 cableadas a caja de bornes sobre el propio transformador y la Central digital de control de temperaturas Modelo T-154 como se muestra en la figura 3.4.1.1, que facilita la temperatura instantánea

más elevada de las fases del transformador, así como nos permite fijar una temperatura de Alarma y otra de disparo para proteger el transformador contra sobrecargas del mismo.

Para aplicaciones fotovoltaicas también se incorpora una Pantalla Electrostática.



Figura 3.4.1.1 Central digital de control de temperaturas Modelo T-154

Fuente: <http://www.tecsystem.it/>

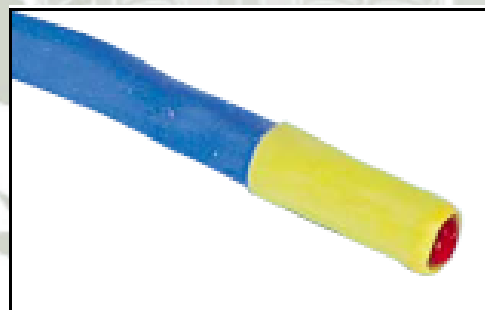


Figura 3.4.1.2 Sonda PT100

Fuente: <http://www.tecsystem.it/>

### 3.5 Conexión eléctrica del controlador de temperatura T154

El conexionado eléctrico de la central digital de control de temperaturas Modelo T-154 es mostrado en la figura 3.5.1.1.

Este equipo soporta hasta 4 pt100, un puerto para alimentación del equipo a 220VAC, también 4 relays para las siguientes acciones:

**ALARM** = Se envía una señal hacia el sistema SCADA en la sala de control cuando la temperatura supera los 155°C.

**TRIP** = Cuando la temperatura supera los 155°C el CT sale de servicio.

**FAULT** = Se envía una señal hacia el sistema SCADA en la sala de control cuando la centralita presenta una avería.

**FAN** = Enciende o apaga el ventilador

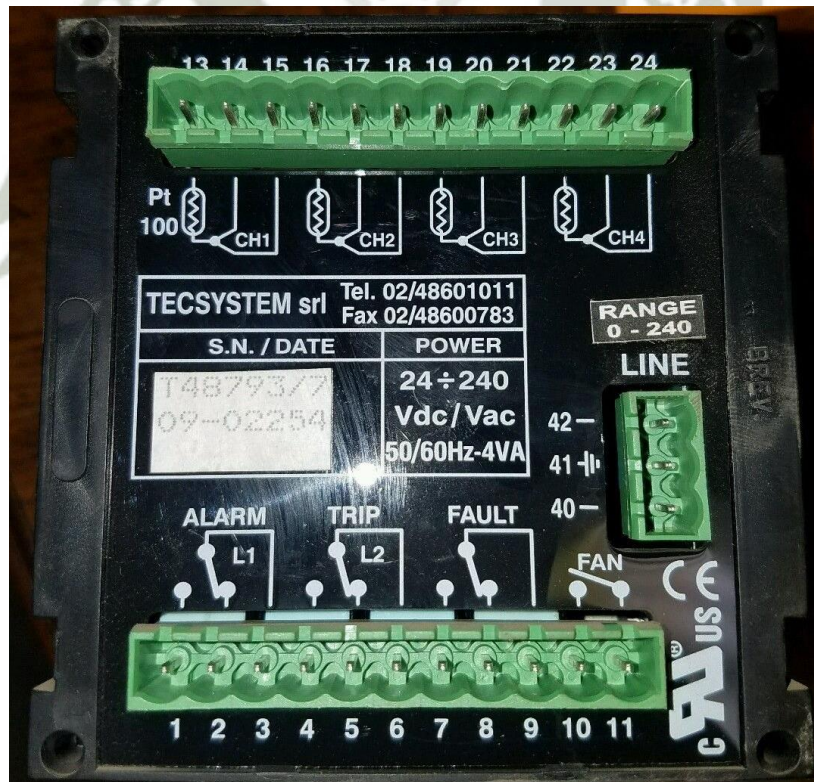


Figura 3.5.1.1 Elementos que componen el controlador de temperatura T-154

### 3.6 Transformador trifásico en seco encapsulado 1400KVA

Transformador trifásico seco encapsulado, refrigeración por aire natural cuyo diseño y construcción responde a las Normas actualmente en vigor UNE-EN 60076\_11 (IEC 60076 -11), anteriormente UNE-EN 60726 (que sustituyó a la UNE 20178), así como todo aquello aplicable de la UNE 21538.

Los ensayos de los transformadores, se realizan de acuerdo a lo establecido en la Norma UNE-EN 60076. Está compuesto de sus partes principales, formadas por el Núcleo, las Bobinas de Media Tensión y las Bobinas de Baja Tensión.

#### Características generales:

<b>Servicio continuo Instalación Interior</b>	
Potencia Nominal	1400 KVA
Grupo de conexión	Dy5y5
Frecuencia	60 Hz
Tensión primario	23 kV
Regulación de tensión primario	$\pm 2.5 \pm 5$ % (mediante puentes)
Tensión más elevada para el material primario	24 kV (50/125)
Tensión secundario	2x0,3 KV (en vacío)
Tensión más elevada para el material secundario	1,1 kV ( 3 / - )
Nivel de descargas parciales	< 5 pC
Temperatura ambiente máxima	40°C
Calentamiento máximo	100°K
Tipo de refrigeración	AN
Altitud de instalación	< 1600 m

Pérdidas	En vacío = $W_0$	2.100W
	En carga = $W_{cc}$	13.000W (medidas a 120 °C)
	En carga = $W_{cc}$	11.350 W (medidas a 75 °C)
Tensión de c.c.1 = $V_{cc}$	6+6 % (medida a 120 °C)	
Intensidad en vacío	1 %	
Nivel de ruido Presión acústica (LpA): 65 dB Potencia acústica (LwA): 80 dB		

Tabla 3.6.1 Características generales del transformador trifásico en seco encapsulado 1400KVA.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.6.1.1 se muestra la distribución eléctrica de los elementos que interactúan aguas abajo del transformador en seco de un CT.

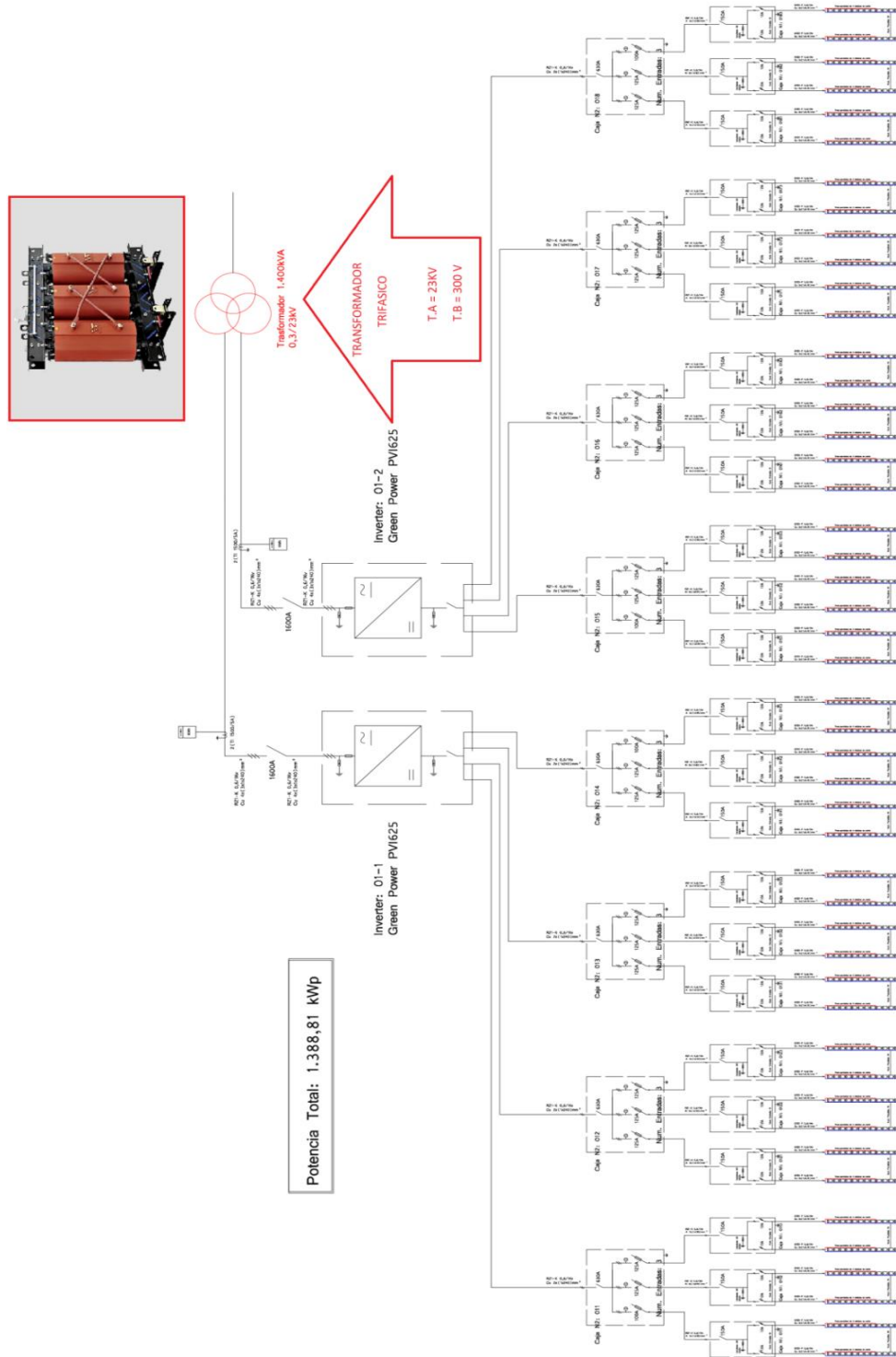


Figura 3.6.1.1 Elementos que interactúan con uno de los transformadores en seco

Fuente: Elaboración propia

Donde se puede observar el arreglo de placas fotovoltaica hacia lo interruptores seccionadores manual después a los inversores, esta señal senoidal es la entrada del transformador en seco.

### 3.7 Descripción del container

El contenedor se muestra en la figura 3.7.1.1, está diseñado y fabricado para el transporte de carga general por mar, carretera y ferrocarril. Está diseñado para mantener su integridad estructural y la intemperie dentro de un rango de temperatura de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Dimensiones:

<b>Contenedor 40'HC</b>	
Ancho externo	2.438 mm
Altura externa	2.896 mm
Longitud externa	12.192 mm
Longitud interna	12.032 mm
Ancho interno	2.352 mm
Altura interna	2.698 mm
Abertura de la puerta	2.340 mm
Altura puerta	2.585 mm

Tabla 3.7.1 Dimensiones del container metálico.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.7.1.1 Contenedor metálico

Fuente: Elaboración propia

El contenedor está construido principalmente con marcos de acero, soldadura de arco blindado corrugados paneles soldados por CO<sup>2</sup>. Todas las soldaduras del exterior, incluidos los marcos de base son continuas con penetración completa. Piso de madera se fija mediante tornillos autorroscantes. Todas las grietas serán selladas mediante un compuesto elástico.

### 3.8 Rejillas

Realizadas a base (de materia prima) chapa galvanizada (S-275 JR), en espesores de 2 mm y/o 1,5 m.; cortadas plegadas y posteriormente soldadas, selladas y pintadas con el mismo procedimiento que el contenedor.

#### Tipo Rejillas:

- Tipo 1: Mosquitera +Pre Filtro ZigZag G4.
- Tipo 2: Mosquitera + Rejilla de lamás.
- Tipo 3: Mosquitera +Pre Filtro ZigZag G4 + Filtro de bolsas F5
- Tipo 4: Mosquitera

En zona de celdas, las rejillas serán de tipo 2 Pico pato, instaladas una en la puerta de dimensiones 700x800mm, y otra a la espalda de las celdas en la pared del contenedor de dimensiones 800x700mm.

En la zona del transformador se instalarán dos rejillas tipo 2 pico pato, de dimensiones 1200x700 en la puerta y otra de 1240x700 a espaldas del transformador.

En zona de inversores se instalarán las siguientes rejillas todas pico pato de las siguientes dimensiones:

- 1320x700mm. Cantidad: 2. Tipo 1.
- 1100x150mm. Cantidad: 2. Tipo 4.
- 450x150mm. Cantidad: 2. Tipo 4.
- 1840x725mm. Cantidad: 1. Tipo 3.
- 1500x700mm. Cantidad: 1. Tipo 1.
- 1140x700mm. Cantidad: 1. Tipo 1.

Los filtros a instalar serán de dimensiones similares a la rejilla donde vayan situados en largo x ancho. Estas se instalarán en la posición descrita en los planos aportados.

### **3.9 Ventilador**

Se tiene instalado en la cabina de transformación un ventilador de hélice de aluminio como se muestra en la figura 3.9.1.2 empotrado en muro con rejilla, según su curva con una pérdida de 50Pa (Figura 3.9.1.1), por la rejilla mosquitera y el pre filtro de lamas, el ventilador HCFB/4-400H. Tendremos:

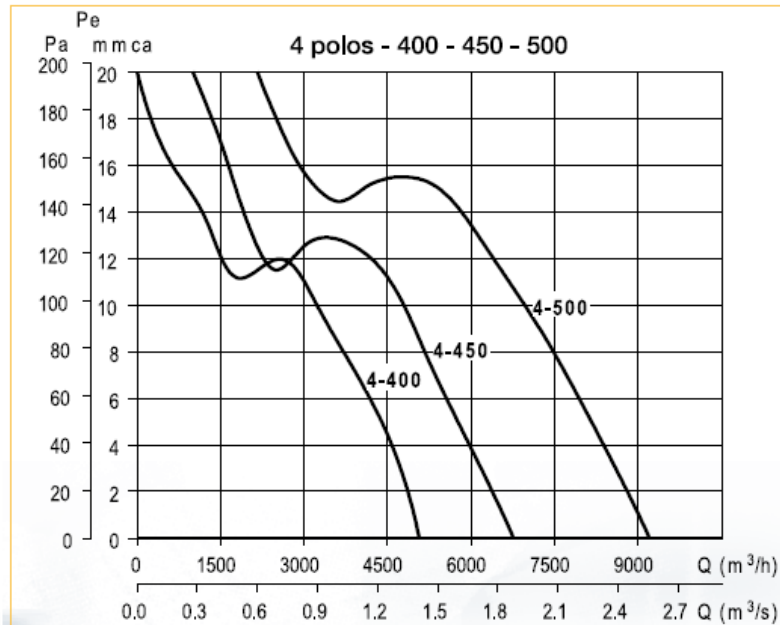
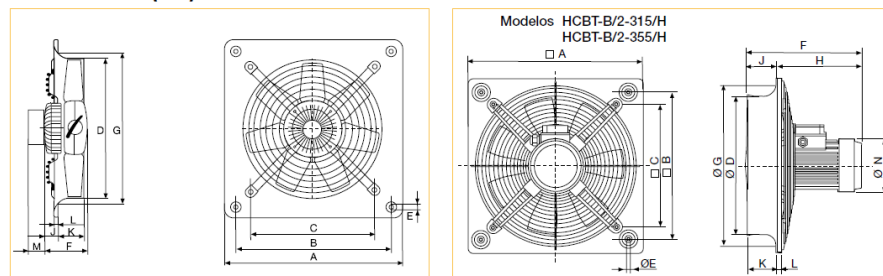


Figura 3.9.1.1 Curva de operación del ventilador de hélice de aluminio

Fuente: <http://www.solerpalau.es/hcgb-2-315-i-e71-220v50-v5.html>

Las dimensiones son mostradas en la figura 3.9.1.2.

■ Dimensiones (mm)



Modelo	A	B	C	Ø D	Ø E	F				Ø G	J				M			
						Número de polos					Número de polos				K	L	Tri	Mono
						/2	/4	/6	/8		/2	/4	/6	/8				
250	315	260	220	254	10	122	122			294	59	59			53	12	40	65
315	400	330	280	315	10	129	122	122		329	45	32	32		68	12	40	65
355	450	380	315	355	10	129	129	129		371	45	45	45		75	12	40	65
400	500	420	355	400	10	129	129	129		422		40,5	40,5		78	12	40	65
450	560	480	400	450	10	150	150	150		476	48	48	48		91	12	40	65
500	630	560	450	500	10	150	150	150		536	44,5	44,5	44,5		97	12	40	65
560	710	630	510	560	10	218,5	150	150		596	110,5	42	42		98,5	12	40	65
630	800	710	580	630	12	218,5	150	150		674	110,5	41	41		103	12	40	65
710	900	800	636	710	12	218,5	218,5	218,5		733	134	134	134		91,5	16,5	40	65

Figura 3.9.1.2 Dimensiones del ventilador de hélice de aluminio

Fuente: <http://www.solerpalau.es/hcgb-2-315-i-e71-220v50-v5.html>

### 3.10 Panel sándwich

El panel sándwich está estudiado para ser colocado sobre paredes y techos caracterizado por su sistema de encaje (garantiza una elevada hermeticidad al aire) y fijación, permitiendo una larga duración y de elevado valor estético y arquitectónico.

- Espesor nominal: 40mm.
- Ancho útil: 1000mm.
- Soporte externo e interno: laminado acero galvanizado de 0,5 mm de espesor, prelacado con 5 micras de imprimación y 20 micras de laca color a especificar.
- Aislamiento de espuma rígida de elevado poder aislante a base de resinas poliuretánicas, densidad total 40 Kg/m<sup>3</sup>, conductividad térmica a 10°C : 0.020 W/mK
- Fijación con remaches blancos de flor.
- Deformación admite flecha igual o menor a 1/200 l
- Flexión: se presume que el esfuerzo a flexión sea completamente absorbido por las chapas de soporte.
- Corte: se presupone que sea parcialmente absorbido por las chapas y resina que conforman el panel.
- Peso panel: 10,30 Kg/m<sup>3</sup>
- Tolerancia dimensional:

Longitud: Igual o menor a 3 m más menos 5 mm.

Igual o mayor a 3 m más menos 10 mm.

Estos se instalarán según los planos aportados en la totalidad del techo del contenedor.

La zona de inversores se aislara por completo con dichos paneles, realizando solo las troneras necesarias para el paso del cableado por la parte inferior del suelo técnico.

Se instalará un panel sándwich de separación entre la zona de transformador y la zona de celdas, con su tronera correspondiente para el paso del cableado.

### 3.11 Compartimento inversores.

En la figura 3.11.1.1. se muestra un inversor que cuenta con un sistema de refrigeración forzado por aire, evitando así daños por sobrecalentamiento al proporcionar una temperatura de operación adecuada.

La entrada de aire del inversor se realiza desde rejillas de ventilación visibles por toda su parte frontal.



Figura 3.11.1.1 Inversor GPTech

Fuente: <http://www.greenpower.es/en/home/index.html>

Para una óptima circulación del flujo, tanto las salidas como las entradas de aire nunca deben ser obstruidas, debiendo garantizarse un flujo de  $5000\text{m}^3/\text{h}$  por cada uno de los inversores, así la caseta deberá proporcionar  $10.000\text{m}^3/\text{h}$ .

Los inversores cuentan con extractores internos de un caudal máximo de  $5.000\text{m}^3/\text{h}$  cada uno de ellos, garantizándose así la evacuación del calor generado internamente.

### 3.12 Inversores

Los inversores funcionan como interfase entre la energía generada por las placas solares en continua y la que se entregará al transformador de media tensión en alterna.

La forma de onda de la corriente de salida de los inversores deberán ser lo más senoidal posible para minimizar el contenido en armónicos inyectados a red.

En el parque se utilizarán todos los inversores de la marca Green Power, modelo PV625 de  $625\text{kWn}$ .

En total son 32 los inversores utilizados, los cuales van de dos en dos en casetas prefabricadas y conectados a un transformador de  $1.400\text{kVA}$  que eleva la tensión de salida de los inversores de  $300\text{V}$  a  $23\text{kV}$ .

La potencia entregada a red y consecuentemente la extraída al generador fotovoltaico será la máxima posible en cualquier momento, acción que se consigue a través de un dispositivo electrónico que incorpora el inversor denominado "seguidor del punto de máxima potencia" que varía cada determinado tiempo la tensión de entrada del inversor (o salida del generador fotovoltaico) hasta que el producto  $I \cdot V$  (potencia de salida) del generador fotovoltaico se hace máximo.

Los inversores PV625 están formados por módulo mono bloque con un único MPPT. A cada uno de ellos le llegará la energía proveniente de 4 CN2 a las que estarán conectadas.

Todos los inversores disponen de un kit de conexión de puesta a tierra para el polo negativo del campo fotovoltaico.

Estos inversores no disponen de separación galvánica, ya que la misma se realizará antes de entregar la energía a la red por medio del Centro de Transformación de Media Tensión.

Todos los inversores cumplirán con las especificaciones locales para inversores fotovoltaicos, y las condiciones de conexión de la compañía suministradora.

### 3.13 Descripción celdas media tensión

Se definirán dos tipos de contenedores según cuantas y que celdas contenga, así se define un centro contenedor tipo normal mostrado en la figura 3.13.1.1, donde se ubicaran dos celdas de línea más una celda de protección del transformador (2L+P), y un contenedor “Cierre de Anillo” mostrado en la figura 3.13.1.2, donde se ubicarán tres celdas de línea más una de protección de transformador (3L+P).



Figura 3.13.1.1 Contenedor Tipo Normal

Fuente: <https://www.schneider-electric.com/ww/en/>

#### 4 funciones

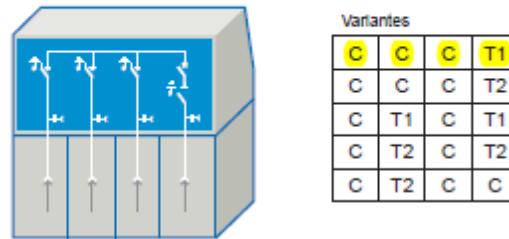


Figura 3.13.1.2 Contenedor Tipo Cierre de Anillo

Fuente: <https://www.schneider-electric.com/ww/en/>

### 3.14 Diseño de celdas individuales y de bloques de celdas.

Las celdas individuales y los bloques de celdas constan de los componentes funcionales siguientes:

- Bastidor con frente de mando uniforme revestido con chapa de acero
- Cuba de la celda para alojar los dispositivos de maniobra (tales como el interruptor de potencia al vacío, interruptor de tres posiciones para seccionamiento y puesta a tierra) y el sistema de embarrado
- Compartimento de cables

La cuba de la celda está fabricada con acero inoxidable resistente a la corrosión. Las paredes de la cuba y los pasa tapa para las conexiones eléctricas y los mecanismos de funcionamiento se unen mediante procesos de soldadura modernos, formado así un sistema sellado.

Los dispositivos de maniobra y los embarrados integrados en la cuba están protegidos contra influencias externas tales como humedad, contaminación, polvo, gases agresivos y animales pequeños. Por este motivo, las celdas también son adecuadas para su empleo en climas extremos o bajo condiciones ambientales agresivas.

Cada celda individual contiene su propia cuba. En bloques de celdas, los dispositivos de maniobra de varias celdas comparten una cuba.

La cuba es llenada en fábrica con hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Este gas no es tóxico, es químicamente inerte y presenta una gran rigidez dieléctrica. No es necesario efectuar trabajos de gas en la obra. Tampoco se precisa controlar el estado del gas o rellenar durante el servicio.

Para supervisar la densidad del gas, cada cuba va equipada con un indicador de disposición de servicio en el frente de mando. La indicación es roja/verde, autoverificante e independiente de la temperatura y de las variaciones de la presión atmosférica del entorno.

### **3.15 Sistema de embarrado.**

El embarrado está alojado dentro de la cuba bajo envoltente tripolar. En celdas individuales, y opcionalmente también en bloques de celdas, puede ser interconectado con los embarrados de las celdas adyacentes a través de acoplamientos con aislamiento sólido situados a los lados hasta formar un sistema continuo.

No es necesario efectuar trabajos de gas ni durante este proceso ni para ampliaciones posteriores.

### **3.16 Celdas de media tensión**

Se instalarán celdas de la marca Schneider Electric de la gama FBX-C de su versión compacta como se muestra en la figura 3.16.1.1.

Esta versión se puede integrar con facilidad a una subestación transformadora gracias a su compactidad y a sus reducidas dimensiones. Se pueden ensamblar hasta 5 unidades funcionales que pueden componer una cuba única aislada en el SF<sub>6</sub>. Y en la figura 2.16.1.2 se muestran las dimensiones de las celdas de media tensión.

Principales unidades funcionales

Nombres	C	T1	T2	R	RE	Sb	CB	CBb	M
Funciones	Llegada o salida de cable con interruptor-seccionador	Protección del transformador con interruptor-fusibles combinados	Protección del transformador con interruptor automático en vacío	Entrada directa sin seccionador de tierra	Entrada directa con seccionador de tierra	Interruptor-seccionador del juego de barras	Protección de línea con interruptor automático en vacío	Protección del juego de barras con interruptor automático en vacío	Medida
Sinópticos									

Figura 3.16.1.1 Celdas de media tensión.

Fuente: <https://www.schneider-electric.com/ww/en/>

C-C-T1	3	1380 (opción 1040)	752	1000	330
C-C-T2		1380			360
C-RE-T1		1380 (opción 1040)			320
C-RE-T2		1380			360
R-RE-T1		1380 (opción 1040)			320
R-RE-T2		1380			350
C-C-C		1380 (opción 1040)			320
C-C-C-T1	4	1380 (opción 1040)	752	1320	450
C-C-C-T2		1380			480
C-T1-C-T1		1380 (opción 1040)			470
C-T2-C-T2		1380			530
C-C-C-C		1380 (opción 1040)			440

Figura 3.16.1.2 Dimensiones de las celdas de media tensión.

Fuente: <https://www.schneider-electric.com/ww/en/>

### 3.17 Características celda de protección de transformador

Tensión asignada	kV	12	17,5	24					
Frecuencia asignada	Hz	50/60	50/60	50/60					
<b>Tensión asignada soportada a impulsos tipo rayo</b>									
a tierra y entre polos	kV	75	95	125					
a la distancia de seccionamiento	kV	85	105	145					
<b>Tensión asignada de resistencia a la frecuencia industrial</b>									
a tierra y entre polos	kV	28	38	50					
a la distancia de seccionamiento	kV	32	45	60					
<b>Nivel de aislamiento para la presión del SF<sub>6</sub> Pre = 0,00 MPa</b>									
Tensión asignada de resistencia a los impactos de rayo	kV	75	95	95					
Tensión asignada de resistencia a la frecuencia industrial	kV	28	38	50					
<b>Corriente nominal asignada</b>									
Del juego de barras	A	630 / 1250	630 / 1250	630 / 1250					
De salida	A	Remitirse a la tabla de selección de los fusibles							
Valor de cresta de la corriente admisible asignada, circuito principal (corriente presumida, limitada por los fusibles)	A	40	52,5	62,5	40	52,5	40	50	
Corriente de corta duración admisible asignada, circuito debajo de fusibles	1 s	kA	1	5	1	5	1	5	
	3 s	kA	-	3	-	3	-	3	
Valor de cresta de la corriente admisible asignada, circuito abajo de fusibles	kA	2,5	13	2,5	13	2,5	13		
Poder de cierre asignado en cortocircuito, circuito abajo fusibles	kA	2,5	13	2,5	13	2,5	13		
Corriente de corta duración admisible asignada, circuito de puesta a tierra	1 s	kA	16	21	25	16	21	16	20
	3 s	kA	16	21	-	16	21	16	20
Corriente asignada de corte de cable en vacío	A	60	60	60	60	60	60		
Corriente asignada de corte en condiciones de defecto de tierra	A	200	200	200	200	200	200		
Corriente asignada de corte cable en vacío en condiciones de defecto de tierra	A	87	87	87	87	87	87		

Figura 3.17.1.1 Características de las celdas de media tensión

Fuente: <https://www.schneider-electric.com/ww/en/>



**CAPÍTULO IV**  
**IMPLEMENTACIÓN Y DISEÑO**  
**DEL PROTOTIPO**

#### 4.1 Ensayos de pérdidas de potencia del transformador trifásico de prueba.

Los transformadores tienen pérdidas por diferentes razones, pero todas se manifiestan en energía calorífica, y este es la ley de la conservación de la energía.

Las pérdidas cuando se hace la medición serán totales en funciones a una de las fases dividiéndolos entre tres, del mismo modo para las pérdidas del bobinado.

##### 4.1.1 Criterios de ejecución:

Vamos a realizar el ensayo de pérdidas en vacío y cortocircuito, se realizan de acuerdo a lo establecido en la Norma UNE-EN 60076 para esto utilizo un transformador seco trifásico como se muestra en la figura 4.1.1.1 que pudiera satisfacer nuestros requerimientos de prueba como el tamaño del equipo, un voltaje del primario que pueda encontrarse en laboratorio, una potencia del transformador que genere la suficiente temperatura para su análisis y sea lo más cercano a la realidad comparado con nuestros transformadores en planta.

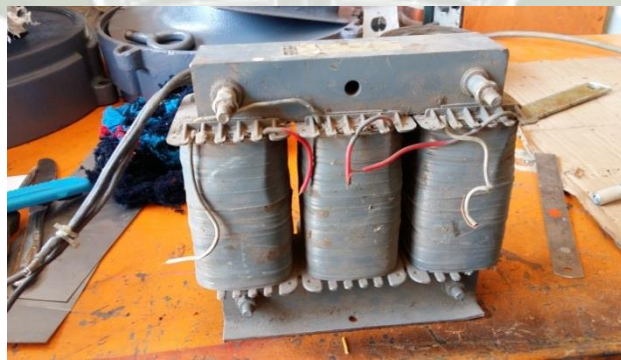


Figura 4.1.1.1.1 Transformador seco trifásico de prueba

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2 Datos recogidos en placa:

En la figura 4.1.2.1.1 se muestra los datos que serán utilizados para realizar las pruebas respectivas expuestas en el apartado anterior.



Figura 4.1.2.1.1 Datos de placa del transformador trifásico de prueba

Fuente: Elaboración propia

Potencia nominal= 525VA	Voltaje en el primario 220 / 380V	Voltaje en el secundario 22/ 35V
Frecuencia = 50 / 60Hz	I1 = 0,84A	I2 = 8,66A
Conexión = Yy0		

Tabla 4.1.2.1 Datos de placa del transformador trifásico de prueba

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.3 Ensayo en vacío

En la tabla 4.1.3.1 se muestra los datos obtenidos en laboratorio y fue diseñada para conocer el comportamiento gradual de la corriente de excitación de lado primario.

Tabla de valores					
Obs.	Porcentaje de la tensión nominal primaria	Tensión primaria $E_L$	Corriente primaria $I_P$	Tensión secundaria $V_S$	Relación de transformación (a)
1	10%	22,3V	0,04 A	2,06V	10,82
2	20%	44,9V	0,06 A	4,31V	10,41
3	30%	65,9V	0,07 A	6,41V	10,28
4	40%	88,1V	0,08 A	8,62V	10,22
5	60%	132,5V	0,09 A	13,07V	10,13
6	80%	175,9V	0,11 A	17,36V	10,13
<b>7</b>	<b>100%</b>	<b>220,9V</b>	<b>0,13 A</b>	<b>21,71V</b>	<b>10,17</b>
8	120%	264,7V	0,15 A	25,98V	10,18
9	160%	352,0V	0,22 A	34,28V	10,26
10	180%	379,7V	0,26 A	37,41V	10,28

Tabla 4.1.3.1 Datos experimentales del ensayo en vacío

Fuente: Elaboración propia

Calculo de relación de transformación en función de los voltajes medidos en el ensayo.

$$r_t = \frac{V_P}{V_S} = 10,17 \quad (4.0)$$

En un transformador trifásico se entiende que está conformado de tres bobinas o tres fases por lo tanto se tomaran en cuenta solo uno de ellas porque se supone que el transformador es simétrico y existen iguales perdidas en las tres fases. Tomaremos las características de una de ellas ya que podemos triplicar en caso de necesitar del cálculo de las potencias en las tres fases.

Para nuestras pruebas consideramos la configuración estrella-estrella y se tomará en cuenta la tensión en fase, como nuestro sistema carece de neutro se asumirá un neutro virtual de tal forma que la tensión

a la cual es calculado este circuito equivalente será entre tensión de fase y neutro mostrado de la figura 4.1.3.1.1.

$$E_f = \frac{E_L}{\sqrt{3}} = \frac{379,7V}{1,73} = 219,5V \quad (4.1)$$

La resistencia del bobinado en lado primario y secundario es de  $1,9\Omega / 2\Omega$  respectivamente.

Se utilizó un autotransformador llamado Varier con un voltímetro que mide la tensión de entrada del transformador y paralelamente se coloca un amperímetro de precisión. La idea es que como se tiene un vatímetro vamos a determinar las pérdidas del hierro que tiene que ver con las pérdidas parasitas e histéresis y corriente magnetizaste.

Con esto podemos determinar la corriente de excitación y así encontrar las pérdidas. Debemos de aclarar que las pérdidas en el cobre son muy bajas entonces se desprecian por que la corriente que circula es muy pequeña.

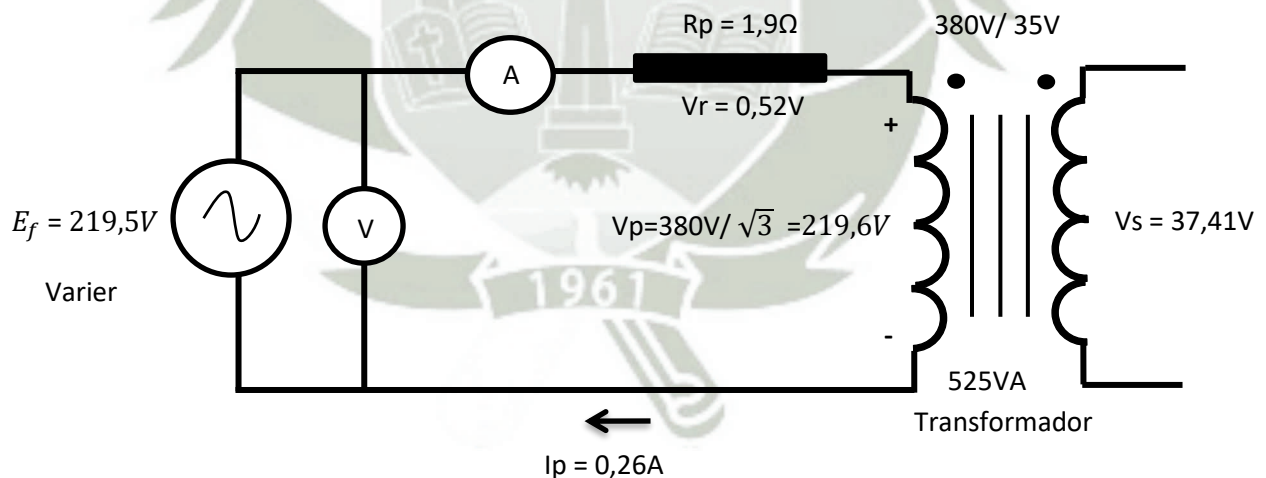


Figura 4.1.3.1.1 Circuito equivalente del trasformador para ensayo en vacío

Fuente: Elaboración propia

En figura 4.1.3.1.2. se muestra los componentes vectoriales de la tensión en fase conformado por la resta de las tensiones del transformador y de la resistencia del embobinado del lado primario.

