

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en electricidad y computación

Diseño, prototipado y simulación de un sistema de bajo costo de Regulación Automática de Voltaje en baja tensión trifásico para reducir sus fluctuaciones, utilizando técnicas de control clásico.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Abel Enrique Valenzuela Castro

Julián Andrés Niveló Álvarez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedicamos principalmente a Dios por darnos la sabiduría y fuerzas necesarias para poder culminar con éxito nuestra vida universitaria, a nuestros padres, que son un pilar fundamental para seguir siempre adelante.

A los Ing. Dennys Cortez y César Martín que con sus conocimientos nos aconsejaron en todo momento para poder desarrollar el prototipo que finalmente implementamos.

AGRADECIMIENTOS

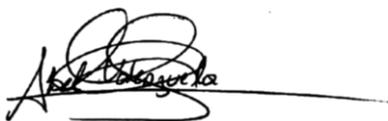
En primer lugar, queremos agradecer a Dios, por darnos la salud y capacidad para culminar el proyecto, a nuestros padres por acompañarnos durante nuestra estancia en la universidad, brindando palabras de aliento para poder seguir adelante.

Al Ing. Fabián Mantilla que brindó su apoyo en todo momento y puso a disposición las instalaciones de su empresa para poder desarrollar el proyecto.

A todos los profesores que han sido parte de este proceso universitario, que compartieron sus conocimientos para poder desarrollarnos como mejores profesionales.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *ABEL ENRIQUE VALENZUELA CASTRO* y *JULIÁN ANDRÉS NIVelo ÁLVAREZ* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Sr. Abel Valenzuela



Sr. Julián Niveló

EVALUADORES

.....
Ing. Dennys Cortez, MSc.

PROFESOR DE LA MATERIA



.....
Ing. Cesar Martín, PHD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto integrador de la carrera de Electrónica y Automatización tiene como objetivo principal diseñar un regulador automático de voltaje en baja tensión aplicando técnicas de control, esto debido a que, en diferentes áreas industriales de Ecuador, existen fluctuaciones de voltaje durante la jornada de producción de las empresas.

Para el diseño e implementación del regulador automático de voltaje, se utilizó un controlador universal, el cual cuenta con características PID (Control Proporcional Integral Derivativo), lógica difusa y control ON-OFF incorporadas que gracias a su diseño permite obtener una respuesta adecuada sobre el valor de voltaje medido. De esta manera, se le configura al controlador universal el set-point necesario según la aplicación a requerir, una vez que el controlador universal realizó el proceso de calcular el error (diferencia entre el set-point y el voltaje medido) se tomó la acción de aumentar o disminuir el voltaje y para ello se le conectó a continuación el motor del Variac (transformador variable) que permitió mover las escobillas del transformador para variar dicho voltaje.

Al implementar el regulador automático de voltaje, se ayuda a las empresas a evitar detener la producción para poder cambiar el TAP del transformador, significando un beneficio económico ya que pueden obtener un sistema continuo de producción sin necesidad de intervenciones por cambios en los niveles de tensión.

Palabras Clave: Regulador automático de voltaje, transformador variable, control, fluctuaciones de voltaje.

ABSTRACT

This integrative project of the Electronics and Automation career aim to design an automatic voltage regulator in low tension by applying control techniques, this due to problems in voltage fluctuations during the production day in different industrial areas of Ecuador.

For the design and implementation of the automatic voltage regulator, a universal controller was used, which has built-in PID (Derivative Proportional Integral Control) features that through its design allows to obtain an optimal response on the measured voltage value. In this way, the universal controller is given the necessary set-point according to the application to be requested, once the universal controller performed the process of calculating the error (difference between the set-point and the measured voltage) the action was taken to increase or decrease the voltage and for this purpose the Variac motor (variable transformer) was then connected to it, which allowed moving the brushes of the transformer to vary the voltage.