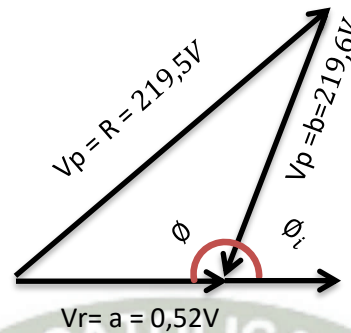


Figura 4.1.3.1.2 Componentes vectoriales de la tensión en fase

Fuente: Elaboración propia

Utilizando la ley de cosenos:

$$\cos \phi = \frac{-R^2 + a^2 + b^2}{2a \cdot b} \quad (4.2)$$

$$\cos \phi = \frac{-(219,5)^2 + (0,52)^2 + (219,6)^2}{2 \cdot 0,52 \cdot 219,6}$$

$$\cos \phi = \frac{-(48180,25) + (0,27) + (48224,2)}{2 \cdot 0,52 \cdot 219,6}$$

$$\cos \phi = \frac{-44,22}{228,4}$$

$$\cos^{-1} \cos \phi = \cos^{-1} -0,19$$

$$\phi = \cos^{-1} -0,19$$

$$\phi = 101,2^\circ$$

En el triángulo tenemos un ángulo externo  $\phi_i$  que es calculado de la siguiente manera.

$$\phi_i = 180^\circ - 101,2^\circ = 78,8^\circ \quad (4.3)$$

El análisis se hace a nivel de tensión, en el reactor se supone que estamos colocando la resistencia que corresponde a las pérdidas del hierro y la corriente magnetizante o el inductor magnetizante en paralelo. Pero para fines de cálculo las vamos a asumir en serie.

En la figura 4.1.3.1.3. la entrada de voltaje del transformador es de 219,6V que en la parte de la resistencia y en la parte de la inductancia configuradas por el ángulo interno de  $78,8^\circ$  tendremos que el voltaje en resistencia  $V_r$  correspondiente a las pérdidas parasitas.

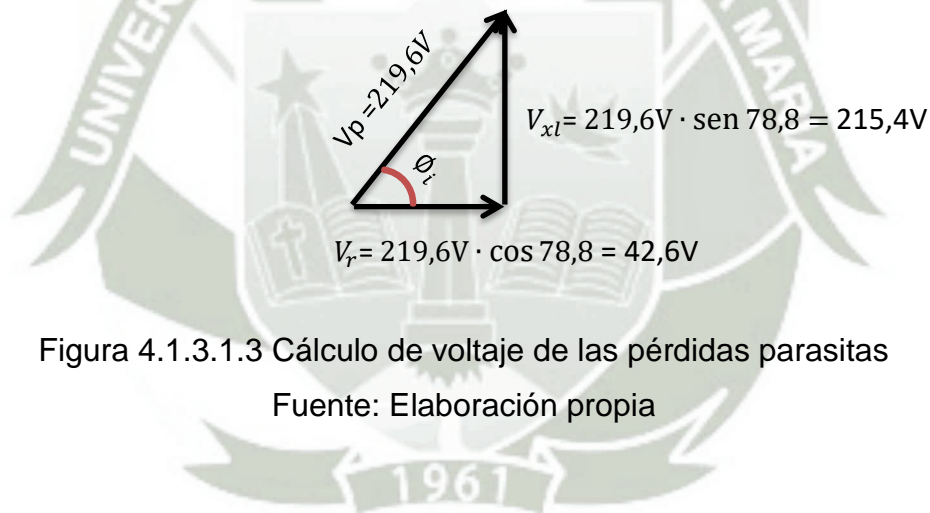


Figura 4.1.3.1.3 Cálculo de voltaje de las pérdidas parasitas

Fuente: Elaboración propia

Si la corriente de excitación  $I_p = 0,26A$ , circula por el circuito serie entonces podemos calcular las potencias:

$$P_{var} = V_{xl} \cdot I_p = 215,4V \cdot 0,26A = 56var \quad (4.4)$$

$$P = V_r \cdot I_p = 42,6V \cdot 0,26A = 11,076W \quad (4.5)$$

Pero para la configuración de circuito equivalente nos dice que debe ser circuito en paralelo entonces tenemos:

$$I_{xl} = \frac{P_{var}}{V} = \frac{56var}{219,6V} = 0,25A \quad ; \quad \text{Corriente magnetizante} \quad (4.6)$$

$$I_r = \frac{P}{V} = \frac{11.076W}{219,6V} = 0,05A \quad ; \quad \text{Corriente de pérdidas en el} \quad (4.7)$$

hierro

En la figura 4.1.3.1.4 se comprueba de manera teórica la corriente del lado primario obtenido en laboratorio.

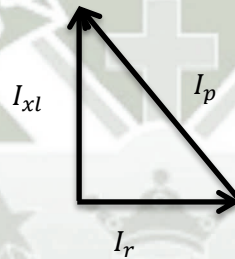


Figura 4.1.3.1.4 Cálculo de la corriente del lado primario del transformador  
Fuente: Elaboración propia

$$I_p = \sqrt{0,05^2 + 0,25^2} \cong 0,26A \quad (4.8)$$

#### 4.1.4 Ensayo en cortocircuito

En la tabla 4.1.4.1 se muestran los resultados obtenidos es el ensayo.

Potencia nominal del transformador:  $S = 525VA$

Tabla de valores				
Porcentaje de la corriente nominal primaria	Corriente primaria $I_p$	Tensión de fase $V_1$	Corriente de cortocircuito $I_{cc}$	Relación de transformación de corriente (a)
100%	<b>0,795</b>	29,05	<b>8,82 A</b>	<b>11,09</b>

Tabla 4.1.4.1 Datos experimentales del ensayo en cortocircuito

Fuente: Elaboración propia

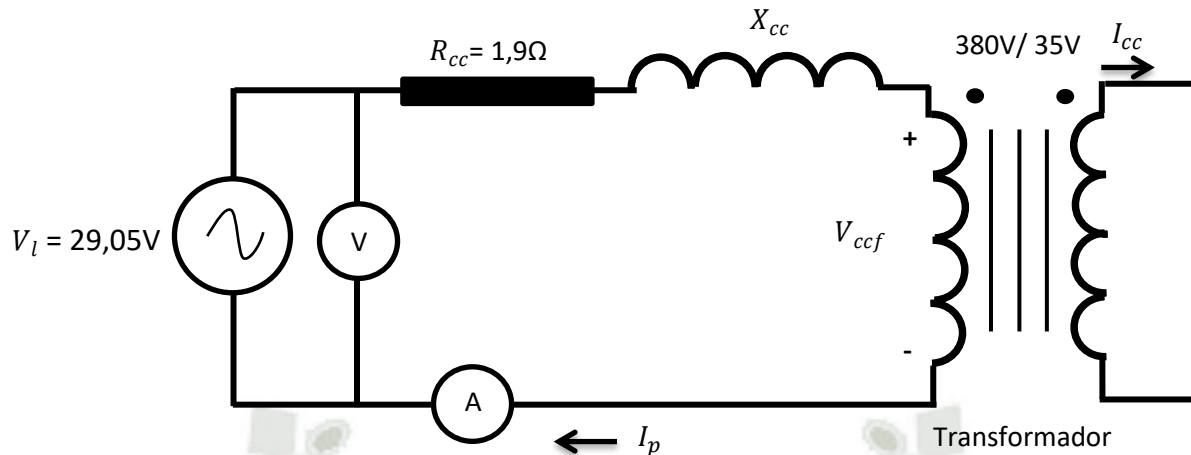


Figura 4.1.4.1.1 Circuito equivalente del transformador para ensayo de cortocircuito

Fuente: Elaboración propia

Calculamos el voltaje de fase:

$$V_f = \frac{V_l}{\sqrt{3}} = \frac{29,05}{\sqrt{3}} = 17,05V \quad (4.09)$$

Pero el voltaje de fase es igual al voltaje de cortocircuito de fase como también al voltaje de cortocircuito.

$$V_f = V_{ccf} = V_{cc}$$

Teniendo el voltaje de cortocircuito podemos hallar la impedancia de cortocircuito.

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_n} = \frac{17,05}{8,66} = 1,97\Omega \quad (4.11)$$

En la figura 4.1.4.1.2 se muestra la relación vectorial entre la resistencia, la impedancia de corto circuito:

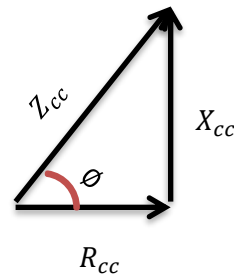


Figura 4.1.4.1.2 Triangulo vectorial para el cálculo de  $\phi$

Calculo de  $\phi$ :

$$R_{cc} = Z_{cc} \times \cos \phi \quad (4.12)$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \times \cos \phi$$

$$\cos \phi = \frac{R_{cc}}{Z_{cc}}$$

$$\cos^{-1} \cos \phi = \cos^{-1} \frac{R_{cc}}{Z_{cc}}$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{R_{cc}}{Z_{cc}}$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{1,9\Omega}{1,97\Omega}$$

$$\phi = 15^\circ$$

Calculo de la reactancia de corto circuito  $X_{cc}$  :

$$X_{cc} = Z_{cc} \cdot \sin \phi \quad (4.13)$$

$$X_{cc} = 1,95 \cdot \sin 15^\circ$$

$$X_{cc} = 0,5\Omega$$

Calculo del voltaje en la resistencia de corto circuito  $V_{Rcc}$  :

$$V_{Rcc} = V_{ccf} \cdot \cos \phi \quad (4.14)$$

$$V_{Rcc} = 17,05 \cdot \cos 15$$

$$V_{Rcc} = 16,46V$$

Calculo del voltaje en la impedancia de corto circuito  $V_{Xcc}$ :

$$V_{Xcc} = V_{ccf} \cdot \sin \phi \quad (4.15)$$

$$V_{Xcc} = 17,05 \cdot \sin 15$$

$$V_{Xcc} = 4,41V$$

La potencia medida es la potencia de cortocircuito  $P_{cc}$ :

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot V_{ccf} \cdot I_n \cdot \cos \phi \quad (4.16)$$

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot 17,05 \cdot 8,66 \cdot \cos 15$$

$$P_{cc} = 247,025W$$

Sabemos que:

$$P_{cc} = P_{Fe} + P_{Cu} \quad (4.17)$$

Pero la potencia en el hierro es muy pequeña entonces se desprecia:

$$P_{cc} = P_{Cu} \quad (4.18)$$

#### 4.2 Cálculos del circuito equivalente

Para encontrar el circuito equivalente es necesario conocer la resistencia del conductor, reactancia de dispersión, las pérdidas tanto en el fierro o corrientes parasitas, la reactancia, corriente de magnetización en el reactor como se muestra en la figura 4.3.1.1.

En este circuito equivalente que es igual a un transformador monofásico se diferencia respecto a la tensión de la cual está configurado este circuito equivalente.

En los ensayos en laboratorio arrojaron los siguientes resultados:

##### **Ensayo en vacío en BT:**

Voltaje en el secundario = 37,41V

Corriente en el primario = 0,26 A

Potencia del primario = 11,076W

##### **Ensayo en cortocircuito para AT:**

Voltaje del primario = 29,05V

Corriente en el secundario = 8,82 A

Potencia del primario= 247,025W

#### 4.3 Determinación de los parámetros del circuito equivalente referidos al primario.

Corriente del primario:

$V_p = 380V$

Potencia nominal= 0,525KVA

$$I_p = \frac{\text{Potencia kVA}}{\sqrt{3} \cdot V_p} = \frac{0,525\text{KVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,38\text{KV}} = \frac{0,525\text{KVA}}{0,66\text{KV}} = 0,8\text{A} \quad (4.19)$$

Corriente del Secundario:

$$V_s = 35V$$

$$\text{Potencia nominal} = 0,525KVA$$

$$I_s = \frac{\text{Potencia kVA}}{\sqrt{3} \cdot V_s} = \frac{0,525KVA}{\sqrt{3} \cdot 0,035KV} = \frac{0,525KVA}{0,06KV} = 8,75A \quad (4.20)$$

Potencia en vacío:

$$\text{Voltaje del secundario} = 37,41V$$

$$P_{\text{vacío KVA}} = 0,03741KV \cdot 0,26A \cdot \sqrt{3} = 0,016KVA \quad (4.21)$$

Potencia reactiva:

$$P_{\text{reactiva kvar}} = \sqrt{P_{\text{Aparente}}^2 - P_{\text{Activa}}^2} \quad (4.22)$$

$$P_{\text{reactiva kvar}} = \sqrt{0,016k^2 - 0,011k^2}$$

$$P_{\text{reactiva kvar}} = 0,05Kvar$$

Considerando en el ensayo de cortocircuito, que tenemos una tensión E sobre una impedancia Z y circula un corriente I por esta en lado primario. La tensión y la corriente son proporcionales.

$$E = \frac{I}{Z} \quad (4.23)$$

Entonces tenemos:

$$E = \frac{I_p}{I_s} \cdot V_p = \frac{0,8A}{8,82A} \cdot 29,05V = 2,6V \quad (4.24)$$

Por lo tanto con relación a la potencia, al elevar la corriente del primario con relación a la del secundario sobre una impedancia habrá un incremento de potencia.

$$P = I^2 \cdot R \quad (4.25)$$

Con esto podemos calcular la perdida de corto circuito final.

$$P_{cc} = \left( \frac{0,8A}{8,82 A} \right)^2 \cdot 0,247KW = 0,002KW \quad (4.26)$$

Ahora que tenemos los datos calculados de la potencia activa y reactiva en ensayo en vacío de baja tensión vamos a calcular las reactancias de dispersión, sistema magnetizaste, la resistencia en el conductor, perdidas en el hierro. Sacaremos la tercera parte de la potencia activa y reactiva por fase.

$$P_{Activa} \cong \frac{0,011kW}{3} = 0,0037KW \quad (4.27)$$

$$P_{Reactiva \text{ kvar}} = \frac{0,05Kvar}{3} = 0,016Kvar$$

Con esto podemos encontrar las resistencias equivalentes parasitas en función a la tensión de fase referido al primario.

$$E_{fase} = \frac{0,38KV}{\sqrt{3}} = 0,22KV \quad (4.28)$$

Calculo de resistencia equivalente parasita.

$$R = \left( \frac{220V}{3,7W} \right)^2 = 3535,4\Omega \quad (4.29)$$

Calculo de la reactancia de dispersión.

$$X = \left( \frac{220V}{16var} \right)^2 = 189,06\Omega \quad (4.30)$$

Entonces tenemos las pérdidas totales por fase en el cobre.

$$P_{cc} = \frac{0,002KW}{3} = 0,67 \cdot 10^{-4}KW \quad (4.31)$$

Calculo de la resistencia equivalente del primario.

$$R_{p. \text{ equi}} = \frac{0,67W}{(0,8A)^2} = 1,05\Omega \quad (4.32)$$

Calculo de la potencia reactiva.

$$P_{VA} = 29,05V \cdot 8,82A \cdot \sqrt{3} = 443,8VA \quad (4.33)$$

De la misma forma que la potencia activa incremento entonces también la potencia reactiva y se calcula a continuación.

$$P'_{VA} = \left( \frac{0,8A}{8,82A} \right)^2 \cdot 443,8VA = 0,0036KVA \quad (4.34)$$

Calculo de potencia reactiva.

$$P_{var} = \sqrt{P'_{VA}{}^2 - P_{Activa}{}^2} \quad (4.35)$$

$$P_{var} = \sqrt{(0,0036KVA)^2 - (0,002KW)^2}$$

$$P_{var} = \sqrt{(0,0036KVA)^2 - (0,002KW)^2}$$

$$P_{var} = 0,008Kvar$$

Calculo de potencia reactiva por fase disipada en la reactancia en el lado primario.

$$P_{\text{var por fase}} = \frac{0,008\text{Kvar}}{3} = 0,0027\text{Kvar} \quad (4.36)$$

Cálculo del valor de la reactancia.

$$X_{p. \text{ equi.}} = \frac{0,0027\text{Kvar}}{(0,8\text{A})^2} = 4,22\Omega \quad (4.37)$$

Entonces el circuito equivalente referido al lado primario se muestra en la figura 4.3.1.1:

En donde:

$R_{p. \text{ equi}}$  = Resistencia equivalente del cobre

$X_{p. \text{ equi}}$  = La reactancia de dispersión equivalente

$R$  = Resistencia de las pérdidas parasitas

$X$  = Reactancia de la corriente magnetizante

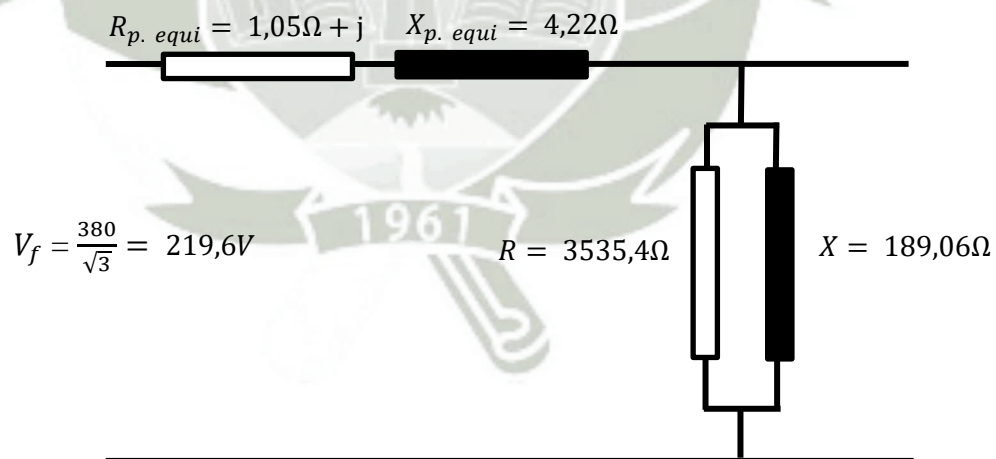


Figura 4.3.1.1 Circuito equivalente monofásico del transformador de potencia.

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestra el dato obtenido en laboratorio de la relación de transformación para corriente (a) entre el devanado primario y secundario, según placa la relación de transformación es de 10,30 veces con relación al primario pero en el ensayo de corte experimental se obtiene una relación 11,09 veces, concluyendo así la ruptura del equilibrio de transformación en corriente para el ensayo en corto circuito.

#### **4.4 Cálculo de la pérdida de potencia con carga a 75°C:**

El transformador es una máquina eléctrica la cual tiene una circulación de corriente por los conductores, con esto vamos a tener siempre un aumento de temperatura.

Para hacer una comparación de equipos porque no es lo mismo realizar un ensayo a una determinada temperatura ya que la temperatura dentro de la cabina de transformación va a variar con relación a la temperatura ambiente a medida que el transformador cumpla con un ciclo de trabajo diario.

Con esto los valores de la resistencia, impedancia siempre están en función de 75°C. En función de esta temperatura podemos comparar el rendimiento de cualquier equipo.

Si la temperatura varía también lo harán los parámetros del transformador. Lo que haremos es medir el valor de la resistencia de cortocircuito en una determinada temperatura. Y al variar la resistencia de cortocircuito también variará la potencia de cortocircuito, con esto nos impactará en las pérdidas.

Con otras condiciones de temperatura las pérdidas en el cobre serán distintas.

Es importante esta prueba ya que si se analiza en el tiempo y las pérdidas son mayores pueden llegar a ser perjudiciales. Conociendo estas pérdidas podemos llegar a calcular el tiempo de vida del transformador.

Cuando las pérdidas tanto en el hierro como el cobre son menores en el tiempo llegan a ser un importante ahorro, ya que el equipo puede estar trabajando durante muchas horas al día durante un largo tiempo.

La normativa obliga al fabricante a entregar al cliente las pérdidas debidas a la carga a una temperatura de referencia del transformador, que en el caso de transformadores sumergidos en aceite y en seco, es de 75°C. Por ello, los resultados del ensayo de cortocircuito deben extrapolarse a dicha temperatura de referencia.

Para esto se seleccionó una carga por cada línea de 3 ohms ya que podemos llegar a la temperatura de prueba en menor tiempo, tomando en cuenta que al medio día tenemos una temperatura estable así evitar variaciones bruscas.

En la figura 4.4.1.1 se observa la variación de temperatura respecto al tiempo.

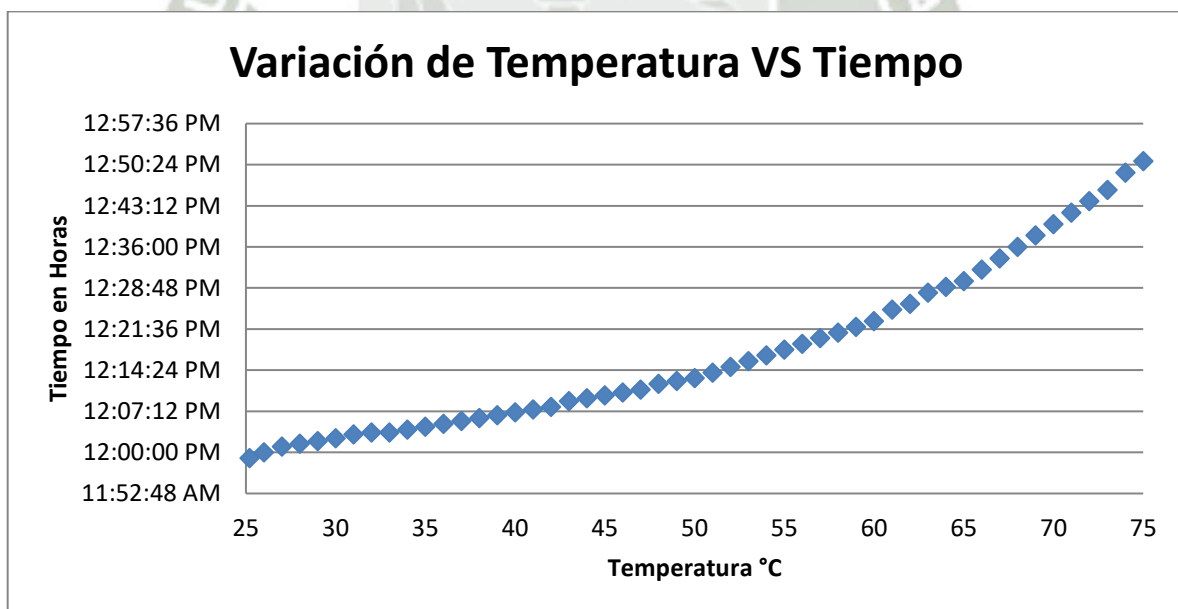


Figura 4.4.1.1 Temperatura versus el tiempo sometida a una carga de prueba

Fuente: Elaboración propia

A partir de este valor de las pérdidas debidas a la carga, se podría deducir la resistencia que debe figurar en la rama serie del circuito equivalente del transformador a la temperatura de referencia como:

$$R_{cc(75^{\circ}\text{C})} = R_{cc} \cdot \frac{(235 + \theta_1)}{(235 + \theta_2)} \quad (4.38)$$

$$R_{cc(75^{\circ}\text{C})} = R_{cc} \cdot \frac{(235 + 75)}{(235 + 74,9)}$$

$$R_{cc(75^{\circ}\text{C})} = 17,6\Omega \cdot 1,0003$$

$$R_{cc(75^{\circ}\text{C})} = 17,6\Omega$$

La variación de la resistencia de un conductor de cobre con la temperatura viene dada por la expresión:

$$R_{cc(75^{\circ}\text{C})} = \frac{P_{cc(75^{\circ}\text{C})}}{3 \cdot I_p^2} \quad (4.39)$$

Calculo de las pérdidas a 75°C.

$$P_{cc(75^{\circ}\text{C})} = R_{cc(75^{\circ}\text{C})} \cdot 3 \cdot (1,05)^2$$

$$P_{cc(75^{\circ}\text{C})} = 17,6 \cdot 3 \cdot (1,05)^2$$

$$P_{cc(75^{\circ}\text{C})} = 58,212\text{W}$$

#### 4.5 Cálculos con cargas equilibradas:

Para el cálculo de la potencia en la impedancia de la carga que está en una configuración estrella utilizaremos el circuito equivalente de nuestro transformador de prueba.

Conexión = Y

Voltaje del secundario=21,71

$R_{\text{carga}} = 6\Omega$

$Z'_{\text{carga}} = \text{Impedancia de carga}$

$$V_s = \frac{21,71}{\sqrt{3}} = 12,55V \quad (4.40)$$

Corriente con carga nominal de  $6\Omega$ :

$$I_s = \frac{12,55}{6} = 2,09A \quad (4.41)$$

Corriente nominal del secundario:

$$I_n = \frac{0,0525 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,035 \text{ KV}} = 8,66 \quad (4.42)$$

Vamos a calcular la resistencia  $R_{cc}$  y la reactancia  $X_{cc}$ . En este caso, utilizamos el ensayo de cortocircuito, el cual a haber sido realizado por el primario permitirá determinar directamente los parámetros referidos al dicho devanado.

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{cc}^2} = \frac{247,025W}{3 \cdot 8,82^2} = \frac{247,025W}{233,3772} = 1,6 \Omega \quad (4.43)$$

Reactancia:

$$X_{cc} = R_{cc} \cdot \tan \phi_{cc} \quad (4.44)$$

$$X_{cc} = 1,6 \cdot \tan 15^\circ_{cc}$$

$$X_{cc} = 0.43\Omega$$

El transformado está en condiciones de carga nominal, no se tomará en cuenta la corriente de vacío entonces tampoco la rama en paralelo del circuito equivalente.

Como el uso del circuito equivalente está referido al primario, la carga se debe conectar también referida al primario, entonces el circuito referido al primario resultante se muestra en la 4.5.1.1:

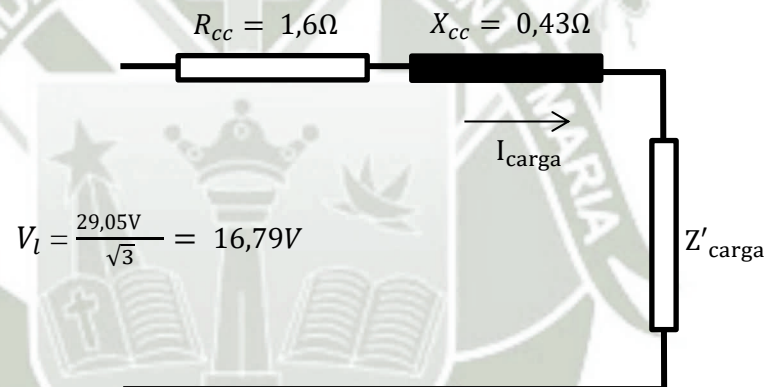


Figura 4.5.1.1 Circuito equivalente con respecto a una carga

Fuente: Elaboración propia

Impedancia de la carga se referirá al primario:

Dónde:

$r_t$  = relacion de transformación

$$Z'_{carga} = R_{carga} \cdot r_t^2 = 6 \cdot (10,17)^2 = 620,58 \quad (4.45)$$

Modulo del vector  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$

$$\rightarrow_u = \sqrt{1,6^2 + 0,43^2} = 1,65\Omega \quad (4.46)$$

En el circuito se cumple:

$$I_{carga} = \frac{V_l}{\rightarrow_u + Z'_{carga}} = \frac{\frac{220,9V}{\sqrt{3}}}{1,65 + 620,58} = \frac{16,79}{621,65} = 0,027A \quad (4.47)$$

Calculo de Voltaje en la carga:

$$V_{carga} = R_{carga} \cdot I_{carga} = 6 \cdot 0,027 = 0,162V \quad (4.48)$$

La tensión de carga que se obtuvo está referida al primario. La tensión del secundario real se multiplica por raíz de tres para obtener la tensión de línea.

$$V_{linea} = V_{carga} \cdot \sqrt{3} = 0,162 \cdot \sqrt{3} = 0,28 \quad (4.49)$$

Ahora dividimos por la relación de transformación para referirla al secundario:

$$V_{linea \text{ referida al secundario}} = \frac{0,28}{r_t} = \frac{0,28}{10,17} = 0,027V \quad (4.50)$$

Entonces podemos afirmar que la tensión en secundario cuando trabaja con la carga es de 0,027V

Ahora con esto podemos calcular la potencia en la impedancia de la carga con la siguiente expresión:

$$P_{\text{impe. carga}} = 3 \cdot I_{\text{carga}}^2 \cdot Z'_{\text{carga}} \quad (4.51)$$

$$P_{\text{impe. carga}} = 3 \cdot 0,027^2 \cdot 620,58$$

$$P_{\text{impe. carga}} = 3 \cdot 0,027^2 \cdot 620,58$$

$$P_{\text{impe. carga}} = 1.36 \text{ W}$$

## 4.6 Ventilación.

### 4.6.1 Compartimento del transformador

Se usará para la realización de estos cálculos el siguiente transformador de aislamiento trifásico a instalar en dicho compartimento, que tendrá las siguientes características de placa:

- Potencia nominal: 525VA
- Tensión primaria: 220V
- Tensión secundaria: 22V
- Frecuencia: 60Hz
- Refrigeración: AN
- Pérdidas en vacío: 11,076W
- Pérdidas en carga a 75°C: 58,212W

Se dispondrán orificios de ventilación a fin de refrigerar el transformador, por convección forzada y convección natural.

Los orificios de ventilación están diseñados y dispuestos de manera que la circulación del aire ventile eficazmente la cabina de transformación.

### 4.6.2 Caudal de aire necesario

Considerando los siguientes datos tomados en laboratorio:

- Voltaje del primario: 220Vac

- Carga por fase:  $6\Omega$
- Temperatura dentro de cabina de transformación:  $37^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del transformador a plena carga:  $43^{\circ}\text{C}$
- Temperatura ambiente:  $25^{\circ}\text{C}$

$$T_{cabina} - T_{ambiente} = 37^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 12^{\circ}\text{C} \quad (4.52)$$

El caudal de aire está en función de las pérdidas de potencia del transformador expresado en kilowatts y de la diferencia de temperaturas de entrada y salida de aire (se tomarán  $12^{\circ}\text{C}$  como diferencial máximo de temperatura, según los datos obtenidos en laboratorio).

Considerando que  $1\text{ m}^3$  de aire por segundo absorbe  $0,350\text{KW}$  por cada grado centígrado, el caudal de aire necesario se calcularía según:

$$Q = \frac{P_p}{0,350 \cdot \Delta\theta_a} = \frac{0,0582\text{W} + 0,011\text{W}}{0,350 \cdot 12} = \frac{0,0692\text{W}}{4,2} = 0,0164\text{ m}^3/\text{s} \quad (4.53)$$

Siendo:

$$Q = \text{Caudal de aire necesario } \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$P_p = \text{Perdidas del transformador en kW}$$

$$\Delta\theta_a = \text{Incremento de Temperatura del aire } ^{\circ}\text{C}$$

#### 4.6.3 Sección mínima de la rejilla

Para calcular la superficie de la rejilla de entrada de aire, se hará uso de la siguiente formula. En la que se ha considerado un diferencial de temperatura de  $12^{\circ}\text{C}$ , una altura entre rejillas de  $0,06\text{m}$  y un factor reducido de  $0,24$ .

$$S_r = \frac{W_{Cu} + W_{Fe}}{0,24 \cdot K \cdot \sqrt{h} \cdot \Delta T^3} = \frac{0,0582\text{W} + 0,011\text{W}}{0,24 \cdot 2,254 \cdot \sqrt{0,06} \cdot 12^3} = 0,1126\text{m}^2 \quad (4.54)$$

Siendo:

$W_{Cu}$  = Pérdidas en cortocircuito del transformador en kW 0,0582kW

$W_{Fe}$  = Pérdidas en vacío del transformador en kW = 0,011kW

h = Distancia vertical entre centros de rejillas = 0,06 m.

K = Coeficiente en función de la rejilla de entrada de aire = 2,254.

$S_r$  = Superficie mínima de la rejilla de ventilación de trafo (m<sup>2</sup>)

#### 4.6.4 Elección ventilador

Las necesidades de evacuación para un caudal de aire debido a las pérdidas registradas por calor en el transformador, que en este caso son:

$$Q = 0,0164 \text{ m}^3/\text{s} = 34 \text{ CFM}$$

En la figura 4.6.4.1.1 se muestra las características técnicas del ventilador FP-108D/DC se escoge un modelo que sea de plástico y que además nos permita la instalación en nuestra cabina de prueba, según su curva con una presión estática de 0,22 INCH – H<sub>2</sub>O, por el compartimiento de ventilación:

SPECIFICATIONS Specifications are subject to change without notice

MODEL NO.	VOLTAGE (VDC)	AIR (CFM)	VOLUME (M <sup>3</sup> /MIN)	CURRENT (A)	POWER (W)	SPEED (RPM)	STATIC PRESSURE (INCH-H <sub>2</sub> O)	NOISE (dBA)
FP-108D/DC	12	40	1.13	0.20	2.40	3200	0.22	35
(S-1)	24	40	1.13	0.13	3.12	3200	0.22	35
FP-108D/DC	12	33	0.93	0.16	1.92	2600	0.15	32
(S-2)	24	33	0.93	0.11	2.64	2600	0.15	32
FP-108D/DC	12	27.8	0.79	0.12	1.44	2200	0.09	25
(S-3)	24	27.8	0.79	0.09	2.16	2200	0.09	25

Figura 4.6.4.1.1 Especificaciones técnicas del ventilador FP-108D/DC

Fuente: <http://www.cic-commonwealth.com.tw>

Para las pérdidas registradas de calor en el transformador de 34 CFM, el ventilador FP-108D/DC (S-1), se evacua un caudal mayor que en este caso es de 40 CFM dándonos así una correcta operación tal como muestra en la figura 4.6.4.1.2.

PERFORMANCE

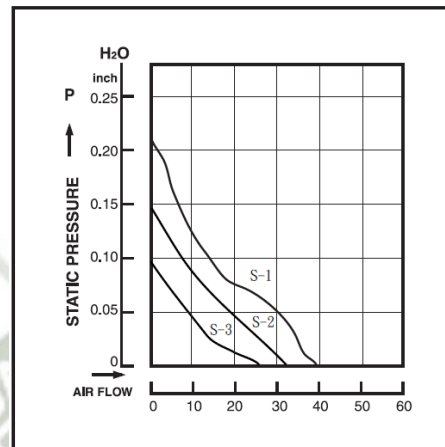


Figura 4.6.4.1.2 Desempeño del ventilador

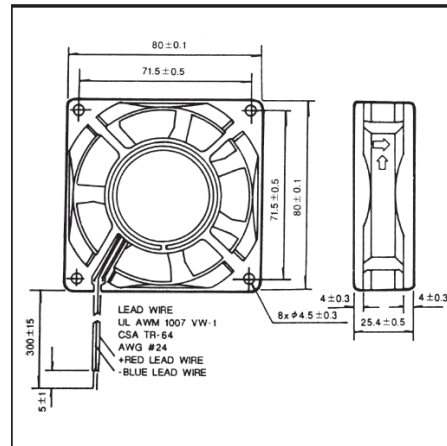
Fuente: <http://www.cic-commonwealth.com.tw>

Calculo de la velocidad en  $m/s$ :

$$V_{\text{ventilador}} = 3200 \text{ r. p. m.} \cdot \frac{\pi \cdot 120}{60000} = 20,096 \text{ m/s} \quad (4.55)$$

Se muestra a detalle en la figura 4.6.4.1.3 las dimensiones del equipo

DIMENSIONS:MM



SPECIFICATIONS

Figura 4.6.4.1.3 Dimensionamiento del ventilador de prueba

Fuente: <http://www.cic-commonwealth.com.tw>

#### 4.6.5 Diseño del compartimento de transformación

Para la construcción se tomó en cuenta los cálculos realizados anteriormente como la sección mínima de la rejilla, el flujo de aire necesario, pérdidas de potencia del transformador también se vio por conveniente la colocación del ventilador en la parte superior ya que el aire caliente es más denso según la ley de Gay Lussac.

También se utilizó un material lo suficientemente resistente para soportar el peso del ventilador y se pueda observar los respectivos ensayos (acrílico transparente) como se muestra la distribución en la figura 4.6.5.1.1. La ventilación es enfriamiento por succión de aire forzado.

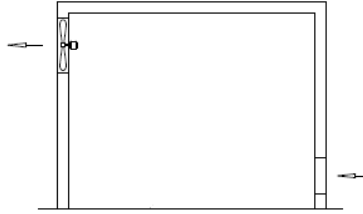


Figura 4.6.5.1.1 Cabina de transformación

Fuente: Elaboración propia

## 4.7 Equipamiento

Para el desarrollo se ha dispuesto de los siguientes equipos para el control del proceso de todo el sistema fabricados por las empresas Allen Bradley y Schneider Electric.

### 4.7.1 Controlador Lógico Programable

#### 4.7.1.1 Introducción

Un Controlador Lógico Programable, más conocido por sus siglas en inglés PLC (Programmable Logic Controller), es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas.

Los PLC son utilizados en muchas industrias y máquinas. A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Los programas para el control de funcionamiento de la máquina se suelen almacenar en baterías copia de seguridad o en memorias no volátiles.

Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real «duro», donde los resultados de salida deben ser producidos en respuesta a

las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado. [13]

#### **4.7.1.2 PLC: MicroLogix™1100/1763**

Es un equipo que contiene los componentes básicos y necesarios para el aprendizaje, manejo, adiestramiento y desarrollo proyectos de automatización industrial con Controladores Lógicos Programables, permitiendo el ahorro de tiempo y dinero cuando se trata de obtener prototipos.

El equipo mostrado en la figura 4.7.1.2.2.1.1 permite la carga de programas hacia el PLC y la comprobación del correcto funcionamiento del programa mediante la utilización de dispositivos reales conectados a las entradas y salidas, tanto digitales como analógicas. [14]

##### **4.7.1.2.1 Puerto de comunicación industrial**

Este equipo proporciona un puerto de comunicación serial RS-232/485 que deben de estar aterrados, además de un puerto Ethernet para la comunicación industrial hacia otros equipos de campo como sensores, actuadores, ordenadores.

##### **4.7.1.2.2 Características clave**

- Edición en línea.
- Puerto EtherNet/IP de 10/100 Mbps para transmisión de mensajes entre dispositivos similares.
- Puerto combinado RS-232/RS-485 aislado.
- Diez entradas digitales, dos entradas analógicas.
- Un contador de alta velocidad de 20 kHz incorporado (en los controladores con entradas de cc)

- Pantalla LCD incorporada para indicar el estado del controlador y de las E/Sy simple interface de operador para mensajes y monitoreo de bits/enteros y manipulación.
- Memoria de programa de usuario de 4 K palabras y memoria de datos de usuario de 4 K palabras.
- Hasta 128 K bytes para registro de datos y 64 K bytes para recetas
- Servidor de web incorporado. [14]



Figura 4.7.1.2.2.1.1 MicroLogix™ 1100

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/58123279/MicroLogix-1100-1763>

PRODUCT SPECIFICATIONS

MicroLogix 1100	1763-L16AWA	1763-L16BWA	1763-L16BBB	1763-L16DWD
Input Power	120/240V ac		24V dc	12V dc - 24V dc
Memory	non-volatile battery backed RAM			
User Program / User Data Space	4K / 4K			
Data Logging / Recipe Storage	Up to 128K bytes for data logging and up to 64K bytes for recipe (recipe memory subtracted from available data logging)			
Battery Back-up	Yes			
Back-up Memory Module	Yes			
Digital Inputs	Ten 120V ac	Six 24V dc, Four fast 24V dc		Six 12V dc / 24V dc, Four fast 12V dc / 24V dc
Analog Inputs	Embedded, two in local, with additional 1762 analog modules			
Digital Outputs	Six relay	Two relay, Two 24V dc FET, Two fast 24V dc FET		Six Relay
Serial Ports	One RS-232 / RS-485 Combo Port			
Serial Protocols	DF1 Full Duplex, DF1 Half Duplex Master/Slave, DF1 Radio Modem, DH-485, Modbus RTU Master/Slave, ASCII			
Ethernet Ports	One 10/100 port			
Ethernet Protocols	EtherNet/IP messaging only			
Trim Potentiometers	Two digital			
High-Speed Inputs (Pulse Catch)		Four @ 40kHz input (1ch)	Four @ 40 kHz input (1ch)	Four @ 40 kHz input (1ch)
Real Time Clock	Yes (embedded)			
PID	Yes (multiple loops only limited by program and stack memory)			
PWM /PTO		Two @ 40 kHz		
Dual Axis Servo control		Through embedded PTO		
Embedded LCD	Yes			
Floating Point Math	Yes			
Online Editing	Yes			
Operating Temperature	-20°C to +65°C (-4°F to +149°F)			
Storage Temperature	-40°C to +85°C (-40°F to +185°F)			

Figura 4.7.1.2.2.1.2 Especificaciones técnicas del MicroLogix™ 1100

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/58123279/MicroLogix-1100-1763>

#### 4.7.1.2.3 Característica Semimodular.



Figura 4.7.1.2.3.1.1 MicroLogix™ 1100 y sus módulos expansores

Fuente: <http://ab.rockwellautomation.com>

Se caracteriza por separar las E/S del resto del autómata, de tal forma que en un bloque compacto están reunidas las CPU, memoria de usuario o de programa y fuente de alimentación y separadamente las unidades de E/S.

Son los autómatas de gama media los que suelen tener una estructura semimodular (Americana) mostrado la distribución física en la figura 4.7.1.2.3.1.1

- Son más económicas que los PLC de tipo modular.
- La selección es sencilla ya que la CPU esta seleccionada.
- Soportan contingencias extremas de funcionamiento.
- Su programación es fácil, donde solamente se debe tener en cuenta el direccionamiento de las instrucciones, según la unidad de extensión a la que se refiere. [15]

#### 4.7.1.2.4 Entradas analógicas: MicroLogix™ 1100/L16BWD

El MicroLogix™ 1100 provee de dos entradas analógicas de 0 a 10Vdc con una resolución de 10 bit, a escala total no lineal de  $\pm 0.5\%$  y precisión de  $\pm 0.5\%$  en escala completa.

#### 4.7.2 Compact Power Supply: 1606-XLP30E

Este es un excelente fuente de alimentación conmutadas compactas ya que ahorran espacio, admiten aplicaciones de baja potencia.

Características de la serie:

- Incluye salidas nominales entre 15 ... 100 W (0,6 ... 4,2 A a 24 V CC)
- Ofrece múltiples tensiones de salida
- Ofrece múltiples entradas monofásicas y trifásicas para aplicaciones globales
- Proporciona una solución más pequeña y rentable para aplicaciones de baja potencia
- Proporciona módulos de redundancia para gestionar fuentes de alimentación duales para alimentación de respaldo. [17]

#### 4.7.3 Módulo de Salidas Digitales: 1762-OB8

Para el módulo mostrado en la figura 4.7.3.1.1 de 8 salidas digitales se tiene las siguientes posiciones de 0 a 7 bit correspondientes a los terminales de salida 0 a 7, también es conveniente recalcar algunas especificaciones relevantes como el retardo de señal en alto en 0.1ms y bajo en 1ms.



Figura 4.7.3.1.1 Módulo de Salidas Digitales

Fuente: <http://ab.rockwellautomation.com>

La resistencia de carga usual que se usan para limitar los efectos de la corrientes de fuga a través de las salidas de estado sólido pueden conectarse en paralelo con una resistencia recomendada de  $5,6k\Omega$  a  $\frac{1}{4}$  W para las salidas de transistor en 24Vdc. [16]

#### 4.7.4 Módulo de Entradas Analógicas: 1762-IF4

El módulo de entradas analógicas de 4 canales que pueden ser de corriente o voltaje según configuración física es mostrado en la figura 4.7.4.1.1, puede aplicarse en un entorno industrial siempre que se instale en un entorno limpio y seco. Mantiene una comunicación con otros módulos y el PLC con su conector bus con pines macho.



Figura 4.7.4.1.1 Módulo de Entradas Analógicas

Fuente: <http://ab.rockwellautomation.com>

##### 4.7.4.1 Selección del tipo de entrada

Seleccione el tipo de entrada, la corriente o el voltaje, mediante el selector situado en la tarjeta de circuitos del módulo y los bits de selección del tipo de entrada/rango. Se puede acceder al selector a través de las ranuras de ventilación que hay en la parte superior del módulo. [18]

La configuración predeterminada de fábrica para todos los selectores es Corriente. A continuación se muestran las posiciones del selector en la figura 4.7.4.1.1.1.

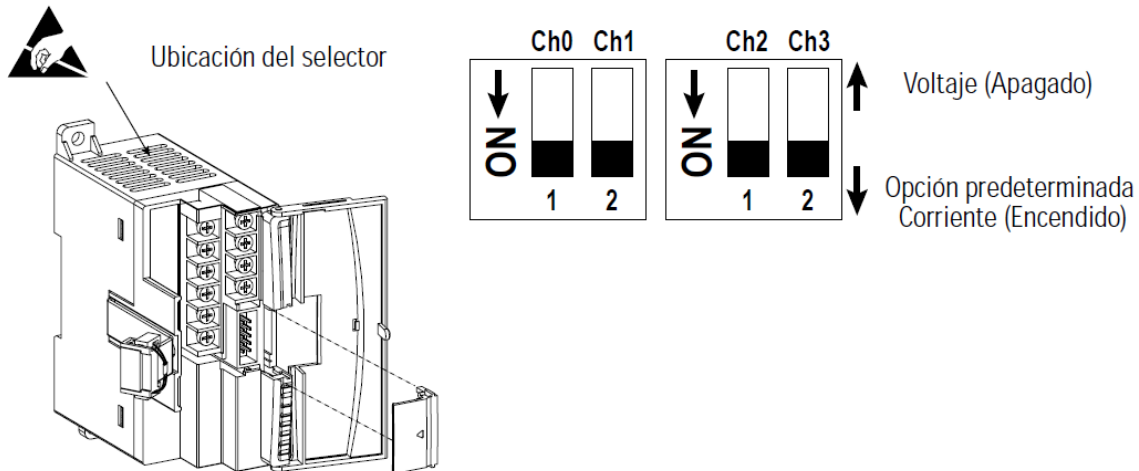


Figura 4.7.4.1.1.1 Configuración del módulo de entradas analógicas 1762-IF4

Fuente: <http://ab.rockwellautomation.com>

#### 4.7.4.2 Disposición del bloque de terminales

En la figura 4.7.4.2.1.1 se muestra el arreglo de los terminales analógicos, comunes conectados internamente.

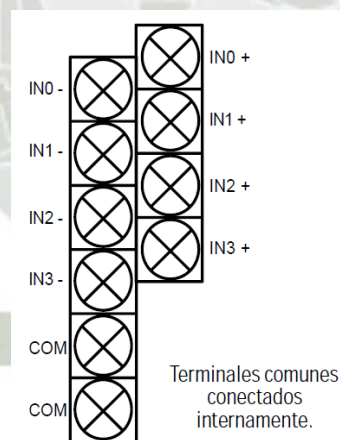


Figura 4.7.4.2.1.1 Distribución del bloque de terminales del módulo 1762-IF4

Fuente: <http://ab.rockwellautomation.com>

#### 4.7.4.3 Tipos de transmisores de detectores diferenciales

En la figura 4.7.4.3.1.1 se muestra la colocación de un sensor analógico en el módulo expensor 1762-IF4.

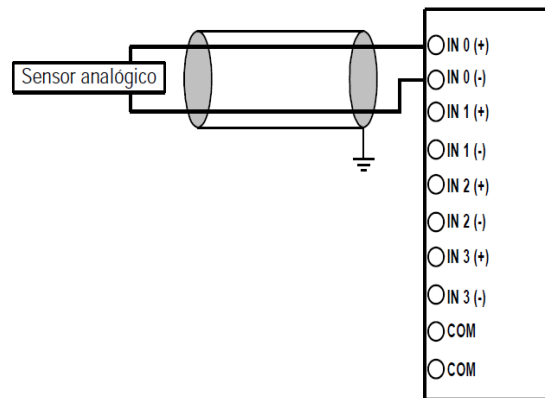


Figura 4.7.4.3.1.1 Distribución y colocación de un sensor analógico en el 1762-IF4

Fuente: <http://ab.rockwellautomation.com>

Normalmente, al conectar a tierra el blindaje del cable sólo por el extremo del módulo suele proporcionar suficiente inmunidad al ruido. Sin embargo, para conseguir los mejores resultados de blindaje del cable, podría conectar a tierra el blindaje por ambos extremos, usando un condensador de 0.01  $\mu\text{F}$  en un extremo para bloquear las corrientes de tierra de la alimentación de CA. [19]

#### 4.7.5 Cable Adaptador USB a Serie RS232

Este Convertidor de USB a serial mostrado en la figura 4.7.5.1.1, permite conectar un dispositivo serial RS-232 de su PC de escritorio o portátil. Con las siguientes características técnicas

- Marca: Trendnet.
- Modelo: TU-S9.

- Este Convertidor de USB a serial le permite conectar un dispositivo serial RS-232 de un módem a puerto USB en su PC de escritorio o portátil.
- Compatible con las especificaciones USB 1.1.
- Admite interfaz serial RS-232.
- Admite hasta una transferencia de datos de 6 Mbps.
- Detecta una condición de suspensión USB.
- Se instala como un puerto COM de Windows estándar, señales de control de módem Full RS-232, señales de datos RS-232; TxD, RxD, RTS, CTS, DSR, DTR, DCD, RI, GND.
- Ofrece buffers dobles para la transferencia de datos ascendente y descendente.
- Admite modo de conexión "handshake" automático.
- Impulsado por puerto USB. No requiere un adaptador de alimentación externo.
- Instalación "Plug and Play" sencilla. [20]



Figura 4.7.5.1.1 Convertidor de USB a serial RS232

Fuente: [www.trendnet.com](http://www.trendnet.com)

#### 4.7.6 Relay de Estado Sólido 25A / 380V (3 – 32VDC)

Un relé de estado sólido (SSR) mostrado en la figura 4.7.6.1.1 es sólo lo que suena; un IC que actúa como un relé mecánico. Ellos le permiten controlar cargas de alta tensión de los circuitos de control de tensión inferior. Relés de estado sólido, tienen varias ventajas sobre los relés mecánicos.

Una de tales ventajas es que pueden ser conmutados por un voltaje mucho menor y con una corriente mucho menor que la mayoría de los relés mecánicos. Además, debido a que no hay contactos móviles. Los relés de estado sólido pueden conmutar mucho más rápido y durante mucho más tiempo sin tener que reemplazarlos.

Logran esto mediante el uso de luz infrarroja como el "contacto", un relé de estado sólido es realmente sólo un LED IR y un Phototriac sellado en una pequeña caja. Gracias al hecho de que los dos lados del relé son foto-acoplados, puede confiar en el mismo tipo de aislamiento eléctrico como en relés mecánicos. Estos relés de estado sólido particulares pueden interrumpir 380VAC y 25A.

##### ***Especificaciones:***

- Larga vida útil y una alta fiabilidad
- Altamente fiable y compacto de tamaño
- Diseñado para ofrecer a los usuarios la máxima simplicidad
- Conmutación rápida
- Voltaje de salida: 24 a 380 VAC
- Corriente de salida: 24A
- Tensión de entrada: 3 - 32 VDC
- Método de control: CC a CA
- Método de montaje: pernos fijos
- Tiempo de conmutación:  $\leq$  ms t10. [21]



Figura 4.7.6.1.1 Relé de estado sólido (SSR – 25 DA)

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

#### 4.7.7 Led Blink Power Supply: A – 15W – 5

Con el desarrollo de la tecnología electrónica en la distribución de la energía, los equipos electrónicos tienen una estrecha relación con el trabajo de las personas y su vida. Como sabemos, la fuente de alimentación de conmutación confiable es el kit necesario para equipos electrónicos.

Se trata de un nuevo estilo de fuente de alimentación de conmutación que puede mantener la estabilidad del voltaje y esta mostrado en la figura 4.7.7.1.1 Está hecho de material de alta calidad, duradero y de seguro para su uso. No sólo eso, estas fuentes ha sido utilizada en la iluminación del LED, el equipo de comunicación, y el equipo electrónico, bajo ruido y alta confiabilidad.

#### **Especificaciones:**

1. Entrada: AC110-240V 50/60Hz
2. Salida: DC 5V 3A

3. Potencia: 15W
4. Protección: Sobre carga / Sobre Voltaje / Corto Circuito
5. Material: Metálico
6. Peso: 74g
7. Color: Plateado
8. Dimensiones: (58 x 84 x 32)mm / (2.28 x 3.30 x 1.25)pulgadas



Figura 4.7.7.1.1 Fuente de poder de 5V DC – 3A – 15W

Fuente: <https://es.aliexpress.com/item/Switching-mode-ac-dc-5v-3a-15w-power-supply-5v-led-driver-DC5V-Aluminum-AC-110V/32786496446.html>

#### 4.8 BOOTP/DHCP Server

Esta es una herramienta opcional que no se utilizará en el desarrollo de esta investigación para configurar el MicroLogix 1100 cuando queremos conectarnos vía Ethernet y designar la dirección IP es el BOOTP / DHCP Server. Mediante el uso del RSLinx y mantener comunicación entre el MicroLogix 1100 y nuestro ordenador. Necesitamos desactivar temporalmente nuestro Firewall, redes externos que se estén ejecutando.

Utilizamos la dirección MAC del ordenador, la dirección MAC es la identificación única de cada equipo que tenga una tarjeta de red. La configuración la basamos en la máscara subred, el programa escaneara en busca de todos los equipos que hayan dentro de esta subred.

Nos dirigimos al menú de Inicio visto en la Figura 4.8.1.1. Luego (Panel de Control) luego (Conexiones de red) después (Conexiones de Área local)



Figura 4.8.1.1 Ventana de Inicio de Windows XP  
Fuente: Programa Microsoft Windows XP

Nos aparece la pantalla (Propiedades de Conexión Área local), visto en la figura 4.8.1.2, nos vamos a pestaña (Protocolo de Internet (TCP/IP))

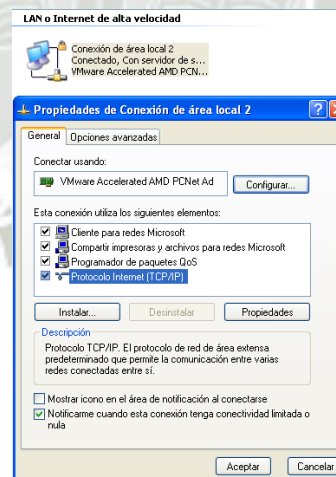


Figura 4.8.1.2 Conexiones de red del panel de control  
Fuente: Conexiones de red del ordenador

En este le damos clic derecho y elegimos (Propiedades de Protocolo de Internet (TCP/IP)) visto en la figura 4.8.1.3.

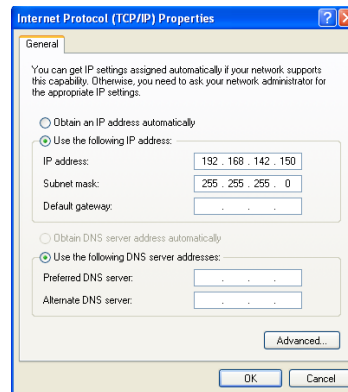


Figura 4.8.1.3 Propiedades de Protocolo de Internet (TCP/IP)

Fuente: Conexiones de área local del ordenador

Configuramos con las siguientes direcciones:

Dirección IP: 192.168.142.150

Mascara de Subred: 255.255.255.0

Como mínimo se configura la Máscara de subred, todos los equipos que encuentre mostrara su dirección MAC y como servidor DHCP podemos asignarle la IP que nos interese. Ingresamos al Programa BOOTP / DHCP Server visto en la figura 4.8.1.4.

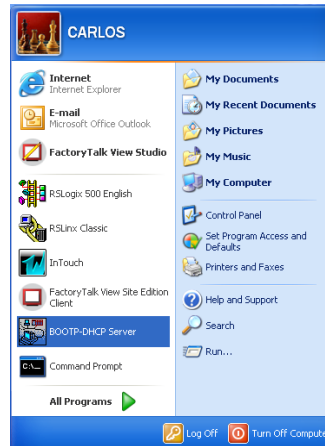


Figura 4.8.1.4 Ventana de Inicio de Windows XP

Fuente: Programa Microsoft Windows XP

En la figura 4.8.1.5 podemos encontrar nuestro PLC, lo próximo que debemos hacer es crear una nueva entrada, donde relacionaremos la dirección MAC encontrada con la dirección IP que nosotros asignemos. Para este caso será.

Dirección IP: 192.168.142.170

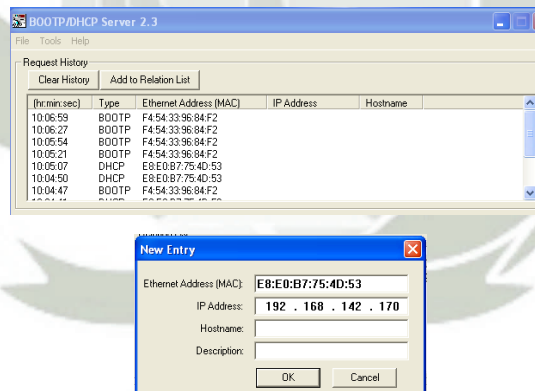


Figura 4.8.1.5 Configuración y asignación de IP al MicroLogix 1100

Fuente: Programa BOOTP / DHCP Server 2.3

Para encontrar la dirección MAC del PLC nos dirigimos a las teclas del cursor (ESC) después seleccionamos en el navegador (Advance Set) seleccionamos (OK) seleccionamos en el navegador (ENET Cfg) y encontramos la dirección como muestra en la figura 4.8.1.6.

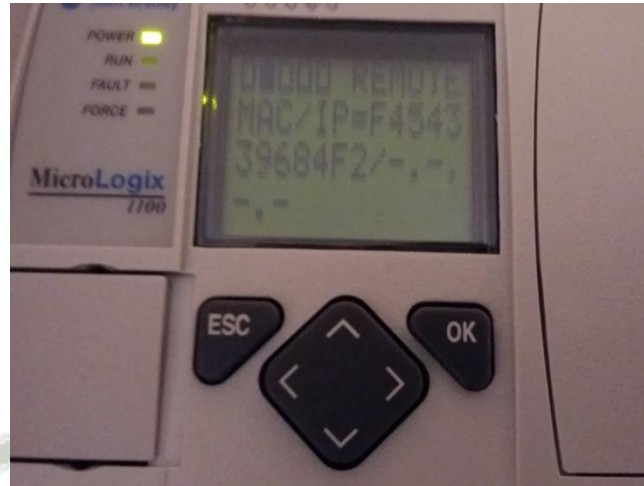


Figura 4.8.1.6 Dirección MAC del MicroLogix 1100

Fuente: Elaboración Propia

Una vez asignada la dirección IP con los pasos mostrados anteriormente a nuestro MicroLogix1100 procedemos a comprobar la escritura de nuestro IP en el panel externo como se muestra en la figura 4.8.1.7.



Figura 4.8.1.7 Asignación de una dirección IP al MicroLogix 1100

Fuente: Elaboración Propia

Para la configuración serial RS232 seguiremos los siguientes pasos. Seleccionamos en la ventana del menú la opción (Communications) la opción configurar driver (Configure Drivers), después damos clic en añadir nuevo (Add New) seleccionamos la opción RS232 DF1 devices mostrado en la figura 4.8.1.8.

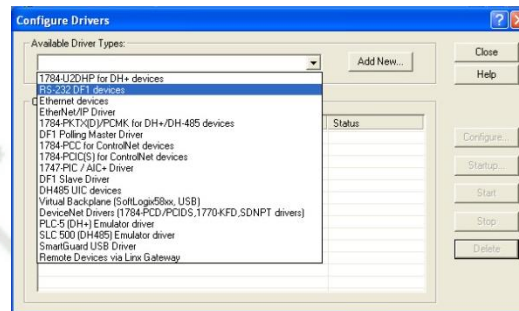


Figura 4.8.1.8 Asignación de una dirección IP al MicroLogix 1100  
Fuente: Programa RSLinx

Después necesitamos escoger un nombre para un controlador nuevo que no sobre pase los 15 caracteres, lo dejamos por defecto y hacemos clic en el botón OK visto en la figura 4.8.1.9.

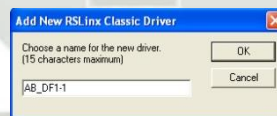


Figura 4.8.1.9 Añadir un nuevo controlador de RSLinx  
Fuente: Programa RSLinx

Con esto nos aparece la ventana (Configure RS-232 DF1 Devices) en donde tenemos que seleccionar el puerto que comunicación que se está usando. La tasa de baudios (Baud Rate) que puede ser de 19200. Pariedad (Parity) que puede ser ninguna. Bit de parada (Stop Bits) que puede ser una unidad, como se muestra en la figura 4.8.1.10.



Figura 4.8.1.10 Configuración de un dispositivo RS-232 DF1

Fuente: Programa RSLinx

Pero también tenemos la posibilidad de autoconfiguración que nos ayudará a una mejor y más rápida configuración (Auto-Configure) pero es de utilidad saber en qué puerto serial le asigno por defecto nuestro ordenador al conversor USB-RS232. Cuando se realiza esta acción nos aparece el mensaje (Auto Configuration Successful) y finalmente clic en OK, como se muestra en la figura 4.8.1.11.

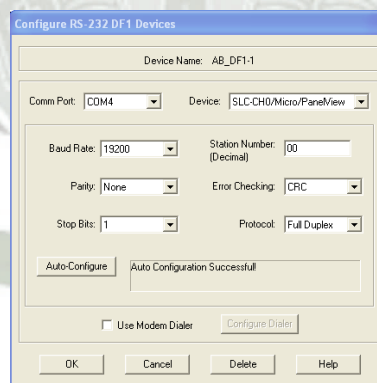


Figura 4.8.1.11 Autoconfiguración utilizando protocolo de comunicación RS-232

Fuente: Programa RSLinx

En la figura 4.8.1.12 se muestra la venta (RSLink Classic Gateway – RSWho – 1) en donde los drivers configurados para el módulo de comunicación serial y para el ordenador, se ha detectado el PLC.

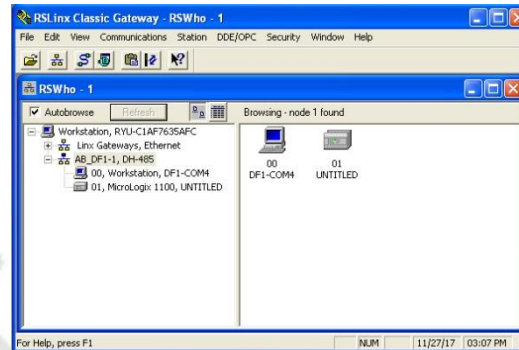


Figura 4.8.1.12 RSLinx con el driver configurado y habilitado del módulo serial del PLC MicroLogix 1100  
Fuente: Programa RSLinx

#### 4.9 Configuración del PLC MicroLogix 1100 para su programación

En la figura 4.9.1.1 se muestra la comunicación entre el PLC MicroLogix 1100 y el ordenador utilizando una conexión serial

Debemos recordar que nuestro MicroLogix 1100 tiene disponible varios protocolos de comunicación pero estableceremos una conexión serial en este proyecto de investigación con el ordenador que permita un correcto funcionamiento. En la siguiente figura se muestra la arquitectura de conexión entre el PLC y el ordenador.

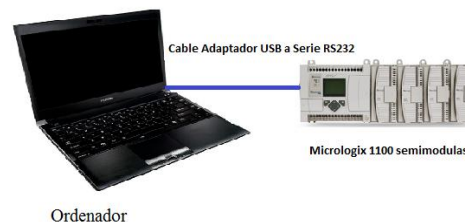


Figura 4.9.1.1 Protocolo de comunicación entre MicroLogix 1100 y el ordenador  
Fuente: Elaboración Propia

Vamos a usar sensores y actuadores que interactuaran con el PLC MicroLogix 1100 entonces configuraremos los módulos de entradas analógicas y salidas digitales anterior mete descritas para controlar los procesos de temperatura y velocidad.

Entonces usaremos el RSLogix500 English (se encuentra dentro de la lista del programa Rockwell), clic en File (New) aparece la ventana (Select Processor Type) como se muestra en la figura 4.9.1.2.

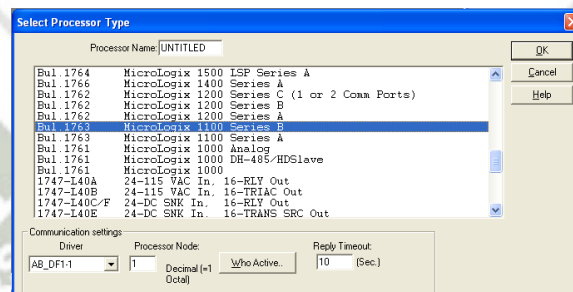


Figura 4.9.1.2 Selección del tipo de procesador para el MicroLogix 1100

Fuente: Programa RSLogix 500

Luego seleccionamos el tipo de procesador que le corresponde a nuestro PLC, debemos tomar en cuenta la serie de nuestro equipo ya que es importante para configurar los módulos expansores que utilizemos (Bul. 1763 MicroLogix 1100 Series B) seleccionamos el driver correspondiente, después click en OK, mostrado de la figura 4.9.1.3.

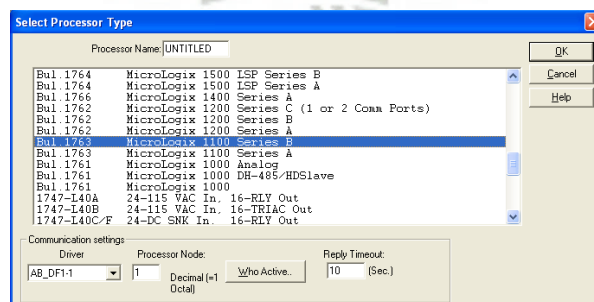


Figura 4.9.1.3 Selección del driver para el MicroLogix 1100

Fuente: Programa RSLogix 500

Finalmente ya podemos comenzar a programar en el entorno del aplicativo RSLogix500 English. Mostrado de la figura 4.9.1.4.

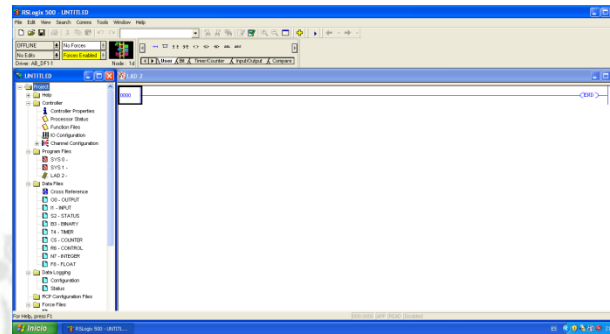


Figura 4.9.1.4 Entorno de programación para el MicroLogix 1100

Fuente: Programa RSLogix 500

#### 4.10 Configuración de módulos expansores

Para esto nos dirigimos a la ventana (Project) después a la carpeta (Controller) damos un clic a (IO Configuration) dentro de ella notamos que el PLC se encuentra visible (Bul.1763 MicroLogix 1100 Serie B) también podemos ver todos los módulos externos disponibles para este modelo, como es mostrado en la figura 4.10.1.1.

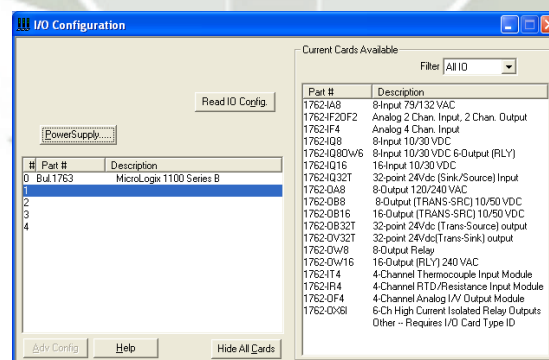


Figura 4.10.1.1 Configuración de entradas y salidas

Fuente: Programa RSLogix 500

Ahora le damos clic a (Read IO Config.) nos encontramos en (Red IO Configuration from Online Processor) donde podemos configurar el controlador que necesitamos, como se muestra en la figura 4.10.1.2.

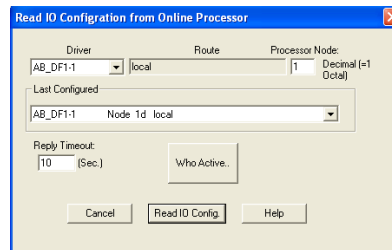


Figura 4.10.1.2 Configuración de driver del módulo expensor requerido

Fuente: Programa RSLogix 500

Le damos a (Read IO Config.) finalmente nos observamos que ya contamos con los módulos externos (1762-OB8 8-Output (TRANS-SRC) 10/50 VDC) y (1762-IF4 Analog 4 Chan. Input), como es mostrado en la figura 4.10.1.3.

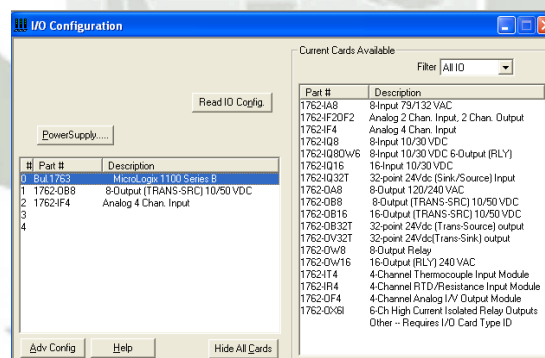


Figura 4.10.1.3 Módulos externos y controlador lógico programable habilitados

Fuente: Programa RSLogix 500

Podemos encontrar las nuevas entradas analógicas en la carpeta (Data Files) después (I1 – Input) en la pestaña (Radix) seleccionamos (Decimal), como se muestra en la figura 4.10.1.4.