By implementing the automatic voltage regulator, companies can avoid stopping production in order to change the TAP of the transformer, which means an economic benefit since they can obtain a continuous production system without needing to interrupt the system due to changes in voltage levels.

Keywords: *Automatic voltage regulator, variable transformer, control, voltage fluctuations.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ABREVIATURAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
CAPÍTULO 2.....	12
2. METODOLOGÍA.....	12
2.1 Diseño conceptual de la etapa de potencia.....	13
2.2 Diseño conceptual de la etapa de control.....	22
CAPÍTULO 3.....	40
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	40
CAPÍTULO 4.....	49
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
4.1 Conclusiones.....	49
4.2 Recomendaciones.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51

ANEXOS.....	53
APÉNDICES.....	65

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
Variac	Autotransformador Variable

SIMBOLOGÍA

V	Voltaje
A	Amperios
VA	Voltio Amperio
kVA	Kilo voltio amperio
Hz	Frecuencia en Hertz

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Transformador de tipo seco.....	4
Figura 1.2. Transformador de rango variable (variac).....	5
Figura 1.3. Gráfica con controlador ON/OFF con histéresis	7
Figura 1.4. funcionamiento de motor síncrono	8
Figura 1.5. Diagrama rectificador onda completa trifásico	10
Figura 2.1. Diagrama unifilar eléctrico potencia.....	13
Figura 2.2. Diagrama de accionamiento de dos bobinas de disparo del disyuntor principal.....	15
Figura 2.3. Etapa de regulación	20
Figura 2.4. Etapa de potencia simulada regulación	20
Figura 2.5. Diagrama de bloques de la etapa de control	22
Figura 2.6. Circuito transductor de tensión	23
Figura 2.7. Circuito simulado transductor de tensión	23
Figura 2.8. Diagrama de un transformador	24
Figura 2.9. Gráfica de la relación de transformación	25
Figura 2.10. Gráfica de voltaje rectificado y filtrado	26
Figura 2.11. Linealidad entre los valores de entrada y salida	27
Figura 2.12. Configuración de terminales del controlador universal	30
Figura 2.13. Parametrizaciones de funciones del controlador universal	31
Figura 2.14. Datos de parametrización de IN1	32
Figura 2.15. Datos de parametrización de IN1U y DP1.....	33
Figura 2.16. Datos de parametrización de IN1L y IN1H.....	34
Figura 2.17. Datos de parametrización de las salidas.....	34
Figura 2.18. Datos de parametrización de O1TY	35
Figura 2.19. Datos de parametrización de A1FN y A1MD	35

Figura 2.20. Datos de parametrización de A1FT.....	36
Figura 2.21. Datos de parametrización.....	37
Figura 2.22. Diagrama general del regulador de voltaje automático	38
Figura 2.23. Rango de histéresis en los que se activa la salida.....	39
Figura 3.1. Respuesta del transductor de tensión ante una subida de voltaje	41
Figura 3.2. Respueta del transductor de tensión ante una caída de voltaje	41
Figura 3.3. Prueba de respuesta del controlador	42
Figura 3.4. Grafica de la respuesta del controlador superado el umbral.	42
Figura 3.5. Grafica de las señales de salida 1, salida 2 y voltaje de entrada	44
Figura 3.6. Diagrama completo de la etapa de control y potencia.....	45
Figura 3.7. Grafica de las señales del voltaje de salida, voltaje de entrada y valor de referencia en base a datos experimentales	46
Figura 6.1. Adquisición de autotransformador variable (VARIAC) de un laboratorio	53
Figura 6.2. Adaptación de nucleo y rebobinado del transformador trifasico para regulación 380/85VAC	53
Figura 6.3. Conexión de transformador trifasico, lado secundario con los aisladores de entrada y aisladores de salida y lado primario con las escobillas de autotransformador variable	54
Figura 6.4. Conexión de escobillas con el lado secundario del transformador, conexion de alimentacion con los aisladores de entrada con netro y conexión de motor sincrónico a sensores final de carrera.....	54
Figura 6.5. Aisladores de entrada fase A, B, C y N, Aisladores de salida a, b y c	55
Figura 6.6. Adquisición del controlador BTC9300.....	55
Figura 6.7. Parametrización para conocer la respuesta y velocidad del controlador ante una entrada de voltaje regulada por un potenciómetro de 0-10Vdc desde una fuente de 12Vdc	56