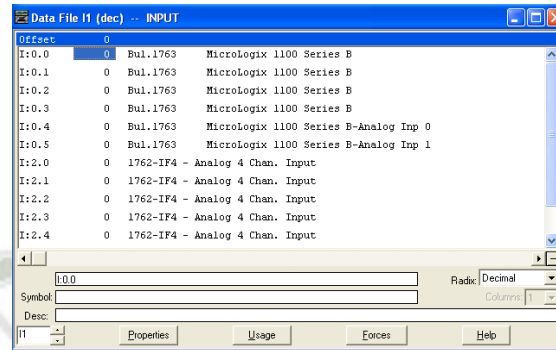


Figura 4.10.1.4 Entradas analógicas del módulo externo habilitado

Fuente: Programa RSLogix 500

Podemos encontrar las nuevas salidas digitales con niveles de tensión de 0 – 10/50VDC en (O0 –OUTPUT) en la pestaña (Radix) seleccionamos (Decimal), como se muestra en la figura 4.10.1.5.

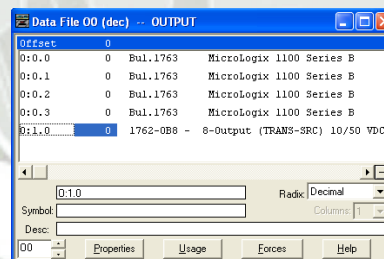


Figura 4.10.1.5 Salidas digitales del módulo externo habilitado

Fuente: Programa RSLogix 500

#### 4.11 Código de control Ladder en RSlogix500

En la línea 0000 se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor del registro F8:0 con un rango de entrada de 0 a 100 (es el rango de medición lineal del sensor de temperatura) a un rango escalado de 0 a 16383 y se guarda en el registro N7:0

CONTROL DE TEMPERATURA		
0000	SCP	
	Scale w/Parameters	
	Input	F8:0
		29.61445<
	Input Min.	0.0
		0.0<
	Input Max.	100.0
		100.0<
	Scaled Min.	0.0
		0.0<
Scaled Max.	16383.0	
	16383.0<	
Output	N7:0	
	4851<	

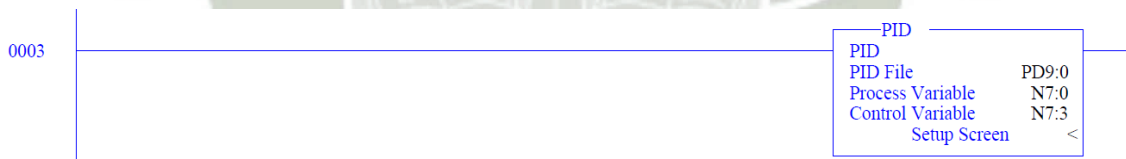
En la línea 0001 se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor de entrada I:2.0 con un rango de entrada de -468.0 a 17011 (es el rango de medición lineal del sensor de temperatura) a un rango escalado de -3.0 a 103.0 (es el valor en grados centígrados de la temperatura) y esta se guarda en el registro F8:0

0001	SCP	
	Scale w/Parameters	
	Input	I:2.0
		4907<
	Input Min.	-468.0
		-468.0<
	Input Max.	17011.0
		17011.0<
	Scaled Min.	-3.0
		-3.0<
Scaled Max.	103.0	
	103.0<	
Output	F8:0	
	29.61445<	

En la línea 0002 se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor de entrada del registro N7:2 con un rango de entrada de 0 a 100 (es el rango del set point) a un rango escalado de 0 a 16383 y esta se guarda en el registro PD9:0.SPS



En la línea 0003 se tiene el bloque de función PID, donde se aplica la función de bloque PD9:0, para controlar el lazo cerrado externo, tiene como variable de proceso el registro N7:0(registro que sirve para guardar la medición del sensor de temperatura) y como variable de control el registro N7:3, este registro se usa como el set point para los bloques PD9:1 (nombrado como bloque PID esclavo).



En la línea 0004 se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor del registro N7:3 con un rango de entrada de 0 a 16383 (es el rango de datos de salida de la respuesta PID maestro) a un rango escalado de 0 a 16383 y se guarda en el registro N7:4

0004	—SCP	
	Scale w/Parameters	
	Input	N7:3
		0<
	Input Min.	0
		0<
	Input Max.	16383
		16383<
	Scaled Min.	0
		0<
Scaled Max.	100	
	100<	
Output	N7:4	
	0<	

En la línea 0006 se tiene el bloque de función MUL (para multiplicar el valor del registro N7:4 con un dato entero 1) y se envía a T4:0.PRE

0006	—MUL	
	Multiply	
	Source A	N7:4
		0<
	Source B	1
		1<
Dest	T4:0.PRE	
	0<	

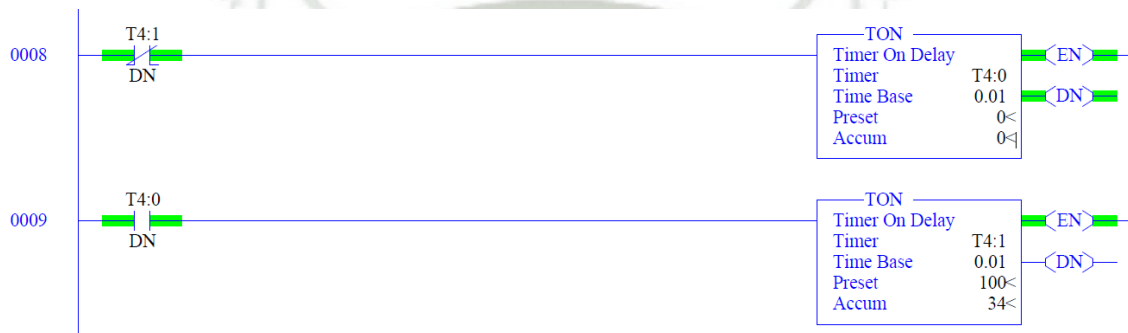
En la línea 0007 se tiene el bloque de función SUB (para restar un dato entero de valor 100 con el registro T4:0.PRE) y se envía a T4:1.PRE

0007	—SUB	
	Subtract	
	Source A	100
		100<
	Source B	T4:0.PRE
		0<
	Dest	T4:1.PRE
	100<	

En la línea 0008 se tiene un temporizador T4:0 (Temporizador que contiene el dato del registro N7:4 al ser multiplicado por una unidad) y esta se encuentra un valor preestablecido T4:0.PRE, cuando el conteo llegue a este valor se habilita el contacto DN como consecuencia se abre el contacto del temporizador T4:1 que se encuentra en estado normalmente cerrado.

En la línea 0009 se tiene un temporizador T4:1 (Temporizador que contiene el dato de la resta entre cien menos T4:0.PRE) y este resultado se encuentra en el valor preestablecido T4:1.PRE, cuando el conteo llegue a este valor se habilita el contacto DN como consecuencia se cierra el contacto del temporizador T4:0 que se encuentra en estado normalmente abierto.

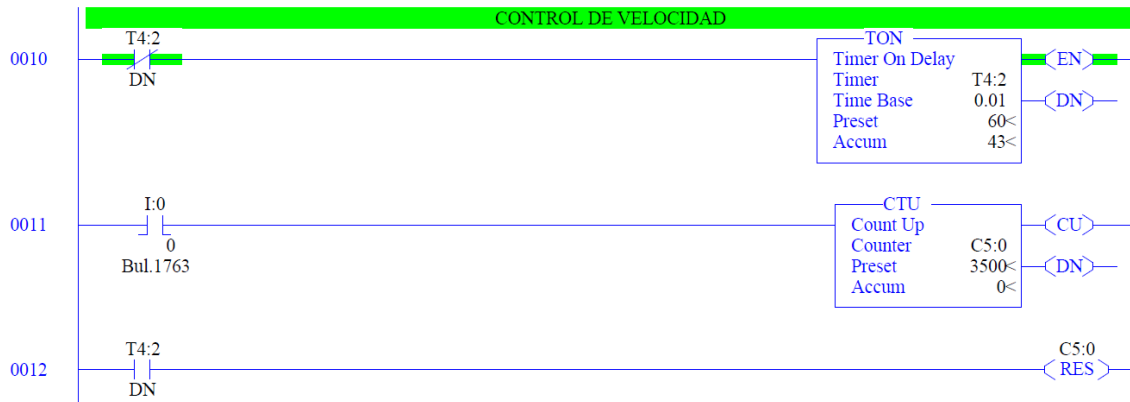
Con esta lógica vamos a generar la señal PWM que controle la temperatura del ambiente de la cabina de transformación.



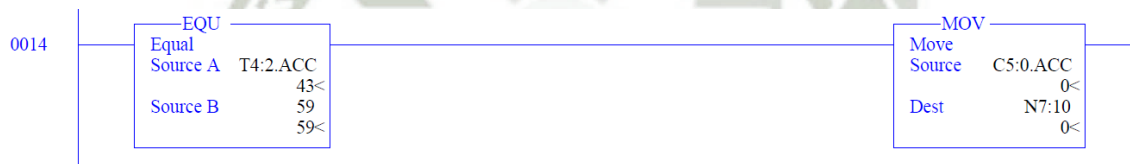
En la línea 0010 se tiene un temporizador T4:2 (Temporizador que se utiliza para generar un temporización con una base de tiempo de 0.01) y T4:2.PRE esta se encuentra configurada con un valor preestablecido de 60.

En la línea 0011 se tiene I:0/0 (es la entrada de señal de pulsos del circuito acondicionador de RPM), esta entrada es la responsable del incremento de Accum a un valor preestablecido de 3500.

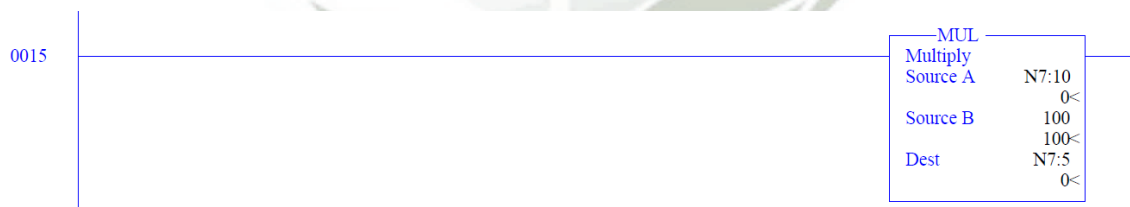
Cuando se cumpla la temporización se habilita el contacto DN como consecuencia se abre y se cierra los contactos del temporizador T4:2.DN respectivamente con esto se habilita RES (reinicia C5:0) y (comienza otra vez el temporización).



En la línea 0014 se tiene el bloque de función EQU (para comparar un dato entero de valor 59 con el registro T4:2.ACC) cuando se cumple esa condición el bloque de función MOV se habilita y C5:0.ACC (mueve el dato que tiene en ese instante de tiempo a N7:10)



En la línea 0015, se tiene el bloque de función MUL (para multiplicar un dato entero de valor 100 con el registro N7:10) y se guarda en el registro N7:5



En la línea 0017 se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor de entrada del registro N7:4 con un rango de entrada de 0 a 100 (es el rango del set point) a un rango escalado de 0 a 16383 y esta se guarda en el registro PD9:1.SPS

0017

SCP	
Scale w/Parameters	
Input	N7:4
Input Min.	0<
Input Max.	100<
Scaled Min.	0<
Scaled Max.	16383<
Output	PD9:1.SPS
	0<

En la línea 0018 se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor del registro N7:5 con un rango de entrada de 0 a 3500 (es el rango de datos de salida de la respuesta PID esclavo) a un rango escalado de 0 a 16383 y se guarda en el registro N7:6

0018

SCP	
Scale w/Parameters	
Input	N7:5
Input Min.	0<
Input Max.	3500<
Scaled Min.	0<
Scaled Max.	16383<
Output	N7:6
	0<

En la línea 0019 se tiene el bloque de función PID, donde se aplica la función de bloque PD9:1, para controlar el lazo cerrado interno, tiene como variable de proceso el registro N7:6 (registro que sirve para guardar la medición del sensor de medición RPM) y como variable de control el registro N7:7, este registro se usa como salida.

0019

PID	
PID	
PID File	PD9:1
Process Variable	N7:6
Control Variable	N7:7
Setup Screen	<

En la línea 0020 se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor del registro N7:7 con un rango de entrada de 0 a 16383 (es el rango

de datos de salida de la respuesta PID maestro) a un rango escalado de 0 a 16383 y se guarda en el registro N7:8

0020	—SCP	
	Scale w/Parameters	
	Input	N7:7 1451<
	Input Min.	0 0<
	Input Max.	16383 16383<
	Scaled Min.	0 0<
	Scaled Max.	100 100<
	Output	N7:8 9<

En la línea 0022 se tiene el bloque de función MUL (para multiplicar el valor del registro N7:8 con un dato entero 1) y se envía a T4:3.PRE

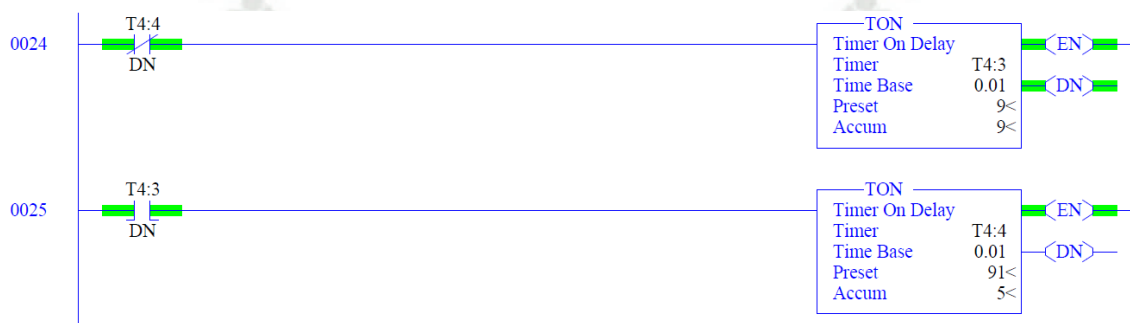
En la línea 0023 se tiene el bloque de función SUB (para restar un dato entero de valor 100 con el registro T4:3.PRE) y se envía a T4:4.PRE

0022	—MUL	
	Multiply	
	Source A	N7:8 9<
	Source B	1 1<
	Dest	T4:3.PRE 9<
0023	—SUB	
	Subtract	
	Source A	100 100<
	Source B	T4:3.PRE 9<
	Dest	T4:4.PRE 91<

En la línea 0024 se tiene un temporizador T4:3 (Temporizador que contiene el dato del registro N7:8 al ser multiplicado por una unidad) y esta se encuentra un valor preestablecido T4:3.PRE, cuando el conteo llegue a este valor se habilita el contacto DN como consecuencia se abre el contacto del temporizador T4:4 que se encuentra en estado normalmente cerrado.

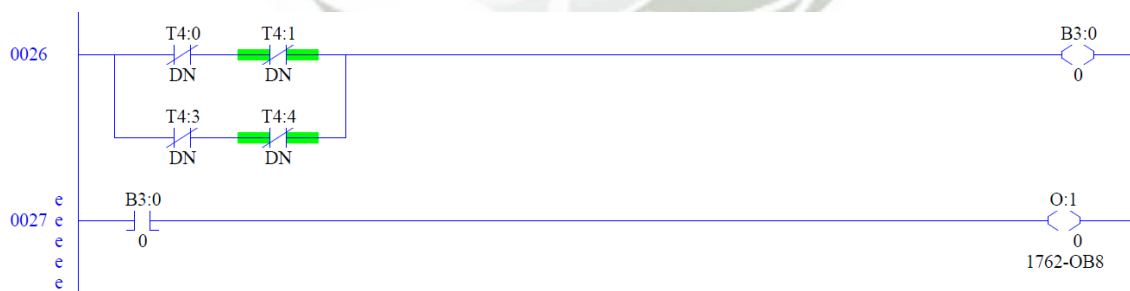
En la línea 0025 se tiene un temporizador T4:4 (Temporizador que contiene el dato de la resta entre cien menos T4:3.PRE) y este resultado se encuentra en el valor preestablecido T4:4.PRE, cuando el conteo llegue a este valor se habilita el contacto DN como consecuencia se cierra el contacto del temporizador T4:3 que se encuentra en estado normalmente abierto.

Con esta lógica vamos a generar la señal PWM que controle la velocidad del ventilador.

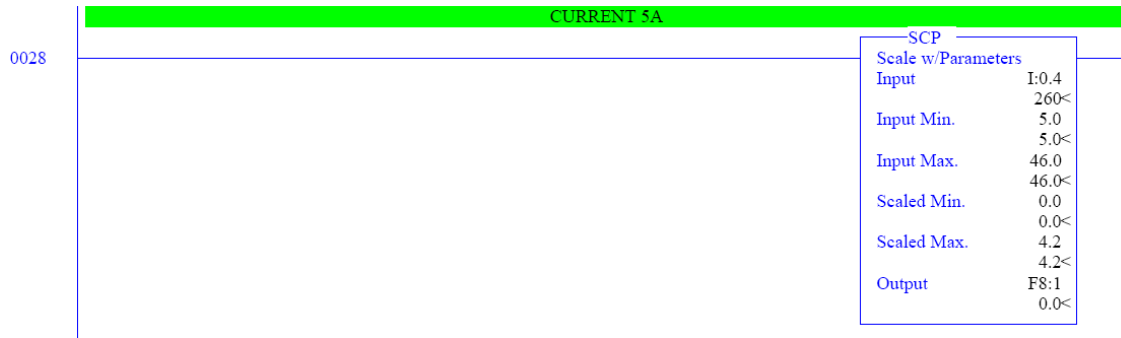


En la línea 0026, el estado de los contactos de temporización de T4:0/DN y T4:1/DN como T4:3/DN y T4:4/DN (son los temporizadores que generan las señales PWM) y esta va a la memoria B3:0/0.

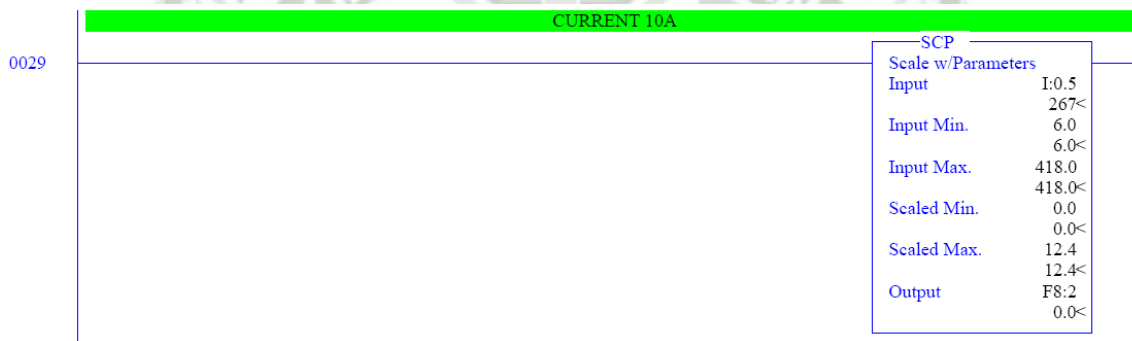
En la línea 0027, se tiene el contacto B3:0/0 para activar la salida O:1.0 (esta salida controla la velocidad del ventilador y la temperatura)



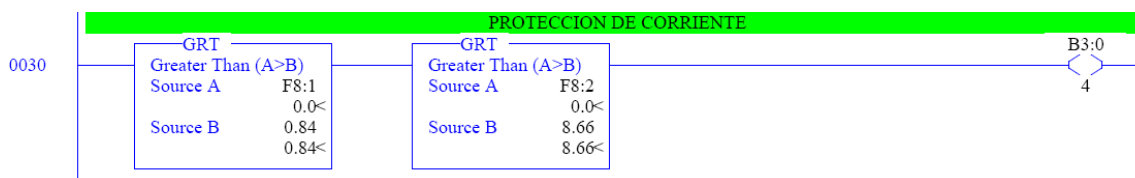
En la línea 0028, se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor de I:0.4 con un rango de entrada de 5.0 a 46.0 (es el rango de datos de salida del sensor de corriente de 0 a 5A) a un rango escalado de 0 a 4.2 y se guarda en el registro F8:1



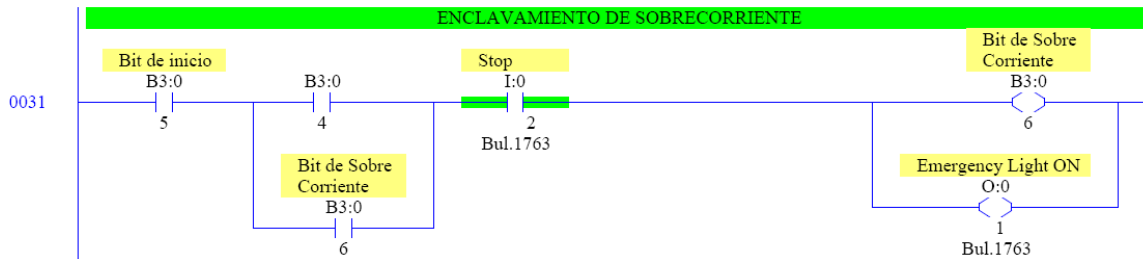
En la línea 0029, se tiene el bloque de función SCP para escalar el valor de I:0.5 con un rango de entrada de 6.0 a 418.0 (es el rango de datos de salida del sensor de corriente de 0 a 10A) a un rango escalado de 0 a 12.4 y se guarda en el registro F8:2



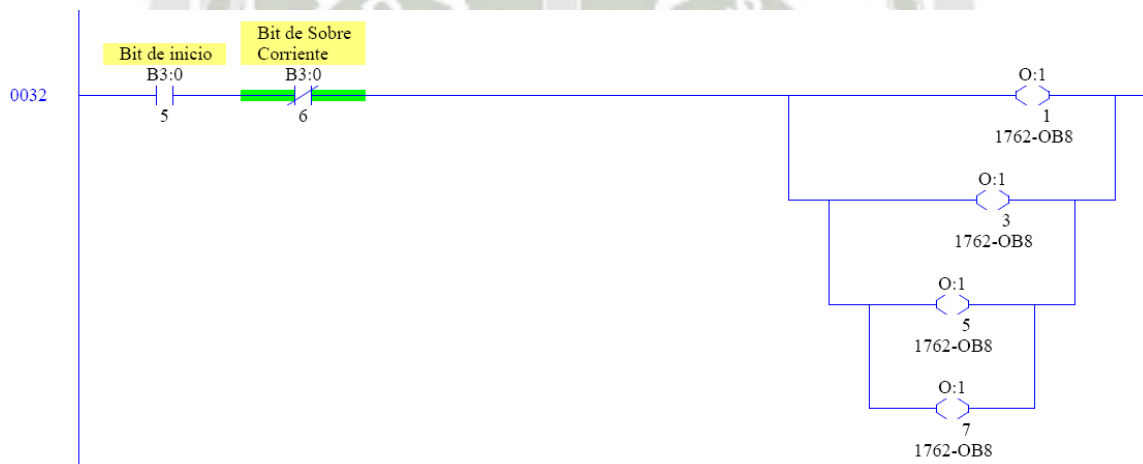
En la línea 0030, se tiene un bloque de funciones GRT para comparar el valor del registro F8:1 con el dato 0,84 (es el valor de corriente nominal del lado primario del transformador de prueba), y también se tiene otro bloque de funciones GRT para comparar el valor del registro F8:2 con el dato 8,66 (es el valor de corriente nominal del lado secundario del transformador de prueba)



En la línea 0031, B3:0/4 y B3:0/5 (son los Bits que enclava y enciende las iluminación de sobrecorriente)



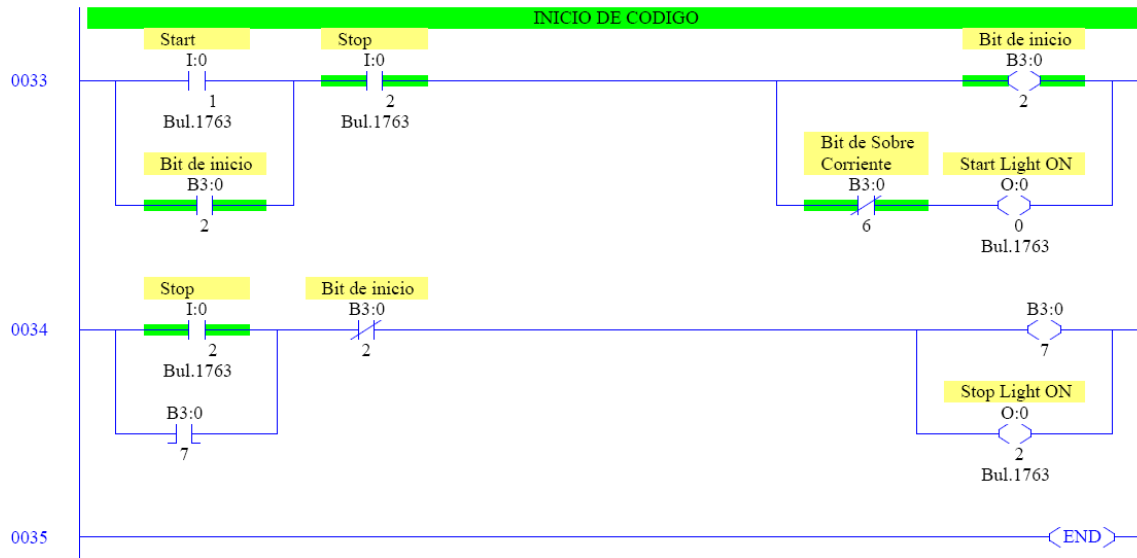
En la línea 0032, B3:0/6 y B3:0/5 (son los Bits de habilitación de los relés de operación)



En la línea 0033, I:0/1 y I:0/2 (Entradas digitales de inicio y parada del programa), B3:0/2 y O:0/0 (contactos de comienzo de programa e iluminación de inicio)

En la línea 0034, I:0/2 y B3:0/2 (Entrada digital de parada y bit de inicio), O:0/2 y B3:0/7 (contactos de enclavamiento e iluminación de parada)

En la línea 0035, para cerrar el programa Ladder y reinicio de la misma.



Luego de finalizar el programa se tiene como resultado la siguiente tabla 4.11.1.1 en donde se tienen todas las entradas, salidas y más elementos del programa ladder desarrollado con sus descripciones.

ELEMENTOS DEL PROGRAMA LADDER CON EL PLC MICROLOGIX 1100	ELEMENTOS
Entrada de pulsos generado por el sensor de RPM	Entrada Discreta I:0/0
Pulsador del módulo para la inicio del proceso	Entrada Discreta I:0/1
Pulsador del módulo para la parada del proceso	Entrada Discreta I:0/2
Recepciona la señal medida (de 4mA a 20mA) del sensor temperatura	Entrada Analógica I:2/0
Recepciona la señal medida (de 0 a 10V DC) del sensor corriente	Entrada Analógica I:0/4
Recepciona la señal medida (de 0 a 10V DC) del sensor corriente	Entrada Analógica I:0/5

Indicador verde para la arranque del proceso	Salida Discreta O:0/0
Indicador amarillo para la alarma del proceso	Salida Discreta O:0/1
Indicador rojo para la parada del proceso	Salida Discreta O:0/2
Control de L1	Salida Discreta O:1/1
Control de L2	Salida Discreta O:1/3
Control de L3	Salida Discreta O:1/5
Control de L1 del lado secundario del transformador	Salida Discreta O:1/7
Salida de señal PWM	Memoria de bit B3:0/0
Habilitación de inicio	Memoria de bit B3:0/2
Indicador que activa la hélice	Memoria de bit B3:0/3
Protección de sobre corriente	Memoria de bit B3:0/4
Bit de Inicio	Memoria de bit B3:0/5
Habilitación de sobre corriente	Memoria de bit B3:0/6
Enclavamiento de iluminación de parada	Memoria de bit B3:0/7
Variable del proceso de PID maestro	Memoria de valor entero N7:0
Registro donde se encuentra el dato de temperatura en el rango de 0.0 a 100.0	Memoria de valor flotante F8:0
Controlador del bloque PID (maestro)	Bloque PD9:0
Controlador del bloque PID (esclavo)	Bloque PD9:1

Registro de valor consigna del bloque PD9:0	Registro PD9:0.SPS
Registro de valor consigna del bloque PD9:1	Registro PD9:1.SPS
Temporización de 0 segundos	T4:0 Temporizador
Temporización de 100 segundos	T4:1 Temporizador
Temporización de 60 segundos	T4:2 Temporizador
Temporización de 0 segundos	T4:3 Temporizador
Temporización de 100 segundos	T4:4 Temporizador
Registro del temporizador para generar una señal PWM	Registro T4:0/DN
Registro del temporizador para generar una señal PWM	Registro T4:1/DN
Registro del temporizador para activar C5:0 (RES)	Registro T4:2/DN
Registro del temporizador para generar una señal PWM	Registro T4:3/DN
Registro del temporizador para generar una señal PWM	Registro T4:4/DN

Tabla 4.11.1 Elementos del programa LADDER

Fuente: Elaboración propia

Se ha concluido con el programa necesario para el sistema de control cascada para el control de temperatura y velocidad del prototipo de prueba con su respectiva protección eléctrica.

#### 4.12 Sistema de supervisión y SCADA

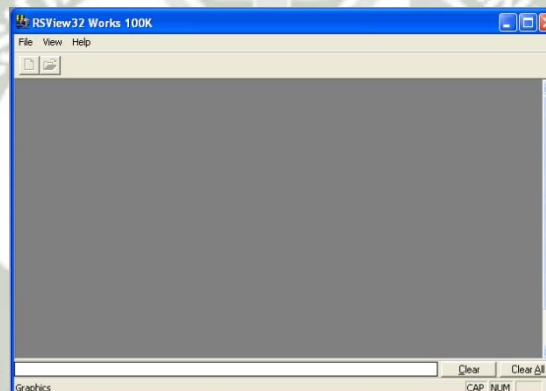
Vamos a desarrollar el SCADA, supervisión, control de acciones necesarias acorde a los requerimiento que son conveniente para esto utilizamos el Software RSview32 estableciendo una comunicación serial

RS232 con el ordenador y con este obtener visualmente las variables a controlar, alarmas, estado de iluminarias, mediciones, etc.

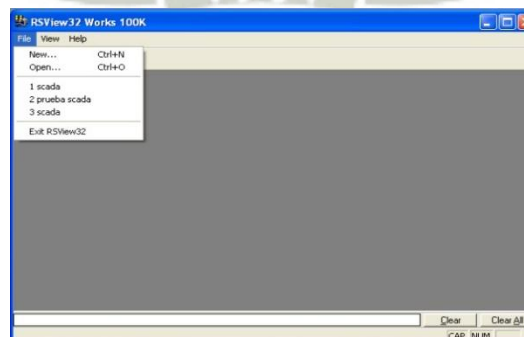
Damos clic a inicio (RSView Works)



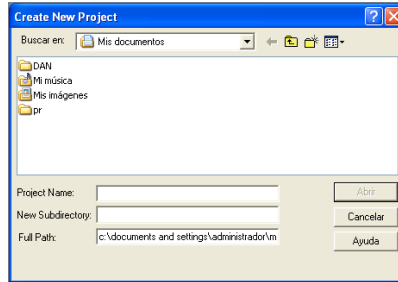
Se abre el entorno de programación, configuración



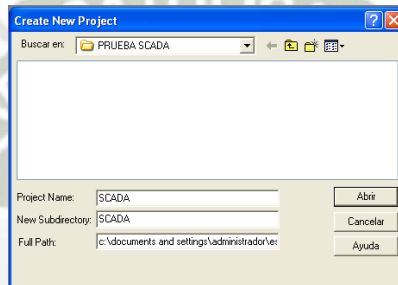
En la barra de herramientas seleccionamos (File)



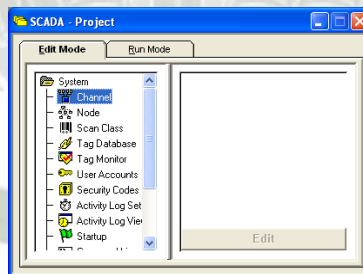
Creamos un proyecto nuevo (Create New Project), buscamos en donde podemos guardar nuestra aplicación.



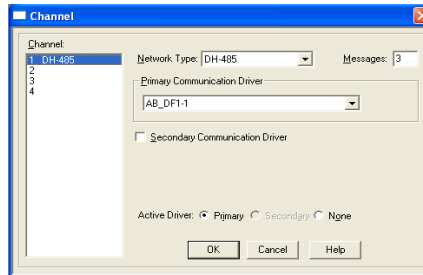
Cuando creamos un lugar seleccionamos (Abrir), establecemos un nombre a nuestra aplicación.



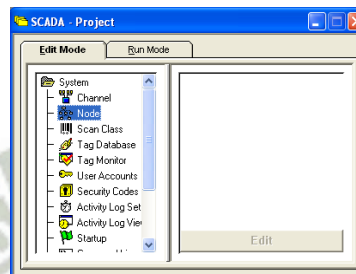
Ahora seleccionamos la carpeta (System) después doble clic en (Channel)



Establecemos un tipo de red (DH-485), driver de comunicaciones primarias (AB\_DF1-1), finalmente hacemos clic a OK

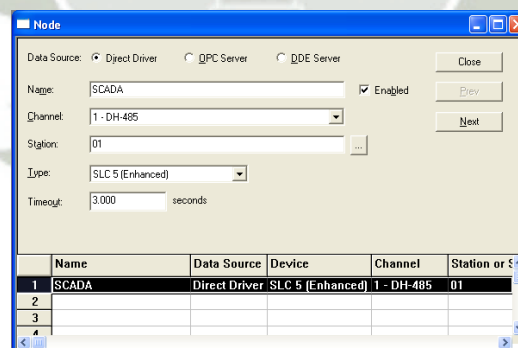


Le damos doble clic a (Node) en donde vamos a establecer el vínculo entre el PLC y el SCADA

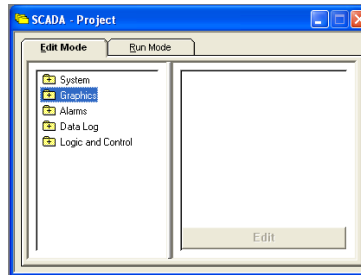


En la ventana (Node), seleccionamos fuente de datos (Data Source), le damos un nombre al nodo, seleccionamos el canal (Channel), escogemos una estación (Station).

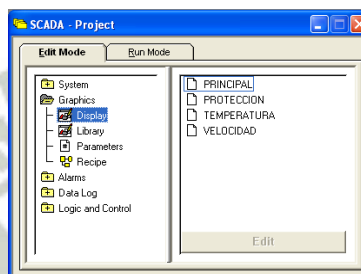
Finalmente ya hemos creado el nodo con las características antes mencionadas tal como parece seleccionado de color negro.



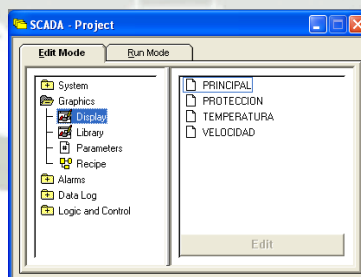
Ahora seleccionamos la carpeta (Graphics)



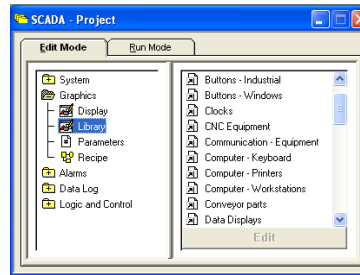
Después doble clic en (Display), en donde encontramos todas las ventanas de animación que anteriormente creamos.



En esta ventana podemos crear todas las pantallas que necesitamos para el sistema SCADA y en esta misma aparecen las sub-ventanas que hemos creado como son (PRINCIPAL, PROTECCION, TEMPERATURA, VELOCIDAD)

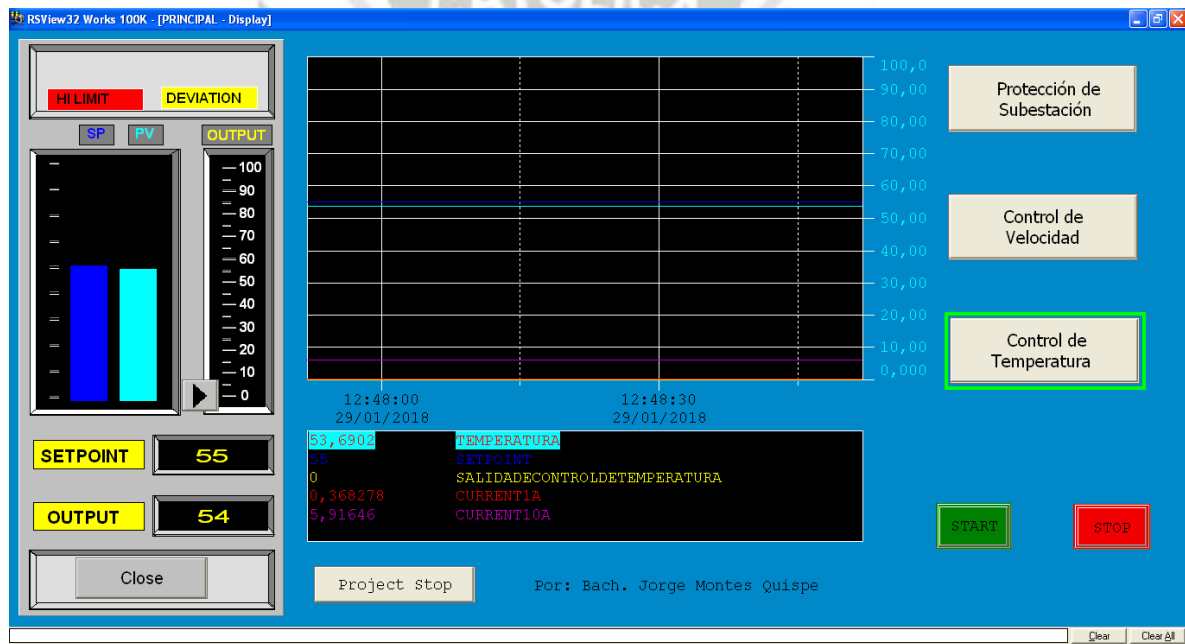


En esta misma carpeta podemos encontrar (Library) en donde podemos encontrar todos los elementos necesarios para diseñar los elementos gráficos que necesitamos (botoneras, fajas, comunicaciones, iluminarias, relojes, etc.)

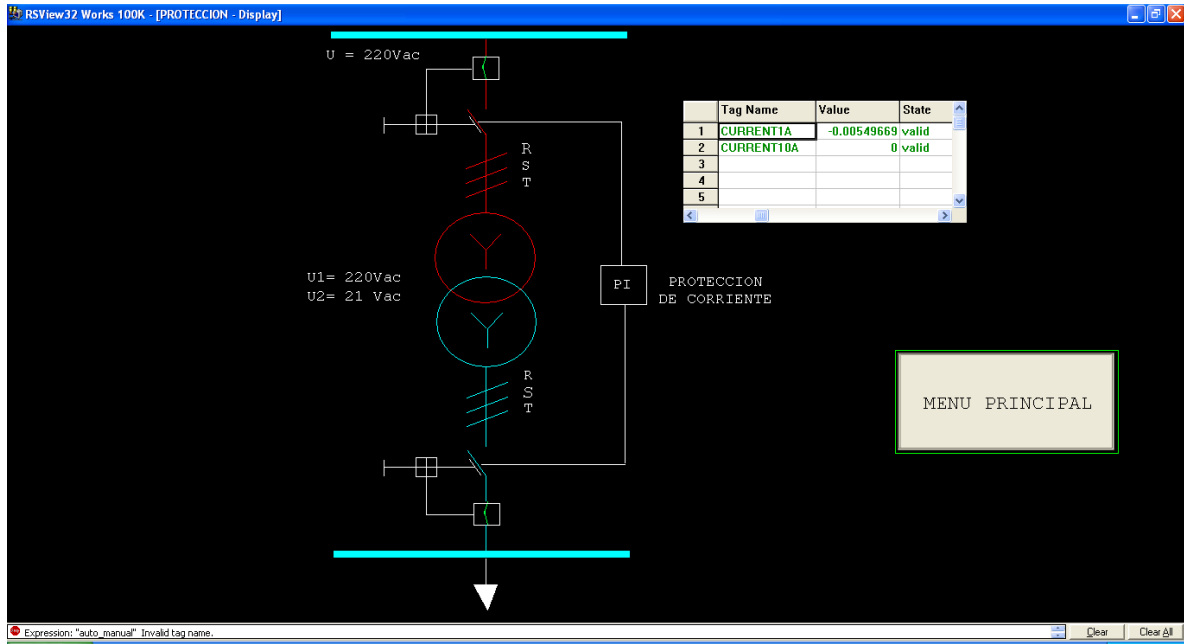


Se muestra el sistema SCADA de:

Menú Principal



Protección eléctrica para el prototipo de prueba.



Control de temperatura (Maestro).



## Control de velocidad (Esclavo).



#### 4.13 Instrucciones de Operación del Prototipo

Este prototipo de prueba está construido con base operativa de planta, tomando algunas consideraciones técnicas que solo son tomadas en cuenta para su correcta operación.

- Se debe proporcionar 220VAC trifásico a todo el sistema principal de alimentación para su correcto funcionamiento.
- Se inicia con una breve inspección visual hacia las cargas de prueba con la finalidad de no causar algún cortocircuito inesperado.
- Se habilita la llave termomagnética principal trifásica de 220VAC, luego las de alimentación del PLC, Fuentes de 24 / 5 VDC, Controlador de Temperatura (transmisor de temperatura).
- Se procede a verificar los datos de temperatura en la pantalla del equipo, después la correcta posición del ventilador, Termocupla Tipo J, los sensores de corriente alterna SCT-013, transductor de velocidad.

- Se procede al enlace de comunicación serial entre el PLC con el ordenador.
- Se inicia el programa RSLinks Classic para establecer el vínculo virtual del PLC con el ordenador para luego iniciar el RSLogix 500 y descargar el código ladder ya desarrollado.
- A través del programa RSView 32 se tiene implementado el sistema SCADA.
- En la pantalla principal se puede encontrar el valor Set Point, el valor de la temperatura del proceso, los botones de encendido y apagado, los botones de enlace para ir al menú de protección de subestación, control de temperatura, control de velocidad, un menú de tendencias en donde se muestra los valores de temperatura, corriente del primario y secundario, salida de control de temperatura y Set Point.
- En la pantalla de protección de subestación se encuentra el estado de los relés de habilitación para el transformador además de las lecturas de corrientes del lado primario y secundario de la misma.
- En la pantalla de control de temperatura se muestra el casillero donde se puede cambiar el Set Point de temperatura del proceso así mismo la temperatura en tiempo real.
- En la pantalla de control de velocidad se muestra la velocidad angular del ventilador y el estado de operación de la misma.
- Las cargas deben de estar dispuestas de tal manera que la corriente en el lado secundario y primario estén dentro de la corriente de corte.
- Se ha dispuesto a modo prueba la utilización de una sola carga variable que es manejada de manera manual siendo utilizada para producir una sobre corriente.

#### 4.14 Sintonizador de lazo PID (RSTune)

Para la sintonización del control PID de los dos lazos de control se utilizó también de manera opcional. Con entrada analógica a través del módulo 1756-IF4. Necesitamos configurar los parámetros del PID, para obtener un proceso lo más estable posible, seleccionado el tipo de ecuación, acción de control, configuración de salida mínima y máxima.

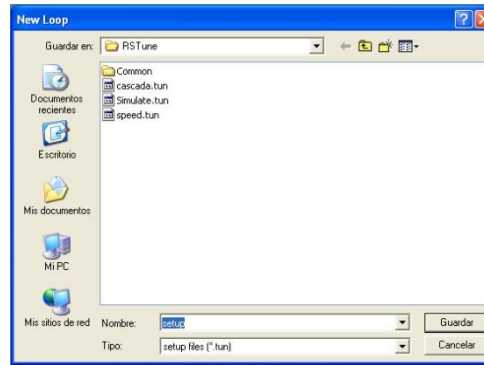
Damos clic a Inicio y seleccionamos el icono (RSTune)



Esta ventana aparece en donde podemos definir un nuevo lazo para crear, editar borrar. Los lazos ya creados se enumeran en el la ventana principal de elegir lazo.

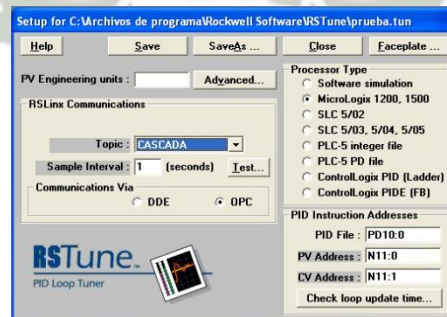


Para crear un nuevo lazo (New loop) establecemos un nombre y clic en (Guardar)

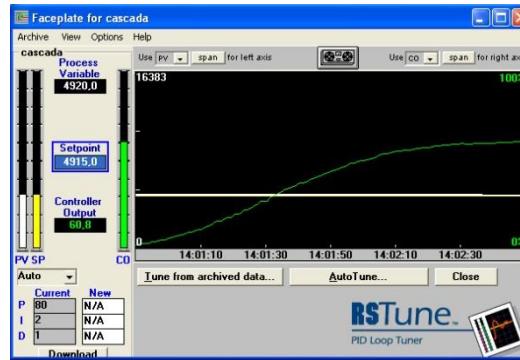


Se abre esta ventana en donde es importante señalar que necesitamos tener el RSLinks abierto ya que la comunicación se establece mediante OPC. Buscamos el nombre de nuestro programa creado en RSLogix500 en la pestaña (Topic). Es necesario elegir el tipo de procesador (Processor Type) que soporta esta versión de software desde MicroLogix 1100 a MicroLogix 1500. También que tipo de comunicación vamos a utilizar (Communications Via) elegimos OPC.

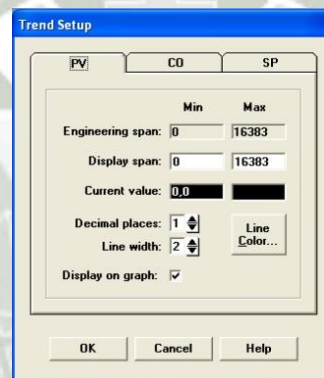
Para establecer un vínculo con el bloque de funciones PID que utilizamos en nuestro ladder (PID Instruction Addresses) necesitamos escribir el archivo PID (PID File) la dirección de la variable de proceso (PV Address) la dirección de variable de control (CV Address). Por ultimo comprobamos el tiempo de actualización del lazo (Check loop update time) necesitamos tener el ladder en línea para estar seguros del vínculo con los dos softwares. Guardamos la configuración (Save).



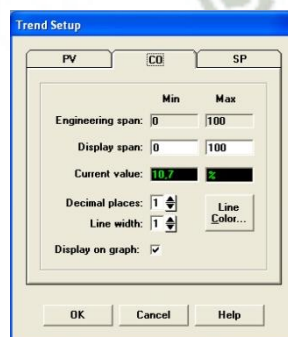
Luego (Faceplate) para direccionarlo a la pantalla de calibración del proceso.



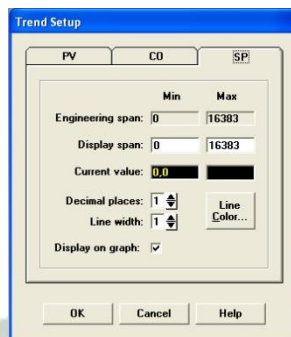
Para la configuración de tendencias para el valor de proceso (PV) debe estar en el rango de cuenta de la entrada del proceso dada por el bloque de funciones de escalamiento (0 – 16383) esto para los dos lazos de control.



Para la configuración de tendencias para el salida del controlador (CO) debe estar en el rango de cuenta de la salida del proceso dada por el bloque de funciones PID de (0 – 100) esto para los dos lazos de control.



Para la configuración de tendencias para el punto consigna (SP) debe estar en el rango de cuenta del bloque de escalamiento (0 – 16383)





# **CAPÍTULO V**

## **SISTEMA DE CONTROL**

## 5.1 Control de Procesos

### 5.1.1 Definiciones Previas de acciones:

#### 1.- Correctiva.

Cuando se identifica el error y como consecuencia se elimina por no estar dentro de los requerimientos en el proceso.

#### 2.- Preventiva

Cuando en el error potencial es deseada u otra situación no deseada.

#### 3.- Corrección

El error es deseado por una no conformidad. Está relacionada a los resultados obtenidos en la etapa hecha de la ruta de CTC ya que es objetivo actual e inmediato.

#### 4. – Inconformidad

Cuando un requisito no es satisfecho.

#### 5. – Causa Raíz

Es el origen causal de un problema que si se corrige permite la conformidad de un proceso.

#### 6. – Estabilidad

Cuando la variación es mínima o inexistente, se encuentra bajo control estadístico.

#### 7.- Variable

Cantidad que es proporcional a un cambio o variabilidad

### 5.1.2 Estrategia para la mejora de procesos

En la figura 5.1.2.1.1 se muestra un diagrama para la estrategia de mejora de un control de procesos que nos ayuda a la mejora continua.

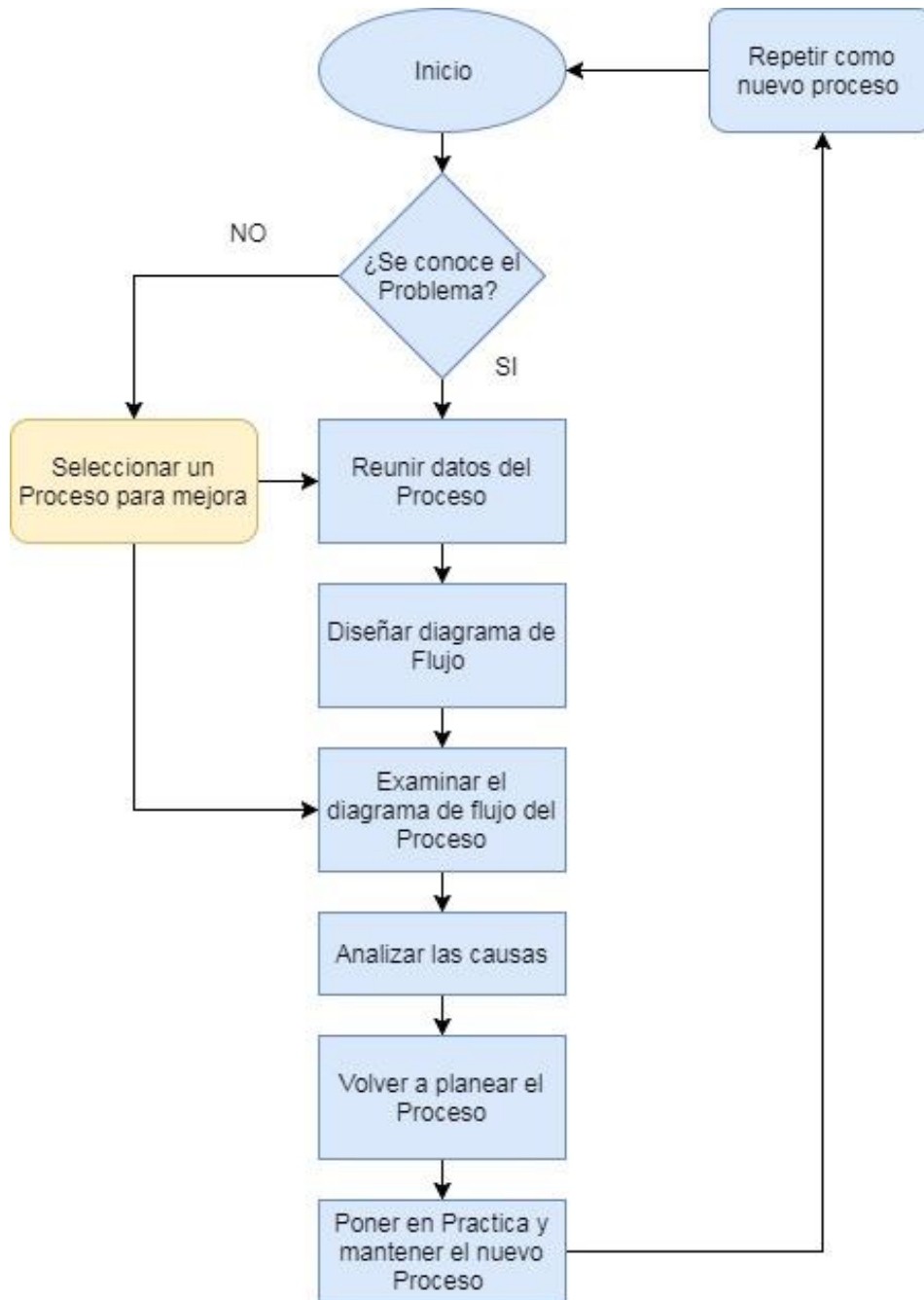


Figura 5.1.2.1.1 Diagrama de bloques para la mejora del proceso

Fuente: Elaboración Propia

### **5.1.3 Pasos antes de sintonizar un Lazo de Control:**

#### **5.1.3.1 Conocer el objetivo de control del Proceso**

Hacer estable y robusto el proceso frente a perturbaciones, errores durante la operación asegurando así el correcto desempeño de planta, generando valor, reduciendo la variabilidad, asegurando la vida útil de los equipos, el ahorro de energía, una vez tengamos los controles bastantes estables nos permitirá llevar al límite operacional a nuestros equipos como consecuencia evitamos mayores pérdidas.

Evitando así paradas de planta no programadas y sobre costes de mantenimiento, satisfaciendo requerimientos operaciones.

#### **5.1.3.2 Conocer las necesidades Operacionales**

Se hizo el seguimiento, coordinación, consultas de la problemática en el área operativa manifestando de manera verbal la falta de supervisión, los posibles problemas eléctricos, desgaste de los materiales del transformador “conductores eléctricos”, pérdidas de producción, posible daños mayores, satisfaciendo así el mejor performance que ellos necesitan.

#### **5.1.3.3 Identificar las causas reales del problema (lazo, instrumentación, etc.)**

Las potenciales causas raíces se identificaron relativamente de manera temprana, una de ellas con la inspección visual anual programada por el Área de mantenimiento. La falta de un tipo de comunicación industrial que permita tener en tiempo real el estado de operación de los ventiladores de baja tensión ya que las subestaciones se encuentran a una distancia considerable entre ellas y sala de control.

La técnica utilizada para el control de temperatura establecido por Ingeniería en el diseño. Los cambios bruscos de temperatura en la zona en donde las instalaciones de planta se encuentran, generando así perturbaciones. Con el software CMMS-EAM utilizado para monitorear la condición del activo, muestra casi 30% de desviación. Con esto se actúa con una propuesta de solución sentando así las bases de esta investigación.

#### **5.1.3.4 Conocer los peligros/ riesgos del sistema y proceso**

Se tomó en cuenta:

- El estado de la planta
- Si el margen de producción mensual mínima soporta una intervención anormal.
- Si una posible modificación a esta escala sería perjudicial para otros lazos de control.
- El sobre consumo de energía
- El aumento de recursos en el procesador del PLC.
- El aumento de gastos de operación
- Si el personal operativo se adapta a un nuevo lazo de control y sus respectivos conceptos de uso.

#### **5.1.3.5 Conocer mi proceso: obtener el modelo matemático**

El modelo matemático se encuentra desarrollado en el Capítulo VI.

### **5.2 Control Cascada**

#### **5.2.1 Estructura**

Para la implementación del Control Cascada está estructurado de la siguiente manera.

El lazo primario también llamado maestro, la variable que controla es la temperatura de la cabina, el lazo secundario es denominado esclavo el cual la variable controlada es velocidad del ventilador que enfría el transformador en seco encapsulado, siendo la salida del lazo

primario el punto de consigna del controlador secundario. La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso, tal como podemos ver en la figura 5.2.1.1.1.

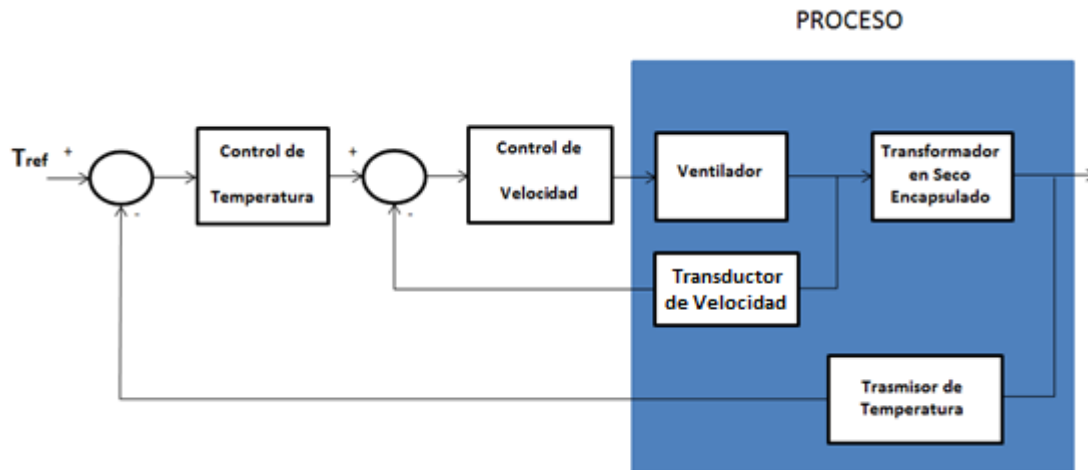


Figura 5.2.1.1.1 Estructura para la implementación del Control en Cascada

Fuente: Elaboración Propia

## 5.2.2 Control PID discreto

### 5.2.2.1 Introducción

Sin lugar a dudas el control PID es la técnica de control más popular en la industria. Por su robustez que nos proporciona buen comportamiento a pesar de posibles cambios en los parámetros de planta por cuestiones ambientales etc., su simplicidad ya que tiene pocos parámetros y son relativamente fáciles de ajustar este es una ventaja para el diseño y por un sentido físico que es fácil entender su funcionamiento.

Para esta aplicación utilizaremos el modelo de sistema continuo ya que nuestro MicroLogix 1100 es un controlador discreto.

### 5.2.2.2 Estudios de los sistemas a controlar:

En la figura 5.2.2.2.1.1 se muestra el comportamiento de la temperatura de trabajo en el tiempo considerando que la temperatura ambiente es de  $26,1^{\circ}\text{C}$  con una carga de 3 Ohm y 6 Amperios medidos por fase, se observa una temperatura de trabajo de  $59,57^{\circ}\text{C}$  estable después de 20000 segundos (4,58 horas) de prueba como resultado un sistema de primer orden si es que la gráfica se interpola.

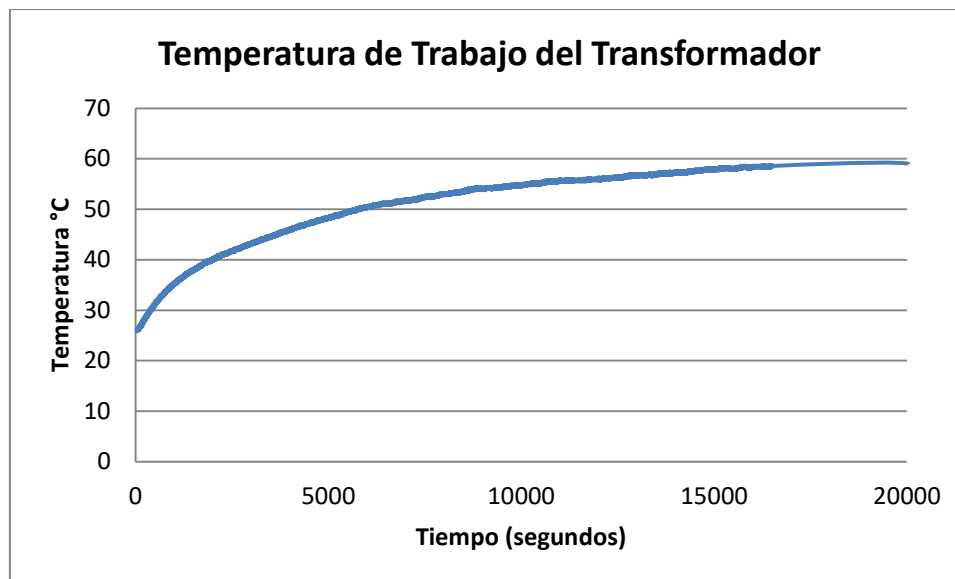


Figura 5.2.2.2.1.1 Curva de temperatura de trabajo del transformador de prueba

Fuente: Elaboración Propia

También se muestra las revoluciones por minuto del motor de corriente directa versus el tiempo que se utiliza para el control de velocidad del ventilador del sistema de enfriamiento dándonos una respuesta del sistema de segundo orden.

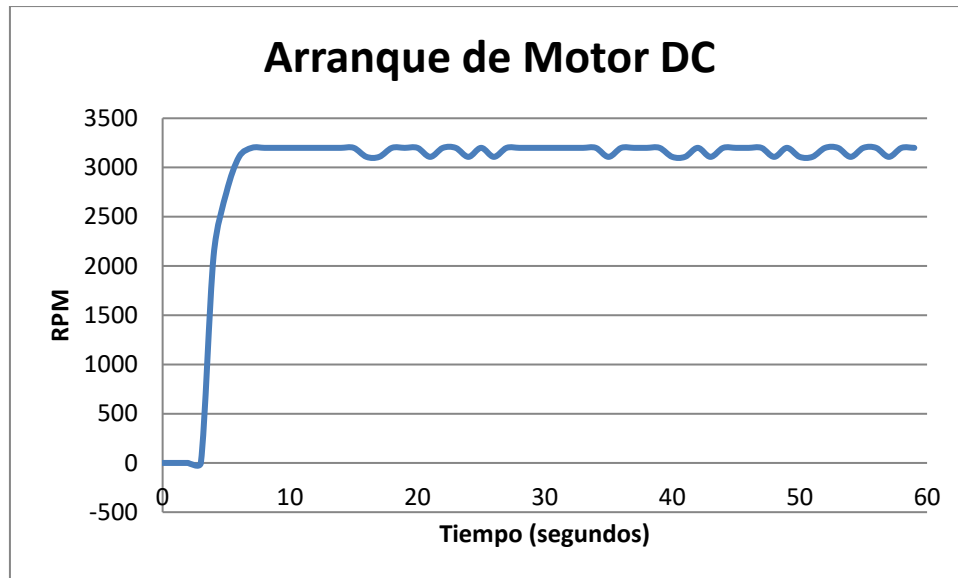


Figura 5.2.2.1.2 Curva de arranque del motor DC

Fuente: Elaboración Propia

### 5.2.2.3 Diseño de controladores tipo PID por las reglas de Ziegler - Nichols.

El método de Ziegler – Nichols utiliza un mecanismo heurístico para la compensación de sistemas. Utilizando el método gráfico se obtiene los siguientes valores. Para la respuesta escalón de entrada que es sometida la respuesta temporal se caracteriza por los llamados tiempos de retraso que es tiempo transcurrido que alcanza el 5% ( $\tau_d$ ), constante de tiempo del sistema que es tiempo desde  $\tau_d$  hasta que se alcanza el 63% del valor final de la respuesta ( $\tau$ ) y ganancia estática donde Y es el valor final de la recta (K) como muestra en la figura 5.2.2.3.1.1.

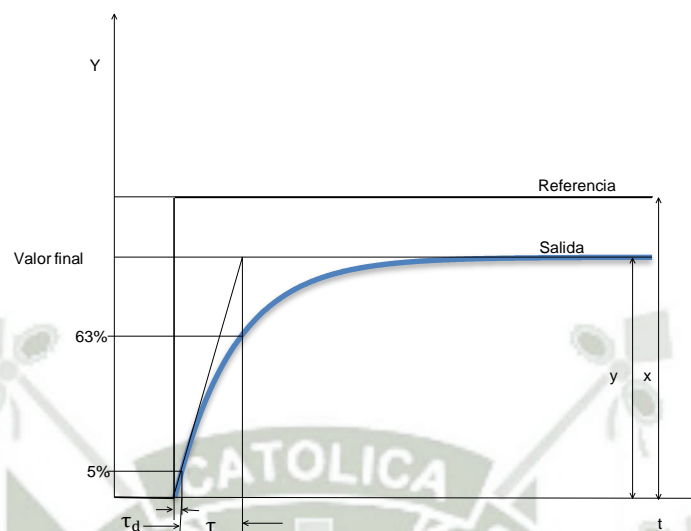


Figura 5.2.2.3.1.1 Caracterización de la respuesta temporal de un sistema de primer orden

Fuente: Elaboración Propia

Porcentaje	Temperatura °C	Tiempo (segundos)
0	0	0
5%	3	2.4
63%	37,8	1568
100%	58,58	16591

Tabla 5.2.2.3.1 Tiempos de retraso - Ziegler – Nichols

Fuente: Elaboración propia

$$\tau_d = 2.4s = 0.04min$$

$$\tau = 1565,6s = 260.9min$$

$$y = 58, 58$$

$$x = 60$$

$$K = \frac{y}{x} = \frac{58,58}{60} = 0,98 \quad (4.1)$$

Considerando la una relación de ganancia entre 7986,7 y el rango adimensional de 327,67 tenemos un valor de ganancia aproximada de 24,37.

Controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
PID (maestro)	$\frac{1,2 \cdot \tau}{K \cdot \tau_d}$	$2 \cdot \tau_d$	$0,5 \cdot \tau_d$
	$\frac{1,2 \cdot 260,9}{0,98 \cdot 0,04}$	$2 \cdot 0,04$	$0,5 \cdot 0,04$
	7986,7	0,08	0,02

Tabla 5.2.2.3.2 Regla heurística

Fuente: Elaboración propia

Utilizando el método gráfico se obtiene los siguientes valores para la velocidad.

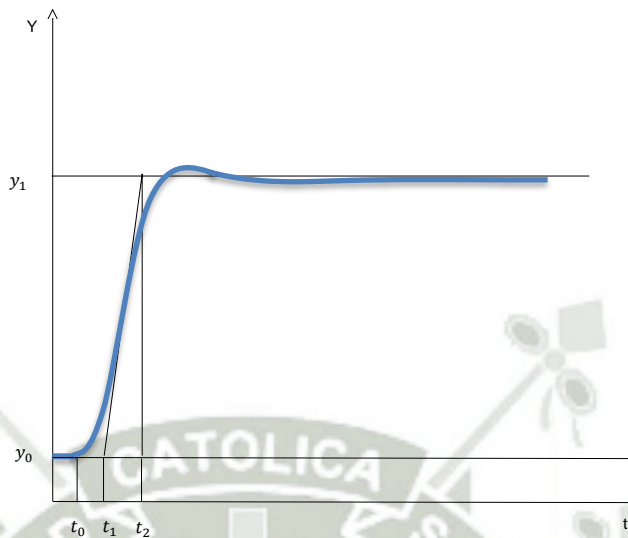


Figura 5.2.2.3.1.2 Caracterización de la respuesta temporal de un sistema de segundo orden

Fuente: Elaboración Propia

$$\tau_0 = t_1 - t_0 = 2,7 - 0 = 2,7 \text{ segundos} = 0,45 \text{ minutos} \quad (4.2)$$

$$y_0 = t_2 - t_1 = 5 - 2,7 = 2,3 \text{ segundos} = 0,38 \text{ minutos} \quad (4.3)$$

Dónde:

$u_1$  = es el punto en el eje "x" (tiempo) de la tangente entre la recta y la curva de velocidad

$$u_1 = 600 \text{ milisegundos}$$

$$k_0 = \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0} = \frac{3200 - 0}{600 - 0} = \frac{3200}{600} = 5,33 \quad (4.4)$$

Controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
PID (esclavo)	$1,2 \cdot \frac{y_0}{k_0 \cdot \tau_0}$	$2 \cdot \tau_0$	$0,5 \cdot \tau_0$
	$\frac{1,2 \cdot 0,38}{5,33 \cdot 0,45}$	$2 \cdot 0,45$	$0,5 \cdot 0,45$
	0,2	0,9	0,22

Tabla 5.2.2.3.3 Regla heurística

Fuente: Elaboración propia

En el siguiente cuadro se observa la composición de la ecuación matemática en el dominio de S que es el resultado de la expresiones matemáticas (4.5) y (4.6) que contiene la constante proporcional que tiene una acción importante cuando el error es grande pero no toma en cuenta el tiempo, para ello el sistema necesita un componente que fije la variación con respecto al tiempo. El tiempo derivativo mantiene el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la velocidad con que se produce, asegurando que el error no se incremente. El tiempo integral disminuye el error provocado por el modo proporcional.

Controlador	Ecuación
Maestro	$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right] \quad (4.5)$ $\frac{u(s)}{e(s)} = 24,37 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{0,08S} + 0,02S \right]$
Esclavo	$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right] \quad (4.6)$ $\frac{u(s)}{e(s)} = 0,2 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{0,9S} + 0,22S \right]$

Tabla 5.2.2.3.4 Composición de la ecuación matemática en el dominio de S

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2.4 Instrucción Proporcional Integral Derivativa (PID)

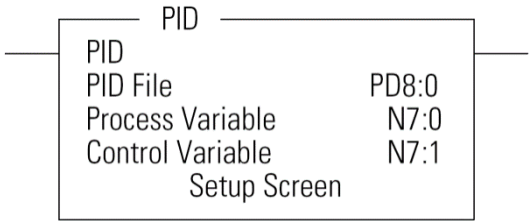
Bloque de Funciones PID	Características
	<p>Se compone de un archivo PID que es asignado por el programador.</p> <p>Variable entera de proceso (Process Variable) que va de 0 a 16383</p> <p>Variable entera de control (Control Variable) que es la salida del control del proceso que va de 0 a 16383</p>

Tabla 5.2.2.4.1 Características del Bloque de funciones PID  
Fuente: Elaboración propia

Considerando la ecuación matemática PID y el bloque de funciones de la misma se tiene el rango de las constantes de ganancia estándar mostradas a continuación.