Figura 6.8. Primer diseño del transductor de tensión con opams y potenciómetro para ajustar las constantes de la ecuación de la recta.....	56
Figura 6.9. Prueba con el primer diseño de transductor de tensión para verificar los voltajes en la salida de este.....	57
Figura 6.9. En base las pruebas realizadas al primer modelo se rediseña una forma más reducida del transductor que cumple las condiciones necesarias para el control.....	57
Figura 6.10. Montaje en el gabinete del regulador de voltaje la fuente de 12VDC, transformador de aislamiento, transductor de tensión y contactores uno parada giro.....	58
Figura 6.11. Montaje del controlador BTC9300 en el gabinete del regulador de voltaje.....	58
Figura 6.12. Conexión del motor síncrono a los contactores.....	59
Figura 6.13. Laboratorio de la empresa donde se realizan pruebas con la fuente regulable.....	59
Figura 6.14. Prueba del transductor de tensión con controlador ante variaciones controladas de voltaje alrededor del punto de operación 380VAC.....	60
Figura 6.15. Se mide el voltaje que se envía al control del regulador de voltaje, el cual es 380VAC aproximadamente.....	61
Figura 6.16. Prueba de la respuesta del regulador ante variación elevadas en el voltaje de entrada, se observa que un incremento de 430VAC mientras que el voltaje de salida es de 380VAC aproximadamente como lo indica el controlador.	62
Figura 6.17. Análisis de onda en cada fase para saber cuál presenta menos cantidad de armónicos y conectar el control para reducir el ruido en el transductor de tensión.....	62
Figura 6.18. Análisis del voltaje de salida del regulador, tomada de la fase b y el neutro del sistema, para verificar la relación que muestra el controlador con el valor real de voltaje y se confirma el correcto funcionamiento, ya que el indicador	

en rojo esta próximo al punto de operación 380VAC y 217.8VAC corresponde a 377.24VAC línea a línea 63

Figura 6.19. Prueba con todas las etapas interconectadas, por medio del suministro del laboratorio de la empresa se realizan fluctuaciones de voltaje reales y se observa la regulación efectiva, en el caso se tiene un voltaje 222.8VAC del multímetro y desde un medidor externo se mide 386.4VAC línea en la salida del regulador, se puede ver como las escobillas se encuentran separadas por una distancia equivalente al voltaje sustraído 64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del autotransformador elevador del regulado de voltaje	14
Tabla 2.2. Características del transformador trifásico para regulación	17
Tabla 2.3. Características controlador BTC9300	30
Tabla 3.1. Respuesta de voltaje del transductor de tensión.....	40
Tabla 3.2. Valores experimentales obtenidos en el incremento de voltaje	43
Tabla 3.3. Valores experimentales obtenidos ante una caída de voltaje.....	43
Tabla 3.4. Listado de materiales usados en el regulador de voltaje con sus respectivos precios	48

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La empresa eléctrica del Ecuador se encarga de brindar el servicio público de energía con la finalidad de otorgar los niveles de voltajes adecuados a industrias y residencias. Sin embargo, al momento de que se conectan cargas de gran demanda durante una jornada de producción y estas empiezan a operar al mismo tiempo, se genera una variación de voltaje no deseada, lo que puede causar daños en los equipos electrónicos y eléctricos más sensible. Con el pasar de los años la empresa eléctrica se ha modernizado con la finalidad de poder brindar un mejor servicio de calidad, a pesar de ello, todavía se evidencian problemas en áreas industriales y zonas rurales.