Término	Rango	Referencia
Ganancia del Controlador $K_c$	0,1 a 3276.7 (adimensional) 0,01 a 327.67 (adimensional)	Proporcional
Reset Time $\frac{1}{T_i}$	3276.97 a 0,1 (min./repetición) 327.67 a 0,01 (min./repetición)	Integral
Rapidez de desviación $T_D$	0,01 a 327.67 (minutos)	Derivativo

Tabla 5.2.2.4.2 Rango de constantes de ganancias del Bloque de funciones PID

Fuente: Elaboración propia

El bloque de control (Control Block) es un archivo que almacena los datos que necesitamos para que la instrucción funcione. Tiene una longitud de 23 palabras y pueden ser ingresadas como direcciones tipo entero desde N10:0 a N10:22. En la ventana de configuración de bloque de control tenemos:

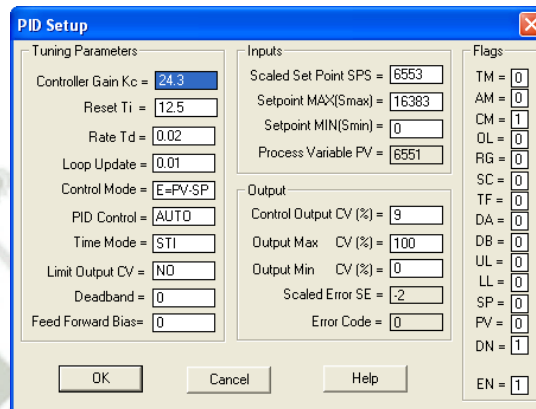


Figura 5.2.2.4.1.1 Configuración de bloque de control de temperatura (maestro)

Fuente: Elaboración Propia

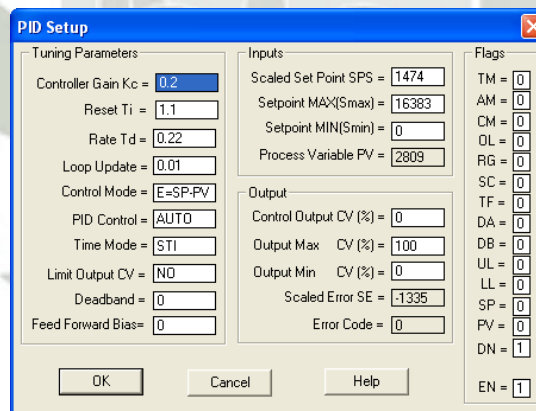


Figura 5.2.2.4.1.2 Configuración de bloque de control de velocidad (esclavo)

Fuente: Elaboración Propia



**CAPÍTULO VI**

**INSTRUMENTACIÓN DEL  
SISTEMA DE CONTROL**

## **6.1 Modelamiento**

### **6.1.1 Introducción**

Al establecer la dinámica de uno de los transformador en seco convencionales que actualmente está en operación en las plantas de generación de Majes y Repartición. La dinámica se establece a partir del modelamiento de los respectivos sistemas, prototipo implementado y luego validadas con datos de campo.

Durante el funcionamiento de cualquier transformador se originan perdidas térmicas que deben evacuarse del recinto del transformador. Prioritariamente debe comprobarse la posibilidad de ventilación y de aireación natural. Si estas son insuficientes, es preciso incorporar un sistema de ventilación mecánica (forzada).

Considerando que el proceso es isobárico como la temperatura y/o volumen varía y la presión atmosférica permanece constante dentro de la cabina de transformación ya que se encuentra abierto entre las rendijas del ventilador y existe intercambio de energía con el medio ambiente.

### **6.1.2 Materiales y métodos**

La cabina de transformación consta de una sección transversal rectangular. Para este estudio, se tiene con una distribución uniforme en el piso y techo.

### **6.1.3 Dinámica de una cabina de transformación**

Se hace hincapié en el estudio dinámico de la cabina de transformación. Por las razones dadas es que se calculan las dimensiones de las rejillas y ventilador, tomando como base la potencia desperdiciada, temperatura de trabajo, flujo de absorción.

- El calor que produce el transformador

$$Q_{\text{trafo}} = \frac{dT_{\text{Cu+Fe}}}{dt} = \frac{V^2}{R} \quad (6.0)$$

Dónde:

$Q_{\text{trafo}}$  = Calor generado por el transformador

$T_{\text{Cu+Fe}}$  = Temperatura del hierro y cobre

$V$  = Fuente de voltaje

- Magnitudes fundamentales

$T_{\text{trafo}}$  = Temperatura de transformador

$T_{\text{ambiente}}$  = Temperatura del medio ambiente

$T_{\text{Cu+Fe}}$  = Temperatura del hierro y cobre

$T_{\text{pared interior}}$  = Temperatura de la pared interior

$Q_{\text{trafo}}$  = Calor generado por el transformador =  $V^2 / R$

$Q_{\text{paredes}}$  = Flujo de calor a través de las paredes de la cabina hacia el transformador

$Q_{\text{perdidas del ventilador}}$  = Perdidas de calor a través del ventilador instalado en cabina

$C_{\text{trafo}}$  = Capacidad térmica del transformador

$C_{\text{cabina de trafo}}$  = Capacidad térmica entre las paredes de la cabina

$R_{t_1}$  = Resistencia térmica entre paredes y el transformador

$R_{t_2}$  = Resistencia térmica del ventilador y exteriores

#### 6.1.4 Determinación de funciones

El calor hacia el transformador es:

$$Q_{\text{trafo}} - (Q_{\text{paredes}} + Q_{\text{perdidas del ventilador}}) = \frac{dT_{\text{Cu+Fe}}}{dt} \quad (6.1)$$

Considerando la conductividad térmica del transformador:

$$Q_{\text{paredes}} = \frac{T_{\text{pared interior}} - T_{\text{trafo}}}{R_{t_1}} = \frac{C_{\text{trafo}} dT_{\text{trafo}}}{dt} \quad (6.2)$$

El flujo de calor a través del ventilador hacia el ambiente es:

$$Q_{\text{perdidas del ventilador}} = \frac{T_{\text{Cu+Fe}} - T_{\text{ambiente}}}{R_{t_2}} \quad (6.3)$$

Si la conductividad de la pared es elevada:

$$Q_{\text{perdidas del ventilador}} = \frac{C_{\text{cabina de trafo}} dT_{\text{pared interior}}}{dt} \quad (6.4)$$

Sabemos que:

$$Q_{\text{trafo}} = \frac{V^2}{R} \quad (6.5)$$

Sustituyendo (5.3) y (5.2) en (5.1)

$$\frac{V^2}{R} - \frac{C_{\text{trafo}} dT_{\text{trafo}}}{dt} - \frac{C_{\text{cabina de trafo}} dT_{\text{pared interior}}}{dt} = \frac{dT_{\text{Cu+Fe}}}{dt} \quad (6.6)$$

Suponiendo una gran aproximación entre  $T_3$  y  $T_4$ :

$$\frac{V^2}{R} - \frac{C_{\text{trafo}} dT_{\text{trafo}}}{dt} = \frac{C_{\text{cabina de trafo}} dT_{\text{pared interior}}}{dt} \quad (6.7)$$

De la ecuación (5.2) se deduce:

$$T_{\text{pared interior}} = C_{\text{trafo}} \cdot R_{t_1} \frac{dT_{\text{trafo}}}{dt} + T_{\text{trafo}} \quad (6.8)$$

Sustituyendo (5.8) y en (5.7) se obtiene:

$$\frac{V^2}{R} - \frac{C_{\text{trafo}}}{dt} \frac{dT_{\text{trafo}}}{dt} = C_{\text{cabina de trafo}} \frac{d}{dt} [C_{\text{trafo}} \cdot R_{t_{\text{trafo}}} \frac{dT_{\text{trafo}}}{dt} + T_{\text{trafo}}] \quad (6.9)$$

$$C_{\text{trafo}} \cdot R_{t_{\text{trafo}}} = \tau \quad ; \text{ es una constante de tiempo} \quad (6.10)$$

Reemplazando y simplificando en (5.9)

$$\tau \frac{d^2 T_{\text{trafo}}}{dt^2} + \frac{(C_{\text{trafo}} + C_{\text{cabina de trafo}})}{C_{\text{cabina de trafo}}} \frac{dT_{\text{trafo}}}{dt} = \frac{V^2}{R_{cc}} \cdot \frac{1}{C_{\text{cabina de trafo}}} \quad (6.11)$$

Para resolver (5.11) se determinan las capacitancias de un transformador en seco encapsulado en un proceso real. La temperatura de trabajo permanente es de 57°C y temperatura ambiente es de 25°C.

#### - **Calculo de Capacitancias**

##### 1. **Capacitancia térmica del transformador $C_{\text{trafo}}$ :**

Dónde:

$m$  = masa del transformador = 10kg

$C_{\text{trafo}}$  = calor específico del transformador total

$C_{\text{Cu}}$  = calor específico del cobre =  $0,13 \cdot \frac{Wh}{kg \cdot ^\circ C}$

$C_{\text{Fe}}$  = calor específico del hierro =  $0,10 \cdot \frac{Wh}{kg \cdot ^\circ C}$

Para el cálculo del calor específico del transformador definimos la siguiente expresión matemática:

Calor específico del transformador es:

$$C_{\text{trafo}} = C_{\text{Cu}} + C_{\text{Fe}} \quad (6.12)$$

$$c_{\text{trafo}} = 0,13 \cdot \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} + 0,11 \cdot \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$c_{\text{trafo}} = 0,24 \cdot \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Por lo tanto la capacitancia térmica del transformador es:

$$C_{\text{trafo}} = m \cdot c_{\text{trafo}} \quad (6.13)$$

$$C_{\text{trafo}} = 10\text{kg} \cdot 0,24 \cdot \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$C_{\text{trafo}} = 2,4 \cdot \frac{\text{Wh}}{^\circ\text{C}}$$

## 2. Capacitancia de las paredes de la cabina de transformación

$C_{\text{cabina de trafo}}$  :

Dónde:

$$c_{\text{lam. de acrílico}} = \text{calor específico del acrílico} = 96,19 \cdot \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$m = \text{masa del acrílico} = 0,1\text{kg}$$

Por lo tanto la capacitancia de las paredes de la cabina de transformación es:

$$C_{\text{cabina de trafo}} = m \cdot c_{\text{lam. de plástico}} \quad (6.14)$$

$$C_{\text{cabina de trafo}} = 0,1\text{kg} \cdot 96,19 \cdot \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$C_{\text{cabina de trafo}} = 9,62 \cdot \frac{\text{Wh}}{^\circ\text{C}}$$

- La potencia de alimentación P es:

La fuente de voltaje es de  $\frac{220}{\sqrt{3}}$  V, por lo tanto la potencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Potencia (P)} = \frac{V^2}{R} = V \cdot i \quad (6.15)$$

i: corriente eléctrica, es la variación de la carga “q” en la unidad del tiempo.

$$i = \frac{dq}{dt}$$

Reemplazando los valores de las capacitancias, la potencia y los datos experimentales de pérdida de potencia en carga en la expresión (5.11) se obtiene:

$$\tau \frac{d^2 T_{\text{trafo}}}{dt^2} + \frac{(2,4 + 9,62)}{9,62} \frac{dT_{\text{trafo}}}{dt} = \frac{(127,12)^2}{17,6\Omega} \cdot \frac{1}{9,62} \quad (6.16)$$

Comprende la función teórica que muestra el comportamiento de la temperatura interna, en el tiempo, cuando se le aplica una potencia eléctrica.

$$\tau \frac{d^2 T_{\text{trafo}}}{dt^2} + 1,24 \frac{dT_{\text{trafo}}}{dt} = 95,44 \frac{dq}{dt} \quad (6.17)$$

- Función de transferencia: Aplicando transformada de Laplace, a (6.17) y simplificando la expresión se obtiene la función de transferencia de la planta. [22]

$$\frac{T(s)}{q(s)} = G_{(S)TP} = \frac{95,44}{\tau s + 1,24} \quad (6.18)$$

## 6.2 Transmisores

Los transmisores son dispositivos que se conectan al elemento primario en algunos casos se encuentra integrado al transductor, el mismo produce la señal para la transmisión. Se clasifican en: Transmisores Neumáticos y Transmisores Electrónicos.

### 6.2.1 Transmisor de Temperatura, Modelo: REG48PUN1JHU

Es necesario la utilización de un transmisor para manejar la señal que proporciona el termocupla tipo J hacia una señal analógica de 4 – 20mA. Se utiliza el controlador de temperatura (transmisor) Zelio modelo REG48PUN1JHU pero es importante destacar otras funciones como control de temperatura en diferentes técnicas adicionales pero en esta oportunidad será ocupado como transmisor, ya que aprovechamos la visualización panel de 4 dígitos que puede ser utilizada por el operario en campo.

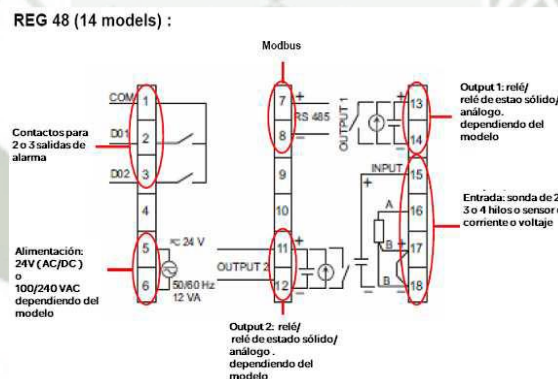


Figura 6.2.1.1.1 Controlador de temperatura Zelio - REG48PUN1JHU

Fuente: <http://www.schneider-electric.es>

Ellos presentan una constante de tiempo y un tiempo muerto (posteriormente se definirán), que depende del tipo de transmisor y de la variable que está midiendo. En el caso de los transmisores neumáticos la señal transmitida es de 3 a 15 psi, y en el caso de los transmisores electrónicos dicha señal es de 4 a 20 mA. [23]

### 6.3 Implementación de un transductor de Velocidad (Encoder)

Este sensor nos proporciona el conteo de las revoluciones por minuto que necesita el control de velocidad para nuestro lazo PID, como se muestra en la figura 5.7.1.1 se utiliza el sensor fotoeléctrico interruptor CnY70 para este fin.

### 6.4 Termocupla tipo J

#### 6.4.1 Introducción

En la industria son sensores muy utilizados, son dos alambres de distinto material unidos en un extremo comúnmente soldados.

Al contacto de la temperatura en la junta de los metales se produce un voltaje muy pequeño también llamado “Efecto Seebeck” en mili voltios aumentando con la temperatura. [24]

#### 6.4.2 Tipos

En la figura 5.0.2 se muestra una termocupla tipo J, está hecha con un alambre de hierro y otro de constantán (cobre / nickel)

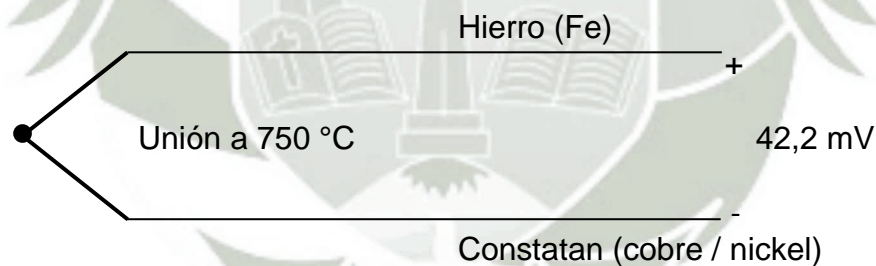


Figura 6.4.2.1.1 Termocupla tipo J

Fuente: Elaboración Propia

Al colocar la unión de estos metales a 750 °C, debe aparecer en los extremos 42.2 milivolts.

Existen varios tipos de termocuplas pero las más comunes son las de tipo J y K. [24]

Tc	Cable + Aleación	Cable – Aleación	°C	Rango (Min/Max) mV	Aplicación
J	Hierro	Cobre / Nickel	(-180;750)	42,2	En la industria del plástico, goma (extrusión e inyección) y fundición de metales a bajas temperaturas (Zamac, Aluminio).
K	Nickel/Cromo	Nickel/Aluminio	(-180;1372)	54,8	En fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C, por ejemplo fundición de cobre y Hornos de tratamientos térmicos.
T	Cobre	Cobre / Nickel	(-250;400)	20,8	Eran usadas hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido desplazadas en esta aplicación por los Pt100
R	87% Platino 13% Rhodio	100% Platino	(0;1767)	21,09	Se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica (fundición de acero)
S	90% Platino 10%Rhodio	100% Platino	(0; 1767)	18,68	
B	70% Platino 30% Rhodio	94% Platino 6% Rhodio	(0; 1820)	13,814	

Tabla 6.4.2.1 Tipos de termocuplas existentes  
Fuente: Elaboración propia

### 6.5 Sensor óptico reflexivo: CNY70

Este dispositivo tiene un rango de corto alcance casi 5cm, utilizado para detección de colores blanco y negro.

Está conformado por un emisor de y receptor de luz (radiación infrarroja, fototransistor) como es mostrado en la figura 6.5.1.1, en superficies lisas y una iluminación adecuada es utilizada para enviar la señal discreta hacia el PLC.

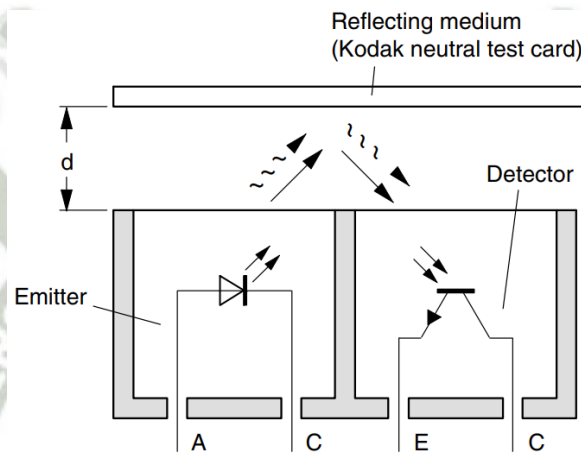


Figura 6.5.1.1 Elementos del sensor óptico CNY70

Fuente: [www.vishay.com](http://www.vishay.com)

### 6.6 Sensor de corriente alterna: SCT-013

Para este apartado necesitamos tener nociones teóricas de corriente alterna, amplitud de onda, voltaje pico a pico, voltaje rms, cargas resistivas, todos ellos podemos encontrar mucho material en diferentes fuentes de consulta.

Las razones por la cual opte este equipo es por su bajo costo y también que es un sensor no invasivo ya que usa un transformador de corriente que gracias al efecto de inducción magnética proporcionado por conductor que vamos a medir su intensidad de corriente es proporcional a la

corriente del secundario del transformador del sensor. Este devanado secundario tiene 2000 vueltas, dato que se utilizará más adelante.

El SCT – 013 - 00 tiene una relación de medición de salida de 0 a 50 mA con un rango de medición de 0 a 100A, es aconsejable tener un rango de medición alto ya que afecta en la precisión del sensor.

En la figura 6.6.1.1 se muestra las características de todos los modelos disponibles.

Model	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Input current	0-100A	0-5A	0-10A	0-15A	0-20A
Output type	0-50mA	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V
Model	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-000V
Input current	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	0-100A
Output type	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V

Figura 6.6.1.1 Características técnicas de los modelos SCT – 013

Fuente: <http://vctec.co.kr/web/product/yhdc/pdf/SCT013.pdf>

## 6.7 Diseño del circuito acondicionador del sensor de Corriente

Necesito tener un rango de medición mayor a la corriente de corte del lado primario y secundario así poder implementar con existo la protección de sobre corriente.

El objetivo de este es ajustar la corriente de salida (0-50mA) de nuestros sensores de corriente SCT – 013 – 00 a señales de voltaje que puedan ser leídos por dos entradas analógicas del MicroLogic1100.

Para la medición de corriente del lado secundario de nuestro transformador en seco de prueba necesitamos un rango de corriente de 0 – 10A, ya que la corriente de corte nominal según placa es de 8.66A

Realizamos el siguiente cálculo:

$$I_{\text{rms}} = 10\text{A} \ ; \ \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \ ; \ I_s = \frac{N_p \cdot I_p}{N_s} \ ; \ I_s = \frac{1 \cdot 10\text{A}}{2000} \ ; \ I_s = 0,005\text{A} \quad (6.19)$$

Para la elección de la resistencia de carga utilizamos la siguiente expresión matemática:

$$R'_{\text{carga}} = \frac{V_{\text{REF}}}{\frac{I_{\text{pico}}}{2}} = \frac{10\text{V}}{0,005} = 1\text{K}\Omega \quad (6.20)$$

Para la medición de corriente del lado primario de nuestro transformador en seco de prueba necesitamos un rango de corriente de 0 – 1A, ya que corriente de corte nominal según placa es de 0.84A.

Realizamos el siguiente cálculo:

$$I_{\text{rms}} = 10\text{A} \ ; \ \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \ ; \ I_s = \frac{N_p \cdot I_p}{N_s} \ ; \ I_s = \frac{1 \cdot 1\text{A}}{2000} \ ; \ I_s = 0,0005\text{A} \quad (6.21)$$

Para la elección de la resistencia de carga utilizamos la siguiente expresión matemática:

$$R''_{\text{carga}} = \frac{V_{\text{REF}}}{\frac{I_{\text{pico}}}{2}} = \frac{10\text{V}}{0,0005} = 10\text{K}\Omega \quad (6.22)$$

Para ambos casos necesitamos rectificar las ondas senoidales de voltaje, utilizamos un rectificador de onda completa, después se elimina el rizado con un filtro RC.

En las figuras 6.7.1.1 se muestran los circuitos acondicionadores de señales.

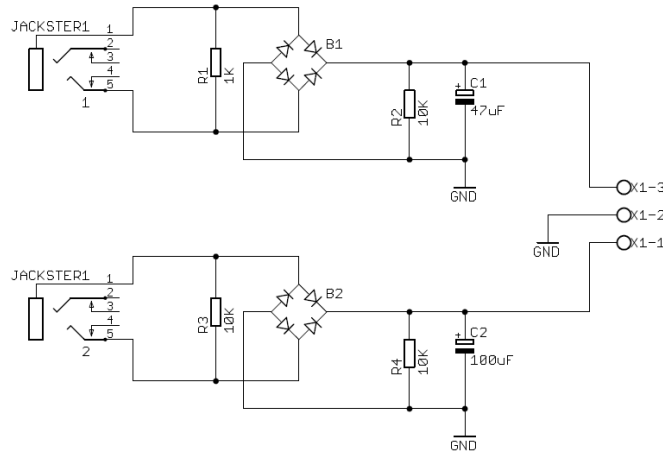


Figura 6.7.1.1 Circuito acondicionador de señal de corriente de 1A y 10A  
Fuente: Programa Autodesk EAGLE

Para esto se diseña una placa de fibra de vidrio con dimensiones de 6.5cmx 7cm mostrado en la figura 6.7.1.2

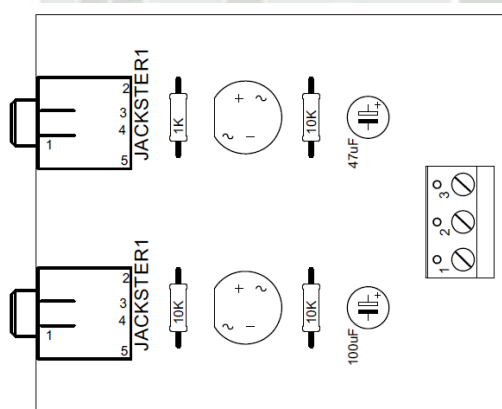


Figura 6.7.1.2 Placa de fibra de vidrio de los circuitos de acondicionadores de corriente  
Fuente: Programa Autodesk EAGLE

## 6.8 Diseño del circuito acondicionador del sensor de Velocidad

El sensor cny70 entrega una señal discreta y esta acondicionada para que pueda entregarle los 24VDC a una de las entradas digitales del PLC.

Para llegar a este objetivo se diseñó un circuito en donde se tiene una resistencia para establecer la corriente al emisor de luz (alimentado con 5VDC). El receptor de luz (alimentado con 5VDC) en el otro extremo se encuentra una resistencia a tierra limitando la corriente de esta. A su vez conectada a la base del transistor 2n2222 (alimentado con 24VDC en el colector) en un esquema de corte y saturación.

Para esto se dispuso en el centro del ventilador los colores blanca y negra, el color blanco tiene una connotación de uno lógico y el negro cero lógico con los niveles necesario de voltaje del PLC necesarios (0 VDC - 24VDC).

A continuación se muestra el esquema de distribución de los componentes y el diseño del circuito de acondicionamiento en la figura 6.8.1.1.

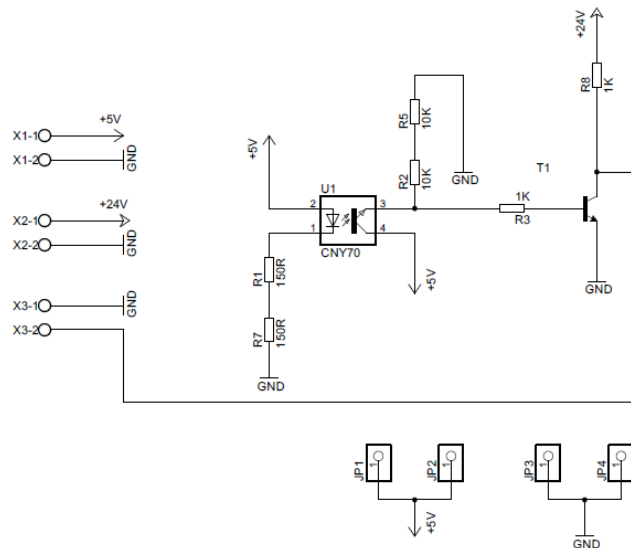


Figura 6.8.1.1 Diagrama eléctrico del circuito acondicionador de señal para el sensor de velocidad

Fuente: Programa Autodesk EAGLE

Para esto se diseña una placa de fibra de vidrio con dimensiones de 4cmx 5cm mostrado en la figura 6.8.1.2.

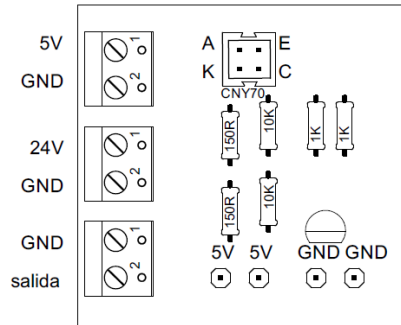


Figura 6.8.1.2 Placa de fibra de vidrio

Fuente: Programa Autodesk EAGLE

### 6.9 Configuración y definición del Módulo de entradas Analógica: 1762-IF4

Vamos a definir un canal de entrada analógica para poder ser utilizado como la entrada de la señal de 4mA a 20mA que nos entrega el transductor de temperatura en nuestro lazo de control PID maestro.

Primero nos dirigimos a nuestra ventana (I/O Configuration) damos doble clic a (1762-IF4 Analog 4 Chan Input), mostrado en la figura 6.9.1.1.

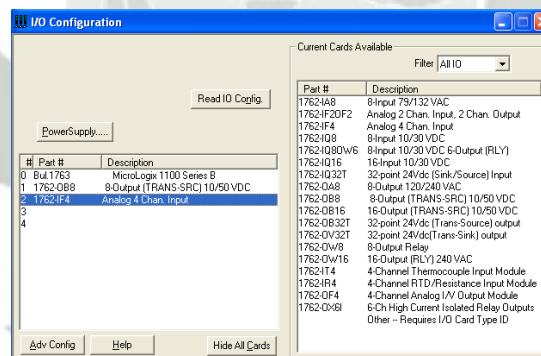


Figura 6.9.1.1 Definición de una de las entradas analógicas

Fuente: Programa RSLogix 500

Aparece la ventana llamada (Module #2: 1762-IF4 – Analog 4 Chan. Input) en donde escribiremos la serie ( B ) que corresponde al PLC, figura 6.9.1.2.

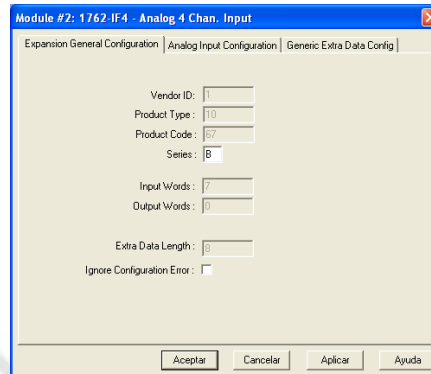


Figura 6.9.1.2 Definición de la serie para el MicroLogix 1100  
Fuente: Programa RSLogix 500

Elegimos la pestaña (Analog Input Configuration) en donde podemos observar los cuatro canales habilitados.

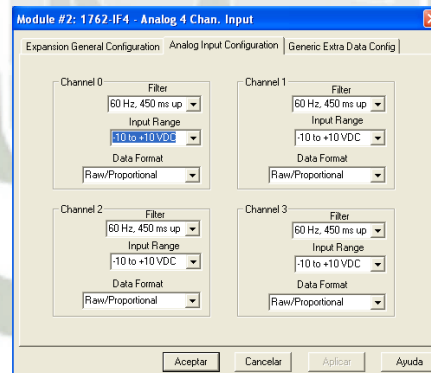


Figura 6.9.1.3 Ventana para la configuración de un canal analógico del  
módulo 1762-IF4

Fuente: Programa RSLogix 500

Definimos como la entrada de (4mA a 20mA el canal 0), con un filtro de (60 Hz, 450 ms update) además un formato de datos (Scaled PID)

que nos servirá para nuestro lazo PID maestro, mostrado en la figura 6.9.1.4.

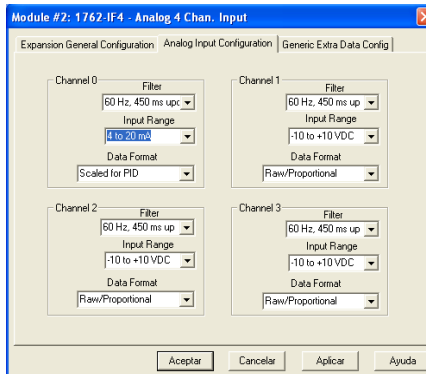


Figura 6.9.1.4 Configuración de un canal analógico del módulo 1762-IF4  
Fuente: Programa RSLogix 500

## 6.10 Instrucción para Escalamiento

### 6.10.1 Introducción

El escalado está relacionado con el rango a medir en la variable de entrada o salida y está también con la adecuación de los valores de tensión o corriente que están estandarizadas para medir determinados variables físicas.

En la mayoría de los casos los transductores se encuentran linealizados de fábrica, por lo tanto su comportamiento es lineal

### 6.10.2 Escalamiento para el sensado de temperatura

El siguiente cuadro muestra la relación entre la corriente en una de las entradas de los canales análogos del módulo expansor 1762-IF4 el número de cuenta y temperatura.

Corriente [mA]	N° de Cuenta	Temperatura °C
4mA	-468	-3
20mA	17011	103

Tabla 6.10.2.1 Escalamiento del sensado de temperatura

Fuente: Elaboración propia

Establecemos los rangos máximos y mínimos de temperatura que son de  $-3^{\circ}$  a  $103^{\circ}\text{C}$  asumiendo que utilizamos un termocupla tipo J, en el programa estos valores fueron escalados de  $-468$  a  $17011$ , mostrado en la figura 6.10.2.1.1.

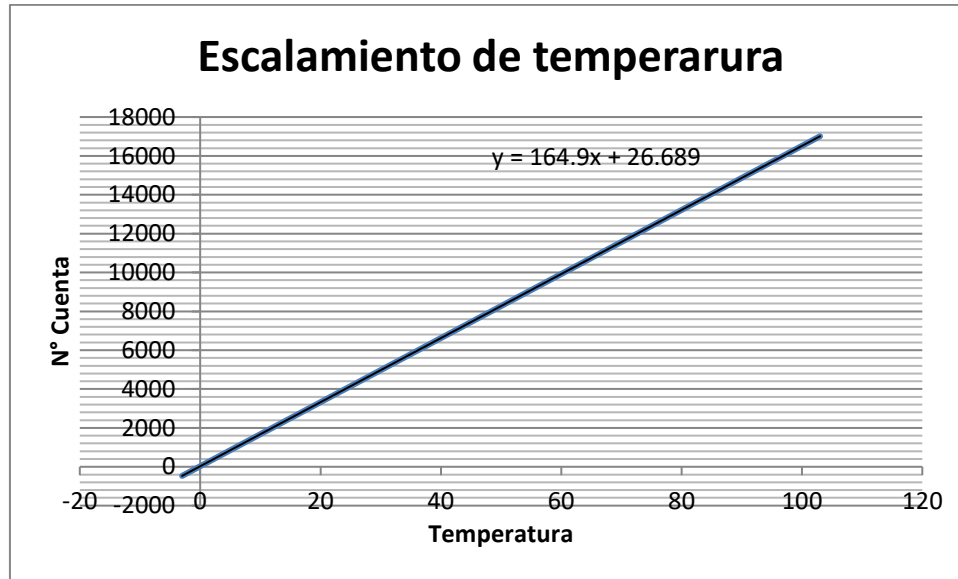


Figura 6.10.2.1.1 Ecuación de la recta par el escalamiento de temperatura

Fuente: Elaboración Propia

### 6.10.3 Cálculo de la ecuación canónica de la recta de temperatura.

$$\frac{X - X_a}{X_b - X_a} = \frac{Y - Y_a}{Y_b - Y_a} \quad (6.23)$$

En donde:

$X_a$  = Valor inicial de la temperatura

$X_b$  = Valor final de la temperatura

$Y_a$  = Valor inicial de numero de cuenta

$Y_b$  = Valor final de numero de cuenta

$$\frac{X - (-3)}{103 - (-3)} = \frac{Y - (-468)}{17011 - (-468)}$$

$$\frac{X + 3}{106} = \frac{Y + 468}{17479}$$

$$Y = \frac{17479}{106} \cdot X + \frac{2839}{106}$$

$$Y = 164,9 \cdot X + 26,68$$

#### 6.10.4 Escalamiento para el sensado de Revoluciones por Minuto

El siguiente cuadro muestra la relación entre el número de cuenta y las revoluciones por minuto.

N° de Cuenta	Revoluciones por Minuto
0	0
16383	3200

Tabla 6.10.4.1 Escalamiento del sensado de velocidad

Fuente: Elaboración propia

Establecemos un valor máximo y mínimo del número de revolución por minuto que son escalados desde 0 a 16383 de cuenta, como se muestra en la figura 6.10.4.1.1.

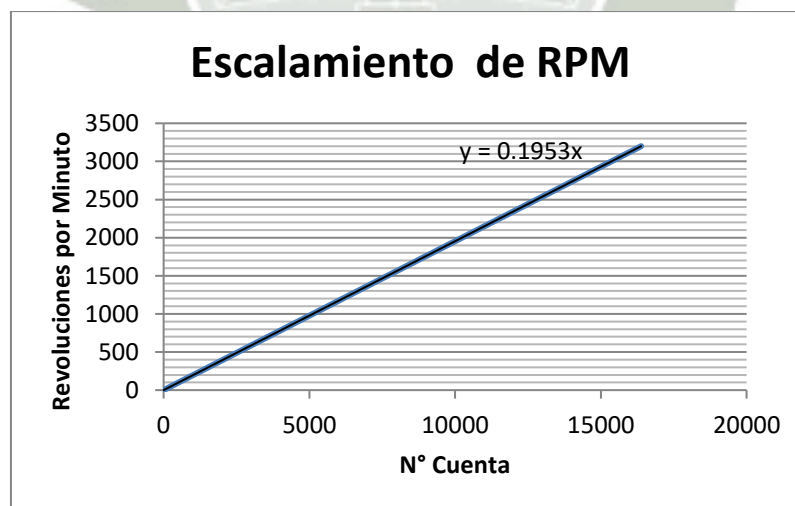


Figura 6.10.4.1.1 Ecuación de la recta para el escalamiento de la velocidad

Fuente: Elaboración Propia

### 6.10.5 Cálculo de la ecuación canónica de la recta de RPM

$$\frac{X - X_a}{X_b - X_a} = \frac{Y - Y_a}{Y_b - Y_a} \quad (6.24)$$

En donde:

$X_a$  = Valor inicial de RPM

$X_b$  = Valor final de RPM

$Y_a$  = Valor inicial de numero de cuenta

$Y_b$  = Valor final de numero de cuenta

$$\frac{X - (0)}{16383 - (0)} = \frac{Y - (0)}{3200 - (0)}$$

$$\frac{X}{16383} = \frac{Y}{3200}$$

$$Y = \frac{3200}{16383} \cdot X$$

$$Y = 0,1953 \cdot X$$

### 6.10.6 Escalamiento para el sensado de corriente de 1 Amperio

El siguiente cuadro muestra la relación entre el número de cuenta y el amperaje.

N° de Cuenta	Amperios
0	0
1023	0.94

Tabla 6.10.6.1 Escalamiento del sensado de corriente de 1 Amperio  
Fuente: Elaboración propia

Establecemos un valor máximo y mínimo de amperios que son escalados desde 0 a 1023 de cuenta, como se muestra en la figura 6.10.6.1.1.

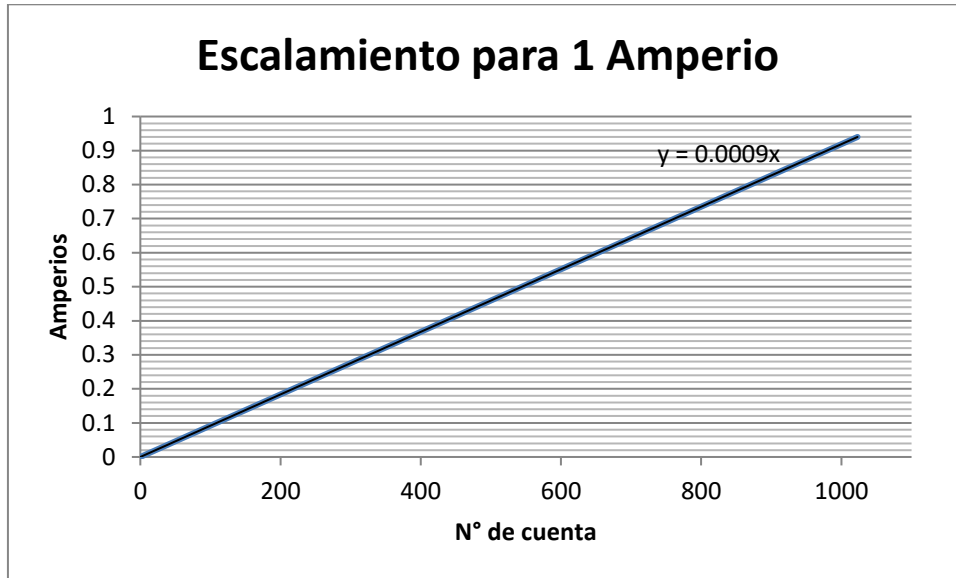


Figura 6.10.6.1.1 Ecuación de la recta para el escalamiento de 1 Amperio

Fuente: Elaboración Propia

### 6.10.7 Cálculo de la ecuación canónica de la recta para 1 Amperio

$$\frac{X - X_a}{X_b - X_a} = \frac{Y - Y_a}{Y_b - Y_a} \quad (6.25)$$

En donde:

$X_a$  = Valor inicial de amperios

$X_b$  = Valor final de amperios

$Y_a$  = Valor inicial de numero de cuenta

$Y_b$  = Valor final de numero de cuenta

$$\frac{X - (0)}{1023 - (0)} = \frac{Y - (0)}{0.94 - (0)}$$

$$\frac{X}{1023} = \frac{Y}{0.94}$$

$$Y = \frac{0.94}{1023} \cdot X$$

$$Y = 0,0009 \cdot X$$

### 6.10.8 Escalamiento para el sensado de corriente de 10 Amperios

El siguiente cuadro muestra la relación entre el número de cuenta y el amperaje.

N° de Cuenta	Amperios
0	0
1023	9.4

Tabla 6.10.8.1 Escalamiento del sensado de corriente de 10 Amperio

Fuente: Elaboración propia

Establecemos un valor máximo y mínimo de amperios que son escalados desde 0 a 1023 de cuenta, como se muestra en la figura 6.10.8.1.1.

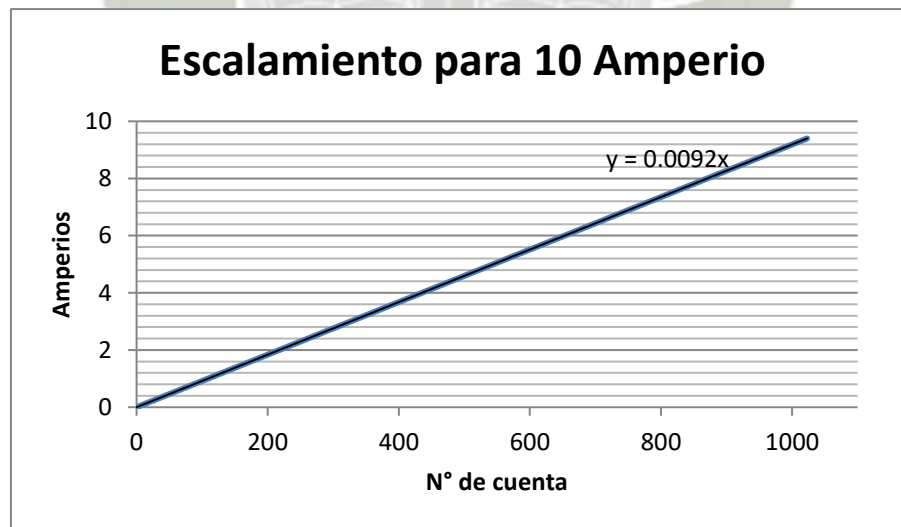


Figura 6.10.8.1.1. Ecuación de la recta para el escalamiento de 10 Amperio

Fuente: Elaboración Propia

### 6.10.9 Cálculo de la ecuación canónica de la recta para 10 Amperio

$$\frac{X - X_a}{X_b - X_a} = \frac{Y - Y_a}{Y_b - Y_a} \quad (6.26)$$

En donde:

$X_a$  = Valor inicial de amperios

$X_b$  = Valor final de amperios

$Y_a$  = Valor inicial de numero de cuenta

$Y_b$  = Valor final de numero de cuenta

$$\frac{X - (0)}{1023 - (0)} = \frac{Y - (0)}{9.4 - (0)}$$

$$\frac{X}{1023} = \frac{Y}{9.4}$$

$$Y = \frac{9.4}{1023} \cdot X$$

$$Y = 0,0092 \cdot X$$

### 6.11 Nuevo lazo de control de temperatura

En la figura 6.11.1.1 se muestra de manera gráfica el conexionado eléctrico e instrumental final de un solo nuevo lazo de control de temperatura de los 32 en las dos plantas de generación F.V que va a solucionar la problemática de sobre temperatura ambiental. Con ello se tiene en sala de control los datos de temperatura en tiempo real, el estado de operación de los ventiladores. Se hace uso de un variador de velocidad para el ventilador también de un enconder que proporciona un tren de pulsos hacia una entrada digital del PLC M340 de planta, además de transmisores para las sondas PT100.

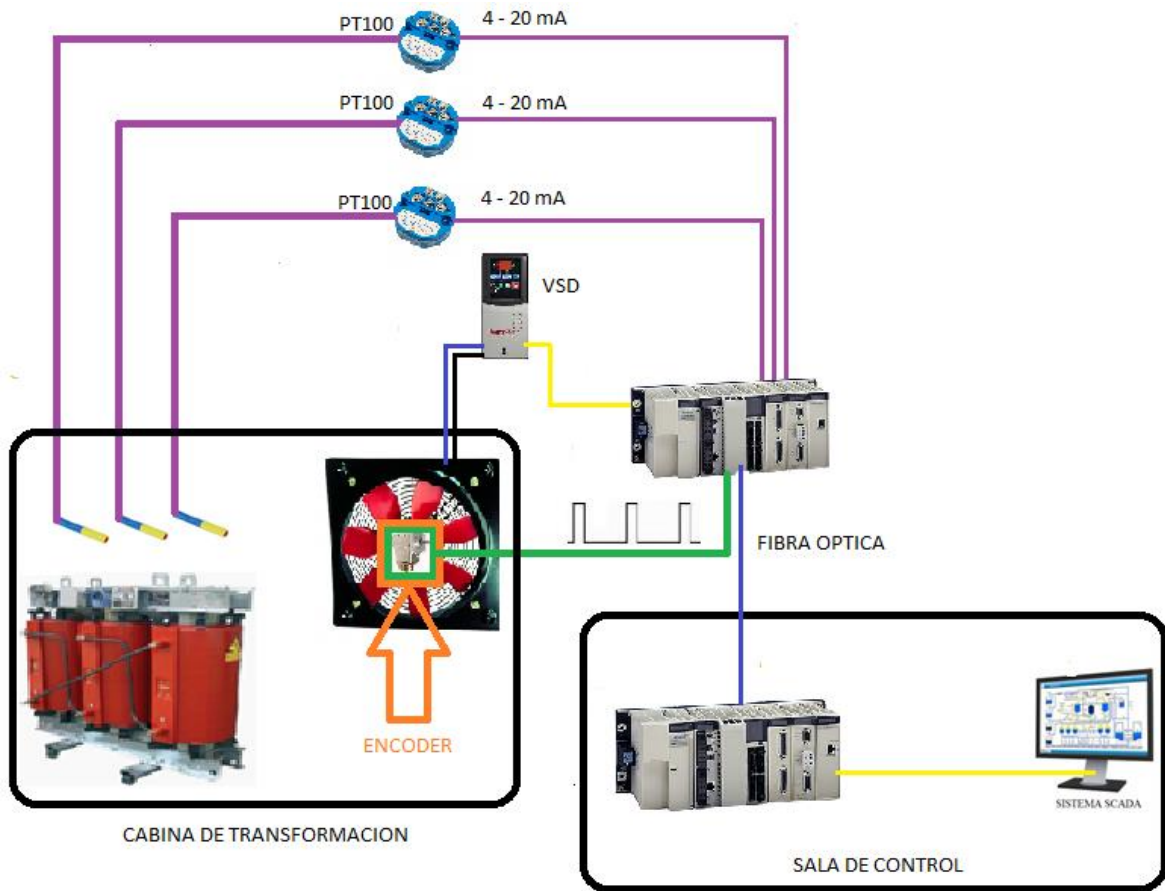



Figura 6.11.1.1 Nuevo lazo de control de temperatura para una sola cabina de transformación

Fuente: Elaboración propia



**CAPÍTULO VII**

**INTERPRETACION, ANÁLISIS DE  
PRUEBAS Y RESULTADOS**

## 7.1 Introducción

Una vez encontrado los valores de sintonía para los dos lazos de control maestro y esclavo se procede a mostrar la respuesta de nuestro sistema. Para esto se ha dispuesto la utilización de un entorno gráfico (SCADA) elaborado con el software RSVIEW 32 que nos será de gran ayuda para el monitoreo y supervisión.

## 7.2 Pruebas de temperatura y velocidad

La temperatura de trabajo del transformador es aproximadamente de 60°C hallado experimentalmente, entonces podemos utilizar un rango de temperatura de prueba menor a esta para fines de investigación.

También es necesario mencionar que las pruebas de temperatura experimentales fueron hechas con relación a un solo devanado del transformador de prueba por razones de costos, tomando en cuenta que los tres devanados se encuentran en equilibrio eléctrico.

El segundo lazo (esclavo) para el control cascada aumenta la eficiencia del control maestro,

### 7.2.1 Interpretación y análisis de las pruebas

En la figura 7.2.1.1.1 se muestra la curva de la temperatura con un valor consigna de 55°C, es importante mencionar que estos valores cambiaran respecto a las necesidades operacionales ajustado a la temperatura de trabajo de los dieciséis transformadores de planta.

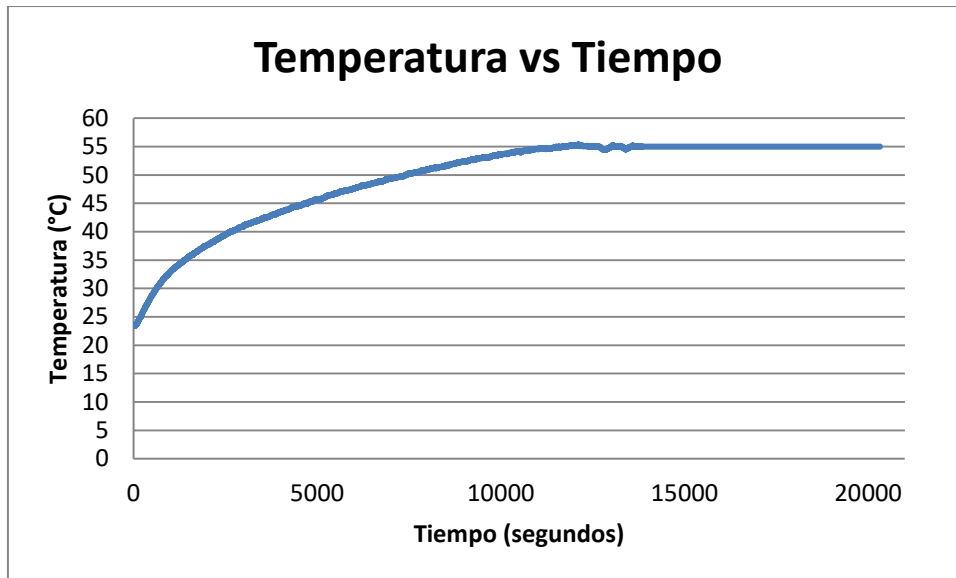


Figura 7.2.1.1.1 Respuesta de temperatura utilizando Control Cascada

Fuente: Elaboración propia

En la figura 7.2.1.1.2 se muestra el comportamiento de la velocidad sujeta a la respuesta del lazo maestro (temperatura).

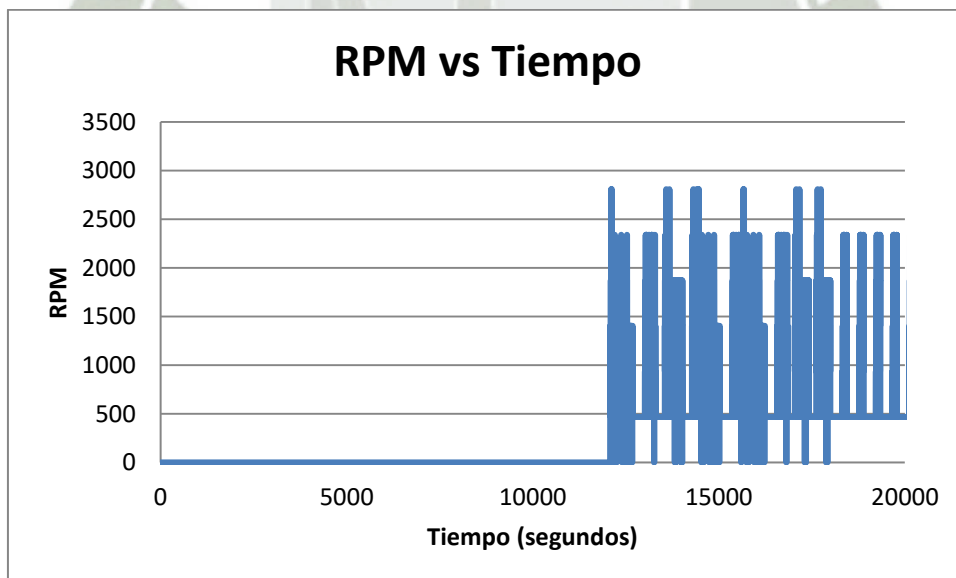


Figura 7.2.1.1.2 Respuesta de la velocidad utilizando Control Cascada

Fuente: Elaboración propia

### 7.3 Pruebas de sobre corriente

Necesitamos comprender el comportamiento de la corriente respecto a una carga de prueba sometida en un tiempo de trabajo.

Para poder simular una sobre corriente se utilizó una resistencia variable en dos líneas del lado secundario del transformador en seco de prueba como se muestra en la figura 4.5.1.2 ya que por razones de costos no se implementaron en los demás pares de líneas.

#### 7.3.1 Interpretación y análisis de las pruebas de sobre corriente

En la figura 7.4.1.1.1 muestra el cambio de valor de la carga ajustable de las dos líneas de prueba como consecuencia la corriente varía provocando una sobre corriente que es mayor al valor nominal (Capítulo 4 Tabla 4.1.2.1) del lado secundario del transformador de prueba. Pero en la figura se observa un error del 0,34 amperios ya que ha sobre pasado el valor configurado en el código Ladder de 8,66 amperios, debemos de aclarar que un relé de protección eléctrica real trabaja en el orden de los nanosegundos y es un equipo dedicado. Pero nos es útil para fines investigativos del comportamiento de esta en un determinado tiempo.

Mientras que para el lado primario de las dos líneas de prueba se observa que no ha llegado a la corriente de corte mayor de 0,84 amperios.

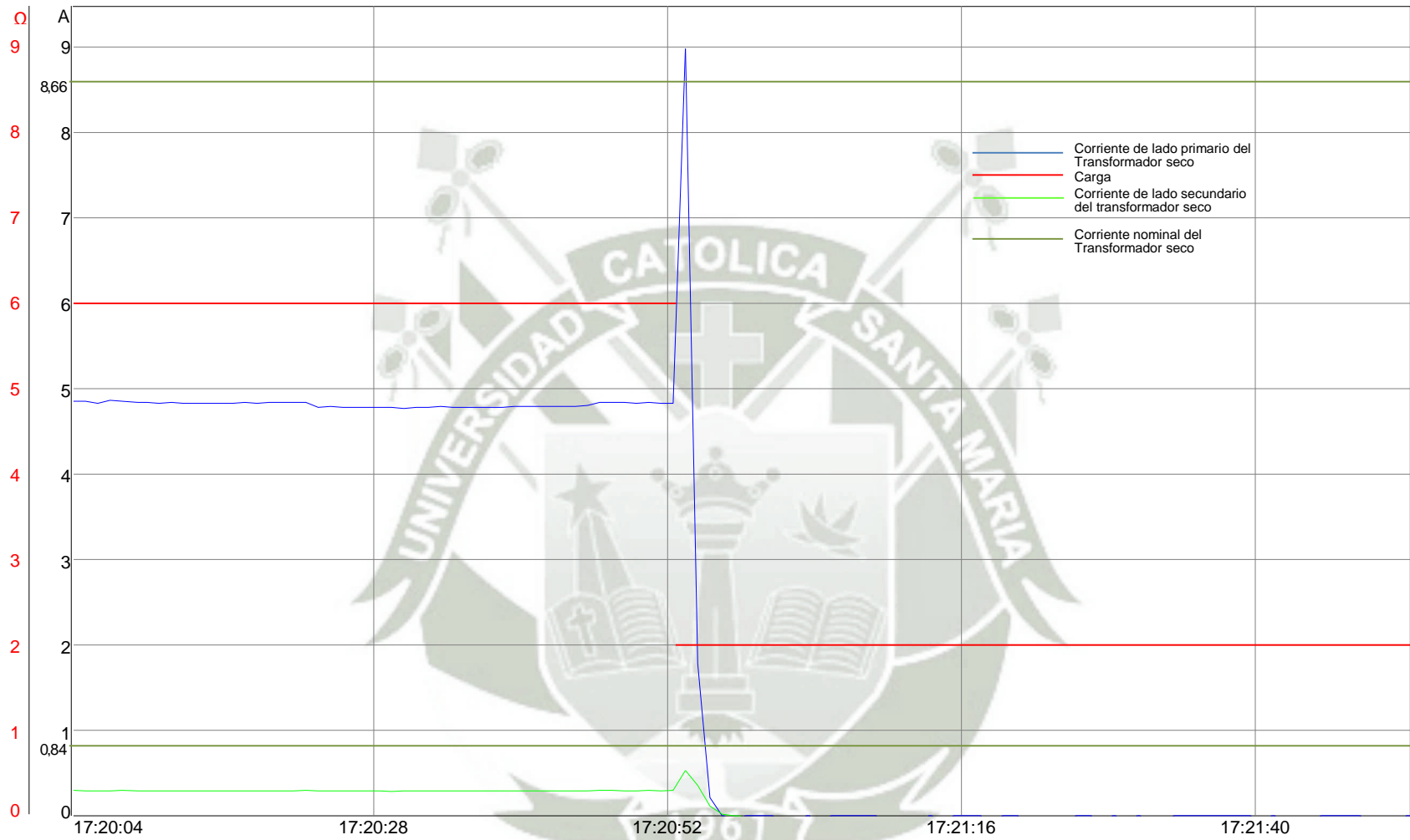


Figura 7.4.1.1.1 Comportamiento de la carga respecto al tiempo

## CONCLUSIONES

- Este cambio de lazo optimiza el consumo de energía ya que minimiza la velocidad de los ventiladores para cada cabina de transformación (Capítulo IV 4.12 pantalla de control de Velocidad).
- Se investigó consideraciones físicas como el efecto Joule, ley de Gay Lussac, principio de Venturi, presión negativa, protección eléctrica para subestaciones (Capítulo II 2.7 - 2.9 - 2.10 - 2.11 - 2.12), ingeniería a detalle de la construcción de estas instalaciones en centrales eléctricas fotovoltaicas, y también se investigó sobre la normativa eléctrica europea UNE-EN 60076 que permitió realizar las pruebas de pérdida de potencia, cortocircuito y en vacío con esto sentaron las bases teóricas generales de ejecución del prototipo de prueba (Capítulo IV 4.1.3 - 4.1.4 - 4.6.5).
- Se construyó un módulo metálico en donde se pueda realizar pruebas experimentales tomando en cuenta la normativa técnica eléctrica e instrumental, con una perspectiva de investigación y educacional (ANEXOS).
- Se implementó el control cascada de temperatura (maestro) y velocidad (esclavo) en el MicroLogix 1100 y se configuró sus respectivos módulos expansores que permitirán la interacción con los transmisores como el controlador de temperatura (REG48PUN1JHU) y transductores utilizados en el prototipo de prueba demostrando así que es posible implementar un control avanzado en el sistema de refrigeración para los transformadores secos encapsulados de planta. (Capítulo IV 4.10 y 4.11).

- Se diseñó un dispositivo transductor electro-opto-mecánico y un circuito acondicionador de corriente de bajo costo (Capítulo VI 6.7 - 6.8), demostrando así que los nuevos equipos que serán usados en el nuevo lazo de control de temperatura serán de importante utilidad para alcanzar un mejor control de la misma. (Capítulo VI 6.11)
- Se implementó la protección de sobre corriente en el prototipo de prueba utilizando sensores de corriente para la medición de una de las líneas de alimentación del lado primario y secundario del transformador de prueba que permitieran este fin. (Capítulo VII 7.3.1), con esto se alcanza a cumplir con la normativa de estas subestaciones en central de generación eléctrico fotovoltaica.
- Se implementó un sistema SCADA en donde se muestra una pantalla principal un gráfico de tendencias de temperatura, una de las líneas de corriente del lado primario y secundario del transformador. También unas sub-pantallas en donde se muestra la protección eléctrica de la subestación de prueba, los datos de temperatura y velocidad del ventilador (Capítulo IV 4.12).
- Con los resultados experimentales y teóricos se logra concluir que es posible la solución el control de temperatura y el estado de operación de los ventiladores implementado un control de velocidad adicional (Capítulo VII).
- Se logró implementar un prototipo de prueba para el control de temperatura y su respectiva protección eléctrica con base a las subestaciones de transformadores secos encapsulados de media tensión en aplicaciones de centrales de generación eléctrica fotovoltaica T – Solar Arequipa.

Los resultados de esta investigación podrían ser aplicados para fines de emprendimiento, ya que con las experiencias y bases teóricas obtenidas durante su ejecución se tiene lo necesario.



## RECOMENDACIONES

A continuación se propone:

- Se incentiva a la mejora del transductor de velocidad ya que presenta deficiencia en la lectura con un error de 0,10 segundos y el conteo del número de vueltas o en su defecto reemplazo que cumpla con su fin.
- Se recomienda la implementación de las otras formas de protecciones eléctrica para la subestación de prueba.
- Se recomienda el estudio de temperatura ambiente en planta con el propósito de establecer la relación del cambio de brusco de la misma con respecto al tiempo.
- Se motiva a hacer pruebas con otros tipos de cargas.
- Se recomienda mostrar el dato de velocidad en el tablero de distribución ya que ayudaría a una mejor operación en laboratorio.
- Se incentiva a la mejora del sistema de protección de sobre corriente ya que presenta un error de respuesta del 8%.

## COSTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Es necesario hacer un análisis económico de los costos para la ejecución de este si fuera el caso llegara ser implementado por la actual gestión, debemos tomar en cuenta que algunos dispositivos fueron diseñados de una manera experimental para disminuir costos de ejecución. En la tabla 8.1 muestra el listado de elementos utilizados.

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio en S/
Llave termo magnética 2x16	UND	3	96
Cinta Aislante	UND	4	28
Cable de 3 hilos apantallado	METRO	3	21
Cable Unipolar 1x28 0.15mm <sup>2</sup>	METRO	12	87.6
Terminal Para Cable Tipo PI	BOLSA	2	15
Cable Vulcanizado Flexible	METRO	12	168
Relay de Estado Solido	UND	4	152
Fuente de Poder Switching - 5VDC	UND	1	31
Juego de Brocas	UND	1	25
Terminal Sobremolda – 16	BOLSA	1	8
Terminal Sobremolda – 14	BOLSA	1	10
Bornera 6mm	METRO	2.5	10
Prensa Terminal	UND	1	60
Vinílico	PLANCHA	1	24
Tablero Eléctrico 50 x 40 x 35	UND	1	120
Circuito Acondicionador de Señal	UND	1	30
Estructura Metálica	UND	1	150
Tabla de Melamina 1.50 x 40	UND	1	40
Pinza Amperimétrica	UND	1	210
Bornera 4mm <sup>2</sup>	UND	10	35
Bornera 6mm <sup>2</sup>	UND	5	22.5
Cable Espiral de Polietileno	BOLSA	1	12

Prensa Estopa	UND	3	13.5
Porta cintillos Autoadhesivo	BOLSA	1	15
Llave Termo Magnética 3x24	UND	1	60
Pulsador Metálico	UND	3	7
Luz Piloto Ojo de Buey 220V - 22mm	UND	3	42
Cintillo de Color Blanco - 10mm	BOLSA	1	12
Tubo Corrugado	METRO	10	45
Cable AWG N°16 - Negro	METRO	25	40
Cable AWG N°18 - Azul	METRO	25	40
Cable AWG N°21 - Azul	METRO	20	70
Cable AWG N°21 - Rojo	METRO	20	70
Estaño	METRO	2	2
Ventilador 24VDC	UND	1	55
CNY – 70	UND	1	4.5
Termocupla Tipo J	UND	1	80
Controlador de Temperatura REG48PUN1JHU	UND	1	670.24
PLC MicroLogix 1100	UND	1	2.244,00
Módulo Expansor - 1762-OB8	UND	1	742.526
1606-XLP – Power Supply	UND	1	659
DIN Mounting Rail	UND	1	25
Llave Cocina Eléctrica	UND	3	105
Resistencia de Cocina Eléctrica	UND	2	14
Disipadores de Calor de Aluminio	UND	3	15
Rodaderas	UND	4	16
Transformador	UND	1	120
Prensa Terminal	UND	1	80
Programador Instrumentista	UND	1	3.000,00
Multímetro	UND	1	90
TOTAL		206.5	9.691,866

Tabla 8.1 Elementos Utilizados para el proyecto de investigación



# GENERALIDADES

## GLOSARIO

BT	Baja Tensión
CM	Centro de Medida
CT	Centro de Transformación
MT	Media Tensión
AT	Alta tensión
CFM	Pies cúbicos por minuto referida a medir el caudal o flujo de un gas o líquido.
MPPT	Es un dispositivo electrónico que regula la carga de baterías controlando el punto en el que los paneles solares empleados para la carga producen la mayor cantidad de energía eléctrica.
CN2	Centros de recolección de energía en continua que están conectadas a uno de los inversores.
SFV	Sistemas Fotovoltaicos
IDE	(Development Environment) es una aplicación informática que proporciona servicios integrales para facilitarle al desarrollador o programador el desarrollo de software.
HMI	(Human Machine Interface) que se usa para referirse a la interacción entre humanos y máquinas; Aplicable a sistemas de Automatización de procesos.

RTU            Unidad Terminal Remota es un dispositivo basado en microprocesadores, el cual permite obtener señales independientes de los procesos y enviar la información a un sitio remoto donde se procese.

TCP/IP        (Transmission Control Protocolo/Internet Protocol).

DMS           (Document Management System)





# DEFINICIONES

### **Irradiación**

La incidencia a largo tiempo de energía que incide en una superficie por unidad de superficie. Esta se mide en  $kWh/m^2$ .

### **Instalación Fotovoltaica**

Instalación que posee módulos fotovoltaicos para la transformación de energía solar en energía eléctrica

### **Línea, punto de conexión y medida**

Las instalaciones fotovoltaicas se conectan mediante una línea eléctrica con un punto de red a la encargada de distribuir o con la acometida del usuario final, denominado punto de conexión y medida.

### **Interruptor de interconexión automático**

Las protecciones de interconexión son gobernadas por los dispositivos de corte automático

### **Interruptor general**

La instalación fotovoltaica y la red de la empresa distribuidora son separadas por este dispositivo de seguridad y maniobra.

### **Inversores**

Equipo que convierte tensión y corriente continua en tensión y corriente alterna.

### **Transformador**

Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión, corriente en un circuito eléctrico de corriente alterna, sin modificar la potencia.

### **Calor específico**

Cantidad de calor que por kilogramo necesita un cuerpo para que su temperatura se eleve en un grado centígrado.

### **Masa**

Medida de cuanta materia hay en un objeto.

### **Peso**

Medida de que tanta fuerza ejerce la gravedad sobre ese objeto.

### **Calor**

La transferencia de energía de una parte a otra de un cuerpo, o entre diferentes cuerpos.

### **Temperatura**

Es una propiedad de los sistemas que determinan si están en equilibrio térmico.

### **Energía**

Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc.

### **Capacitancia térmica**

Es el almacenamiento de la energía interna en un sistema.

### **Ciclo de histéresis**

Una curva cerrada que representa el cambio de la inducción magnética o de la intensidad de magnetización en un cuerpo ferromagnético, cuando la fuerza magnética va abajo de una variación periódica.

### **Corrientes parasitas o de Foucault**

Las corrientes parasitas se producen cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable, o viceversa. El movimiento relativo causa una circulación de electrones, o corriente inducida dentro del conductor.

### **Convección natural**

En la convección natural el flujo resulta solamente de la diferencia de temperaturas del fluido en presencia de la fuerza gravitacional, puesto que la densidad del fluido disminuye con el incremento de temperatura

### **Convección forzada**

En la convección forzada se obliga al fluido a fluir mediante medios externos, como un ventilador o una bomba.

### **Reluctancia**

Resistencia que un circuito ofrece al paso del flujo magnético.

### **Impedancia**

Resistencia aparente de un circuito dotado de capacidad y autoinducción al flujo de una corriente eléctrica alterna, equivalente a la resistencia efectiva cuando la corriente es continua.

### **Reactancia**

Oposición al paso de una corriente alterna que ofrece una inductancia pura o una capacidad en un circuito; se expresa en ohms.

### **Densidad del aire**

Es la cantidad de masa de aire por una unidad de volumen

### **Ventilación forzada**

Extracción de inyección haciendo uso de equipos mecánicos

### **Ventilación**

Proceso cuyo objetivo es cambiar el aire con características no deseadas por un aire requerido

### **Ventilador**

Artefacto cuya función básica es mover el aire de un lugar a otro

### **Fotoeléctrico**

Consiste en la emisión de electrones por un material al incidir sobre él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general).

### **Campo de medida**

Es el conjunto de valores dentro de los límites superior e inferior de medida, en los cuales el instrumento es capaz de trabajar en forma confiable.

### **Alcance (span)**

Es la diferencia entre el valor superior e inferior del campo de medida.

### **Sensibilidad**

Es la capacidad de un instrumento de medida para apreciar cambios en la magnitud que se mide, de tal forma que lo más sensibles son capaces de detectar cambios más pequeños.

### **Saturación**

Es el área en la cual el instrumento ha sobrepasado su capacidad máxima de operación por lo que se presenta un comportamiento distinto a la operación normal y por lo tanto, no confiable.

### **Precisión**

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

un instrumento indicador. Generalmente esta se expresa en porcentaje (%) del SPAN. La precisión de un instrumento indica su capacidad para reproducir cierta lectura con una exactitud dada.

### **Linealidad**

La linealidad se da cuando la relación de una magnitud medida con la magnitud real se aproxima a una línea recta.

### **Resolución**

Se define como la relación entre el Span (magnitud total de medida) del instrumento de medición y la cantidad de cambios necesarios para llegar del valor mínimo de medición al valor máximo de medición del instrumento de medida, obteniendo así una resolución en porcentaje.

### **Drivers**

Controlador, rutina o programa que enlaza un dispositivo periférico al sistema operativo.

### **Bus de campo**

Es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción.

### **OPC**

Es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos industriales, basado en una tecnología Microsoft, que ofrece una interfaz común para comunicación que permite que componentes software individuales interactúen y compartan datos.