Este proyecto se encarga de analizar, y diseñar un regulador de voltaje automático en baja tensión para brindar una mayor estabilidad de voltaje a las industrias, para ello, se hace uso de técnicas de control que permitirá la regulación de voltaje automático durante las 24h.

1.1 Descripción del problema

En el área industrial la distribución de voltaje en media tensión (13.8KV – 13.2KV) suele fluctuar durante una jornada de producción, por motivos de consumo y falta de mantenimiento de la red eléctrica, esto causa que, en muchas fábricas, empresas, piladoras, etc. Se vea reflejado este cambio de potencial en el lado de baja tensión de los transformadores en plena carga. Por ejemplo, realizando un estudio durante 24 horas, se pudo analizar que el voltaje a un nivel de tensión de 380 [V] se comporta de la siguiente manera:

- (8:00 a 12:00) varia 345 a 370 V, consumos altos
- (12:00 a 18:00) varia 310 a 360 V, consumos muy altos
- (18:00 a 23:00) varia 370 a 410 V, consumos bajos
- (23:00 a 8:00) varia 390 a 425 V, consumos muy bajos

Estas variaciones obligan a la empresa a detener la producción para cambiar el TAP del transformador principal, para aumentar o reducir el nivel de voltaje en baja tensión, esto causa pérdidas económicas en la producción. Además, si esto no se realiza, las fluctuaciones causan daños a largo plazo en los dispositivos eléctricos y electrónicos sensibles de las maquinas como: motores, variadores de frecuencia, arrancadores suaves, etc.

1.2 Justificación del problema

La regulación automática de voltaje en baja tensión proporciona la rapidez de ejecución ante una fluctuación en la distribución eléctrica en media tensión, dando como resultado un voltaje constante dentro del rango normalizado, según el nivel de tensión del transformador que fue proyectado por la empresa contratista. Esto para el área industrial significa ganancias, ya que no se necesita detener la producción y en consecuencia se incrementa el tiempo de vida útil en las máquinas. Además, el control del voltaje en baja tensión resulta más económico que un sistema igual en media tensión, ya que la empresa eléctrica restringe la adaptación de cualquier máquina que no sea el transformador sin previa aprobación y por tal motivo se evita realizar un nuevo proyecto eléctrico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un regulador automático de voltaje en baja tensión aplicando conocimientos en sistemas de control industrial, potencia y transformadores para mantener el nivel de voltaje constante ante fluctuaciones generadas durante una jornada producción.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Plantear el sistema eléctrico y de control considerando las fluctuaciones que se presentan en una jornada de producción e implementarlos para que el voltaje se mantenga en el rango normalizado.

- Diseñar el circuito eléctrico-electrónico utilizando un controlador, para que se obtenga la respuesta de error ante un valor de referencia y la señal medida, tal que, con la acción del actuador (motor síncrono) se compensan el voltaje del regulador.
- Implementar el uso de controladores, para el tratamiento de las señales eléctricas medidas y la ejecución del cambio automático en el nivel de voltaje de baja tensión.
- Elaborar el prototipado en base a las simulaciones y diseño del controlador, para una industria cuya demanda sea menor a los 100KVA.

1.4 Marco teórico

1.4.1. Regulador de voltaje automático

En la Escuela Politécnica Nacional (Quito – Ecuador), estudiantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y electrónica realizaron su trabajo de titulación en base a su proyecto “Diseño y Construcción de un Regulador Automático de Voltaje Para el Generador Síncrono de 8.58kVA del Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia”. (Gutiérrez y flores, 2019)

Su investigación se basa en el diseño e implementación de excitatriz de tipo estática que satisfaga los requerimientos del generador síncrono, también el limitador de subexcitación, limitador de sobre excitación y el limitador que relaciona voltaje con frecuencia. Además, se realiza el circuito de potencia del regulador automático, el cual se realimenta del mismo generado para permitir la regulación de voltaje terminal.