# **BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES DE PAGINAS WEB**

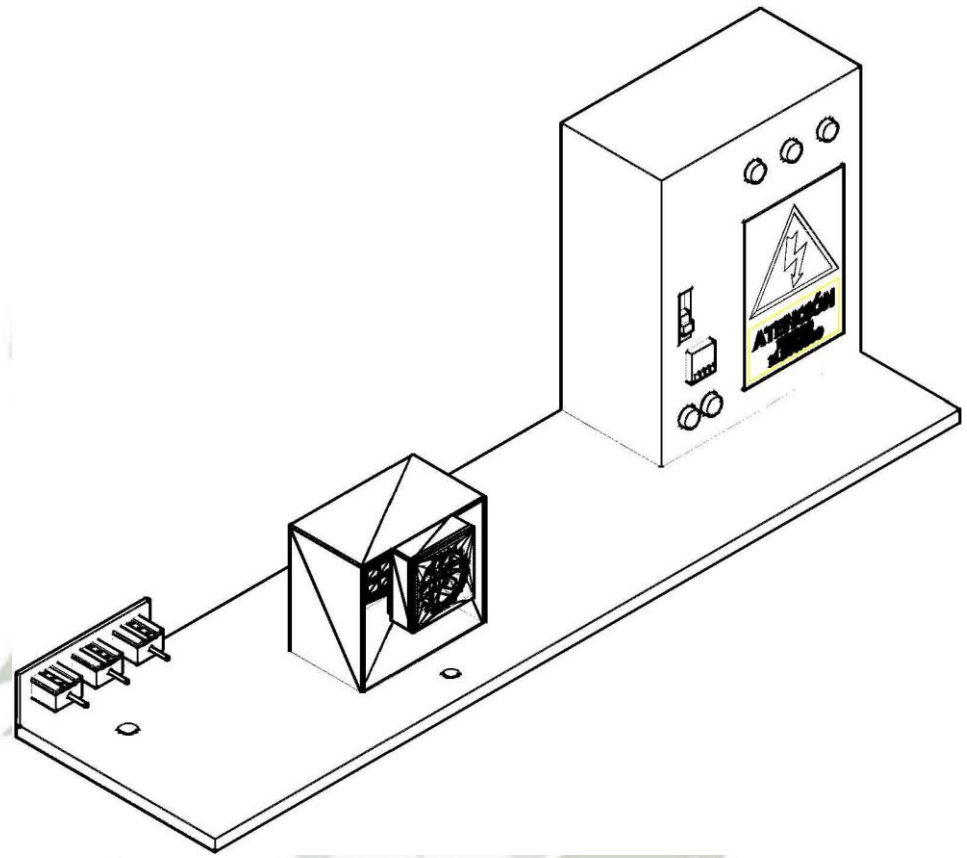
- Katsuhiko Ogata. (2010). Ingeniería de Control Moderna. (5ª edición). Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Terrell Croft, Clifford L. Carr, John H. Watt. (1987). Manual del Montador Electricista.
- T – Solar. (2012). Planta Fotovoltaica Arequipa Perú, 19 de Septiembre 2012. Especificaciones Técnicas.
- H. Ortega, “Sistema SCADA en INTOUCH para la supervisión y control de procesos, con la integración de los dispositivos de control en una red de comunicación industrial, mediante el interfaz OPC server”, Tesis pregrado, Programa Profesional de Ingeniería Electrónica, Universidad Católica de Santa María. Arequipa, 2010.
- **[1]** Pontificia Universidad Católica del Perú, noticias (2015). El potencial peruano para desarrollar energías renovables. Febrero 20, 2015.  
Disponible en:  
<http://puntoedu.pucp.edu.pe/noticias/el-potencial-peruano-para-desarrollar-energias-renovables/>
- **[2]** “Dinámica y control – Resumen”, (2012). Disponible en:  
<https://dinamicaycontrol.files.wordpress.com/2012/03/resumen-control-cascada.pdf>
- **[3]** Antonio Flores T. Universidad Iberoamericana – Santa Fe (2002). Control en Cascada. Noviembre 8, 2002. Disponible en:  
<https://es.scribd.com/doc/37587340/Control-Cascada>

- **[4]** “Controladores PID” [online]. Disponible en:  
[https://www.luna.ovh/planeta/es/Controlador\\_PID](https://www.luna.ovh/planeta/es/Controlador_PID)
  
- **[5]** “SCADA” [online]. Disponible en:  
<https://www.luna.ovh/planeta/es/SCADA>
  
- **[6]** Expo Electrónica – La ciencia responsable de la revolución tecnológica (2013). Sobre la evolución de la electrónica. Mayo 18, 2013. Disponible en:  
<http://museodeelectronica.blogspot.pe/p/control-logico-programable.html>
  
- **[7]** Tecnología de la automatización (2008). Sistema SCADA. Viernes 22 de Agosto, 2008. Disponible en:  
<http://lastecnologiasdelaautomatizacion.blogspot.pe/2008/08/sistemas-scada.html>
  
- **[8]** Carlos de C. Lozano y Cristóbal R. Morales. “Introducción a SCADA”. Disponible en:  
<http://www.uco.es/grupos/eatco/automatica/ihtm/descargar/scada.pdf>
  
- **[9]** Pérez-López, E. Los sistemas SCADA en la automatización industrial. Tecnología en marcha. Vol.28, N°4, Octubre- Diciembre Pág. 3-14. Disponible en:  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5280242.pdf>
  
- **[10]** 2016, Miguel Ángel Rodríguez Pozueta, Universidad de Cantabria (España). Transformadores Trifásicos con cargas monofásicas. (2016). Disponible en:  
[http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/transfo\\_trif%20cargas%20monof.pdf](http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/transfo_trif%20cargas%20monof.pdf)

- **[11]** Asociación Española de la industria Eléctrica. “Central fotovoltaica”. Disponible en:  
<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1345-central-fotovoltaica>
  
- **[12]** “Ensayo de transformadores” [online]. Disponible en:  
<http://spain-s3-mhe-prod.s3-website-eu-west-1.amazonaws.com/bcv/guide/capitulo/8448141784.pdf>
  
- **[13]** Universidad Nacional Del Callao (2013), Accionamiento Eléctrico. Junio 16, 2013. Disponible en:  
<http://s381e6f7ff84854f8.jimcontent.com/download/version/1410592739/module/10291758357/name/4%C2%B0%20INFORME%20DE%20ACCIONAMIENTO%20ELEC.%20-%20PLC.pdf>
  
- **[14]** “Descripción del producto”, AB. Julio 2005 [online]. Disponible en:  
<https://vdocuments.site/practica-1-comunicaciones-industriales.html>
  
- **[15]** “Automatización y Electrónica” [online]. Disponible en:  
[https://www.dirind.com/dae/monografia.php?cla\\_id=25](https://www.dirind.com/dae/monografia.php?cla_id=25)
  
- **[16]** Installation Instructions (2013). “MicroLogix 1762-OB8 Solid-State 24V DC Source Output Module”, AB. July 2013. Disponible en:  
[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1762-in008\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1762-in008_-en-p.pdf)
  
- **[17]** “Compact Switched Mode Power Supplies”, AB [online]. Disponible en:  
<http://ab.rockwellautomation.com/es/Power-Supplies/Compact-Switched-Mode-Power-Supplies>

- **[18]** Instrucciones para la instalación (2000). "Módulo de entrada analógica MicroLogix™", AB. Diciembre de 2000. Disponible en:  
[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1762-in012\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1762-in012_-es-p.pdf)
  
- **[19]** Instrucciones para la instalación (2000). "Módulo de entrada analógica MicroLogix™", AB. Diciembre de 2000. Disponible en:  
[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1762-in012\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1762-in012_-es-p.pdf)
  
- **[20]** "Convertidor de USB a serial" [online]. Disponible en:  
[http://www.trendnet.com/langsp/products/proddetail?prod=150\\_TU-S9](http://www.trendnet.com/langsp/products/proddetail?prod=150_TU-S9)
  
- **[21]** Micro JPM. Cartago, Costa Rica (2018). "Fotek SSR-40 DA Relay Estado Sólido 40A / 380V (3 - 32VDC)". Disponible en:  
<https://www.microjpm.com/products/fotek-ssr-40-da-relay-estado-solido-40a-380v-3-32vdc/>
  
- **[22]** Universidad Tecnológica de Pereira, Scientia et Technica Año XV, N°42, Colombia (2009). Estudio dinámico de un horno de resistencias eléctricas convertido a gas. Agosto de 2009. Disponible en:  
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4698785.pdf>
  
- **[23]** Ing. M. Sc. María Eugenia Díaz. (2010). Control de procesos. 13 de mayo del 2010. Disponible en:  
<http://controldprocesos.blogspot.pe/2010/05/elementos-de-un-sistema-de-control.html>
  
- **[24]** ARIAN. Control & Instrumentación. "¿Qué son y cómo funcionan las termocuplas?". Disponible en:  
<http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>

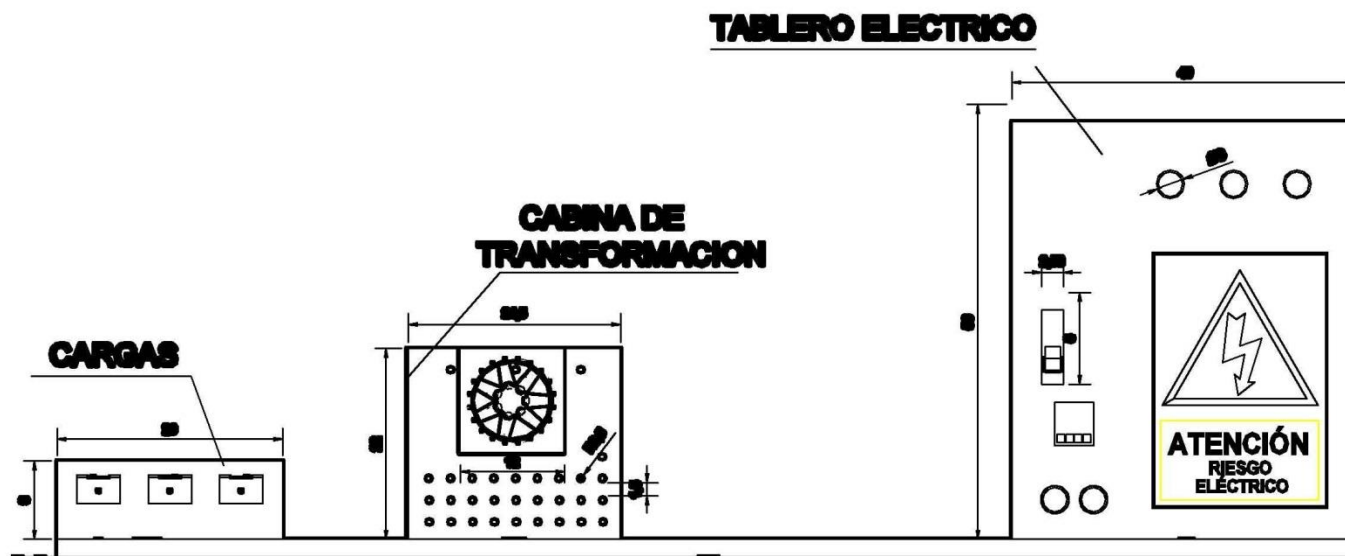




VISTA ISOMETRICA

UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA  
ESCUELA PROFESIONAL DE ING. ELECTRONICA

PROTOTIPO DE PRUEBA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA Y PROTECCION ELECTRICA

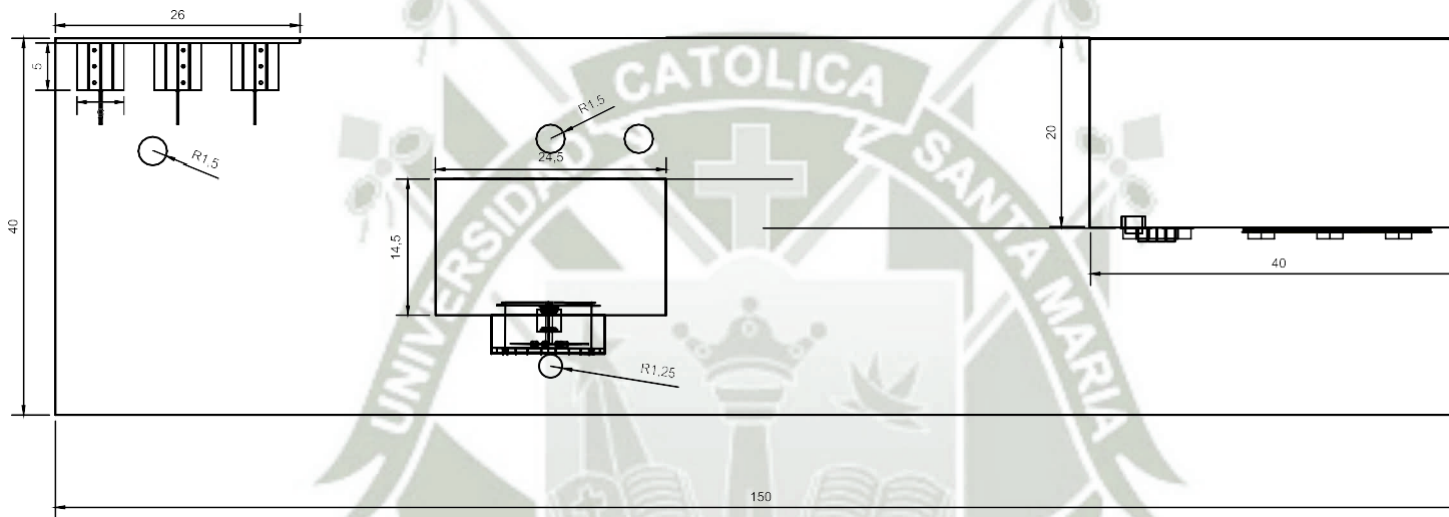


VISTA FRONTAL

UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA  
 ESCUELA PROFESIONAL DE ING. ELECTRONICA

PROTOTIPO DE PRUEBA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA Y PROTECCION ELECTRICA

BACHILLER JORGE RICHARD MONTES QUISPE | ESCALA:1/8 | FECHA:29/12/2017 | LAMINA N°: 2



VISTA HORIZONTAL

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE ING. ELECTRONICA**

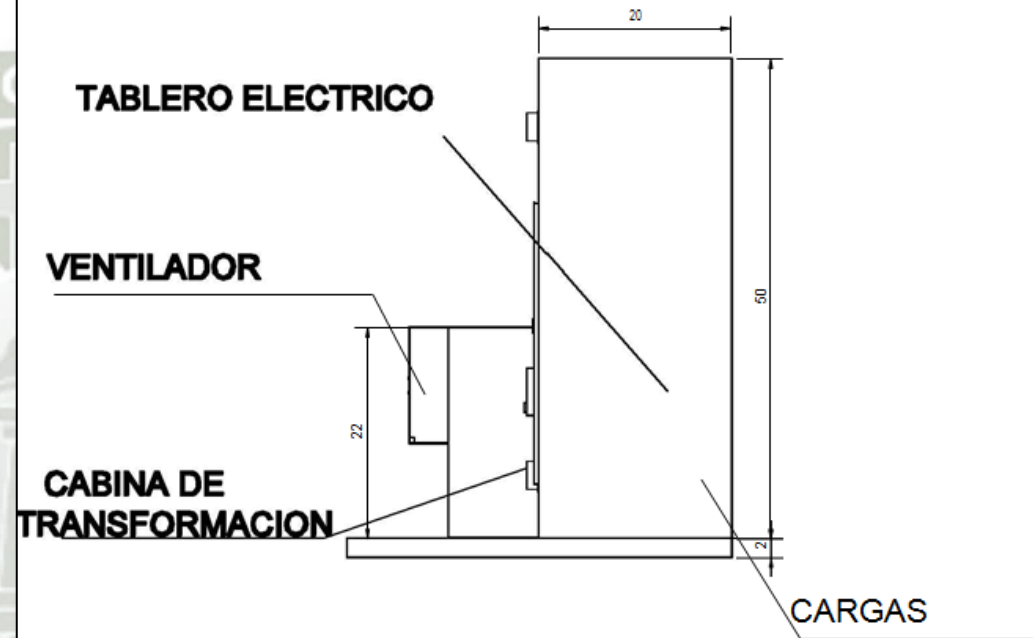
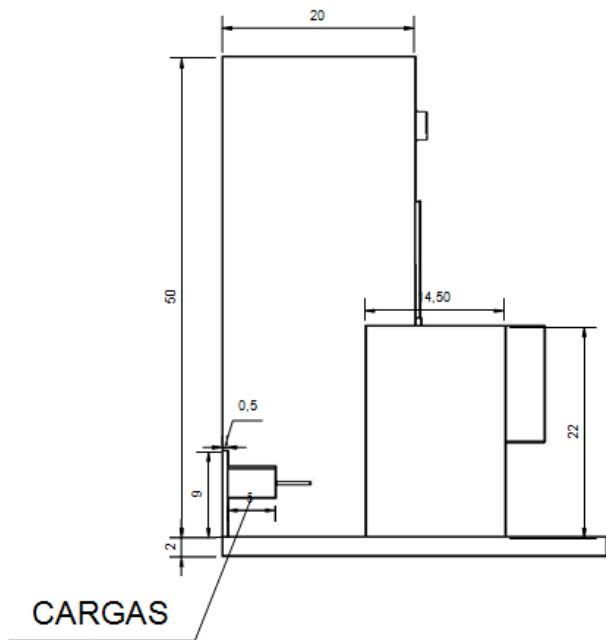
PROTOTIPO DE PRUEBA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA Y PROTECCION ELECTRICA

BACHILLER JORGE RICHARD MONTES QUISPE

ESCALA:1/8

FECHA:29/12/2017

LAMINA N°: 3



VISTA PERFIL DERECHO E I ZQUIERDO

UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA  
 ESCUELA PROFESIONAL DE ING. ELECTRONICA

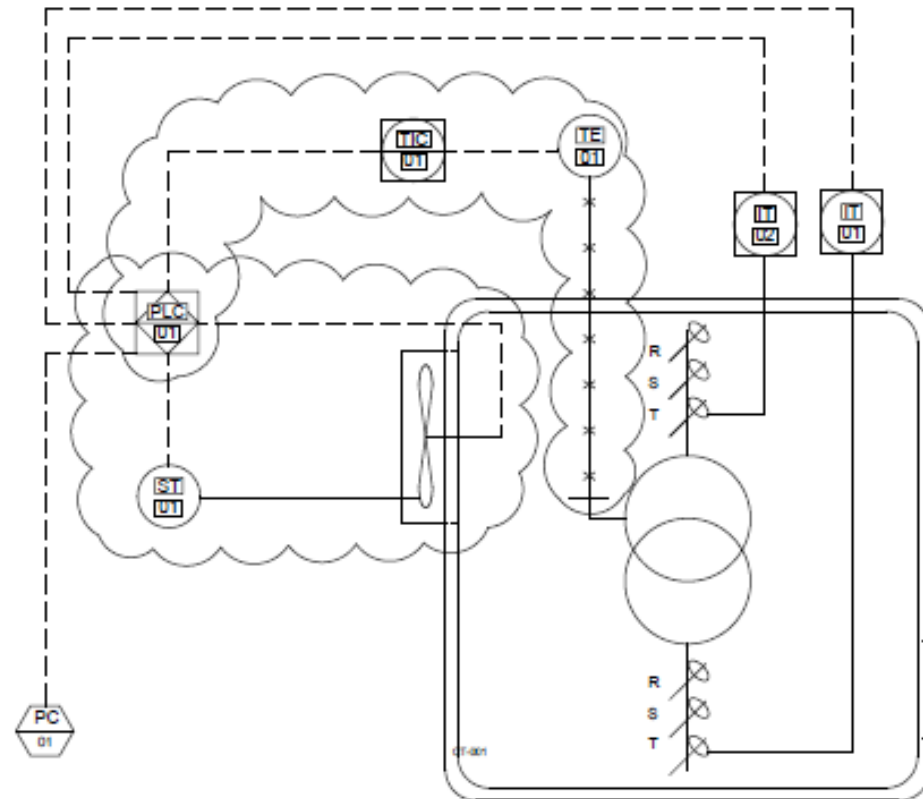
PROTOTIPO DE PRUEBA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA Y PROTECCION ELECTRICA

BACHILLER JORGE RICHARD MONTES QUISPE

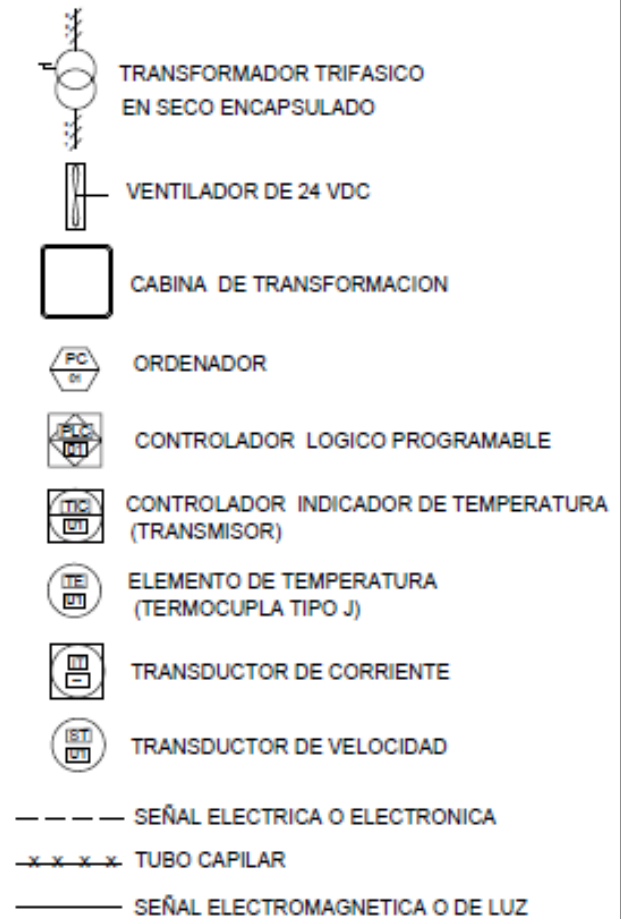
ESCALA:1/8

FECHA:29/12/2017

LAMINA N°: 4



## LEYENDA



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA  
 ESCUELA PROFESIONAL DE ING. ELECTRONICA

SIMBOLOGIA DE INSTRUMENTACION Y CONTROL DEL PROCESO

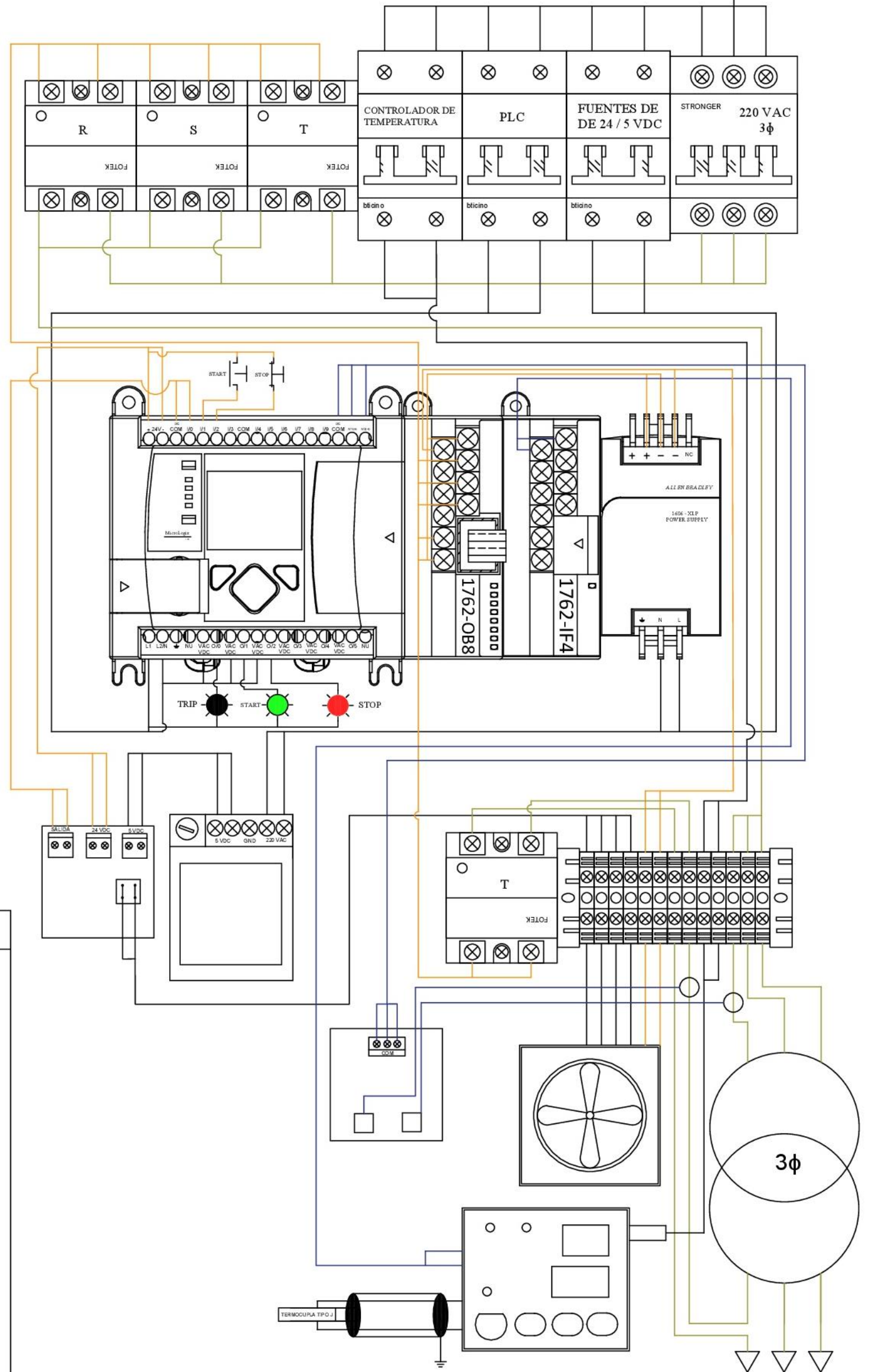
BACHILLER JORGE RICHARD MONTES QUISPE

ESCALA:1/8

FECHA:29/12/2017

LAMINA N°: 5

220 VAC  
3φ



### LEYENDA

-  Transformador Trifásico
-  Termocupla tipo J
-  Circuito acondicionador de RPM
-  Circuito acondicionador de Corriente
-  Relé de estado Solido
-  Fuente de alimentación de 5 VDC
-  Controlador de Temperatura
-  Ventilador
-  Llave termomagnética trifásica
-  Llave termomagnética monofásica
-  Indicador de iluminación
-  Botón pulsador Eléctrico
-  Sensor de Corriente
-  Carga
- Línea de 220 VDC
- Línea de 380 VAC
- Línea de señal analógica
- Línea de 24 VDC
- Línea de 5 VDC
- Señales del transductor de Velocidad

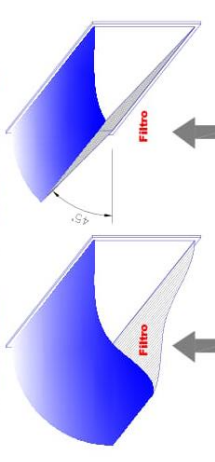
UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA  
ESCUOLA PROFESIONAL DE ING. ELECTRONICA

DIAGRAMA ELECTRICO DEL PROTOTIPO DE PRUEBA PARA  
EL CONTROL DE TEMPERATURA Y PROTECCION ELECTRICA

**LEYENDA DE EQUIPOS**

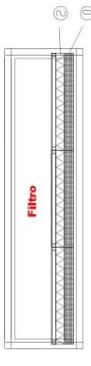
- FLUORESCENTE 2X36W IP44 PARA ALUMBRADO INTERIOR
- HUBLOT ESTANDBY DE T.M. ALUMBRADO DE EMERGENCIA
- INTERRUPTOR
- TOVA DE CORRIENTE DE W/8A-T

**REJILLA PICO PATO**

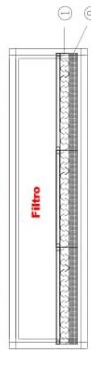


- Filtro de lamas 30 mm espesor
- Filtro de bolsas F5 230 mm espesor
- Mosquitera
- Prefiltro Zig Zag G4 50 mm espesor

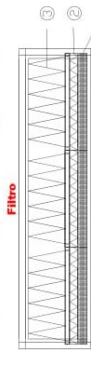
**PICO PATO Tipo 1**



**PICO PATO Tipo 2**



**PICO PATO Tipo 3**

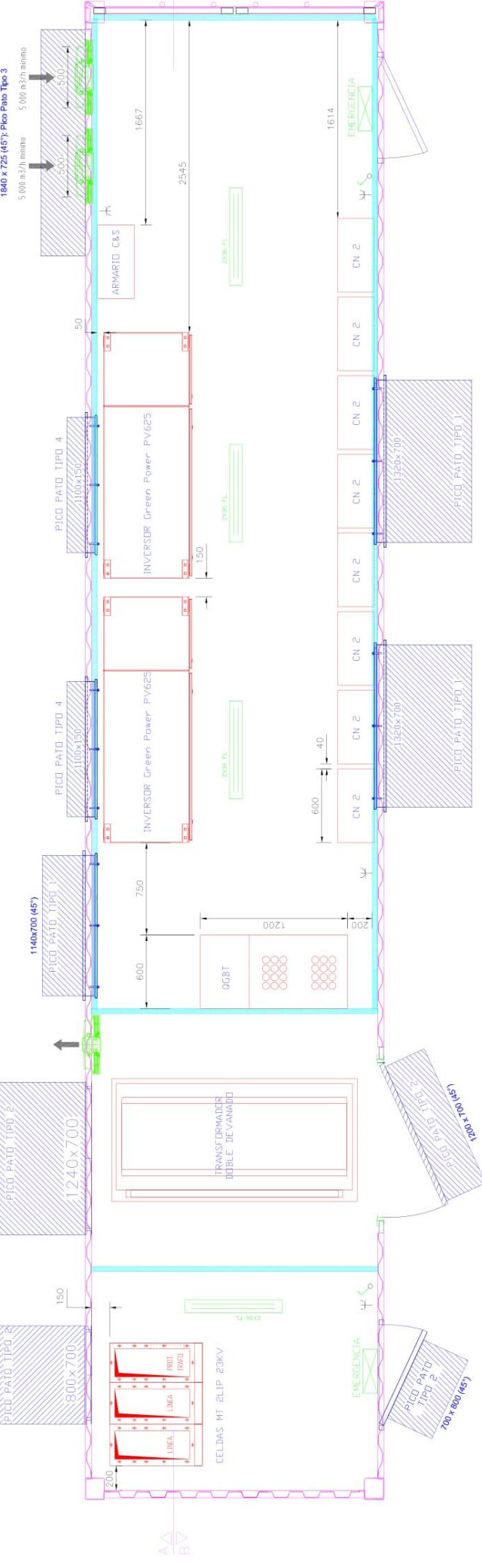


**PICO PATO Tipo 4**

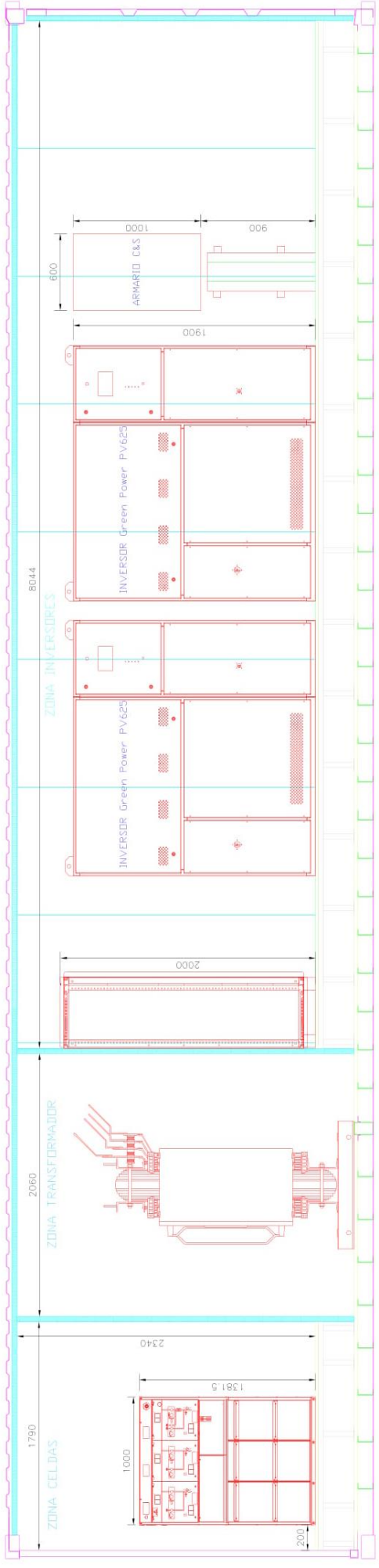


**Nota: las dimensiones de los filtros seran segun dimensiones de las rejillas**

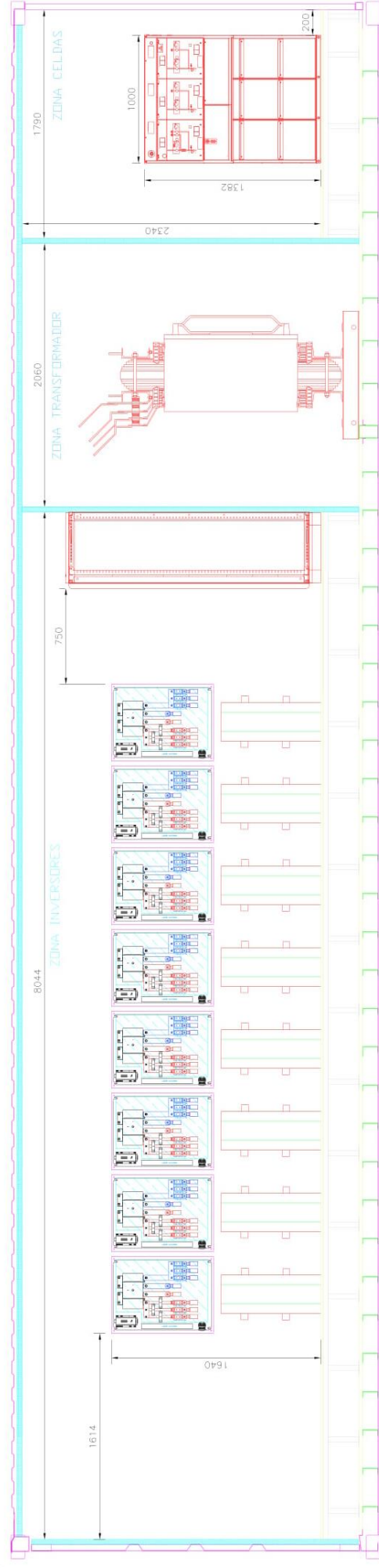
**VISTA EN PLANTA**



**SECCION A-A**



**SECCION B-B**



REV.	FECHA	AS BUILT	DESCRIPCION	DIS.	COMPR.	APPL.
A	14/09/2011	AS BUILT		DIS.	DIS.	DIS.

Proyecto: **PARQUE SOLAR FV "PERU"**  
 Instalación: **PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA MAJES SOLAR 20T**

Edificio prefabricado CT. Disposicion de Equipos

Documento de Proyecto n°: **1125/MAJ.PMT.02.2**  
 Hoja: de: Escala: A3 1/45