En este tema de titulación hacen uso del control PID específicamente tipo PI implementado con un microcontrolador Arduino Mega 2560, el cual se encarga del funcionamiento automático considerando las limitaciones del sistema, con la finalidad de que al hacer uso del generador del laboratorio este nos entregue un voltaje constante con una corriente que no sobrecarga la soportada por esta máquina.

Por otro lado, en la etapa correspondiente a la potencia se realizó un sistema de excitación de tipo estático auto-excitado cuya fuente de energía es el generador principal del laboratorio donde se realiza la problemática.

1.4.2. Transformador fijo

Los transformadores se encargan de regular la tensión eléctrica durante la distribución, ya que la tensión requerida para el funcionamiento de los aparatos eléctricos industriales y residenciales es distinta al nivel de tensión del suministro. Por lo que, la función de un transformador es importante para poder abastecer de un nivel de tensión determinado para cada sector.

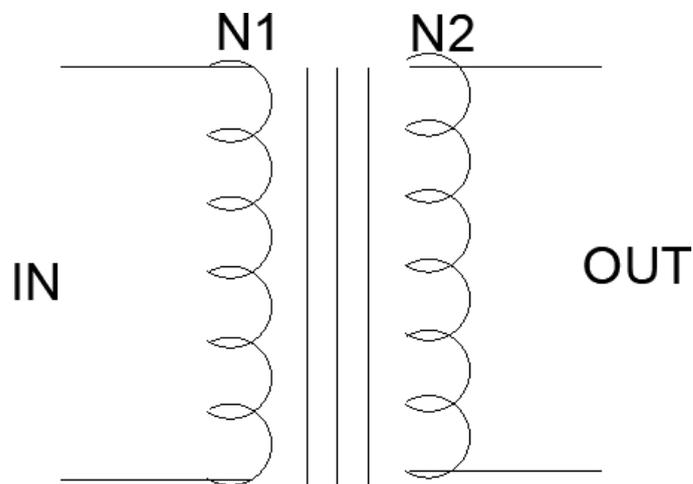


Figura 1.1. Transformador de tipo seco

Un transformador eléctrico es dispositivo que permite aumentar o reducir la tensión dentro de un circuito eléctrico de corriente alterna, es importante mencionar que, durante ese aumento o reducción de tensión, el transformador mantiene la potencia de la corriente eléctrica invariable que, por ley de Ohm tenemos que, si aumentamos el voltaje, la intensidad de corriente debe disminuir para poder tener una potencia constante.

A diferencia de los transformadores húmedos que utilizan aceite en su interior, este tipo de transformadores se encuentran encapsulados al vacío, es decir que los transformadores secos son a prueba de humedad, y utilizan en aire del ambiente para enfriarse. Además, resisten temperaturas menores a los 25° C bajo cero.

1.4.3. Transformador variable (Variac) para regulación

Un Variac es un equipo eléctrico capaz de modificar y ajustar el voltaje de una línea eléctrica de acuerdo con los requerimientos del usuario. La fabricación de un transformador variable está basada en un diseño tipo autotransformador una maquina eléctrica en el que parte del devanado se utiliza tanto como devanado primario y devanado secundario. A diferencia de un transformador convencional, que tiene devanados primarios y secundarios separados, en un autotransformador, solo hay un devanado comúnmente llamado "devanado común". El devanado común tiene al menos tres conexiones: una para la entrada de energía, otra para la salida de energía y una tercera conexión intermedia. Por otro lado, para el caso de un transformador variable se fabrica con un sistema de ajuste mecánico con escobillas de grafito que durante su desplazamiento suman o restan espiras para variar el voltaje de salida. La relación de transformación de voltaje en un autotransformador se determina por la relación entre el número de vueltas de alambre en las secciones primaria y secundaria del devanado común. Debido a esta configuración, los autotransformadores son más eficientes y livianos que los transformadores convencionales, ya que solo necesitan una sola bobina para funcionar. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los autotransformadores no proporcionan aislamiento galvánico entre el lado primario y el lado secundario, lo que implica ciertas limitaciones y precauciones en su uso.

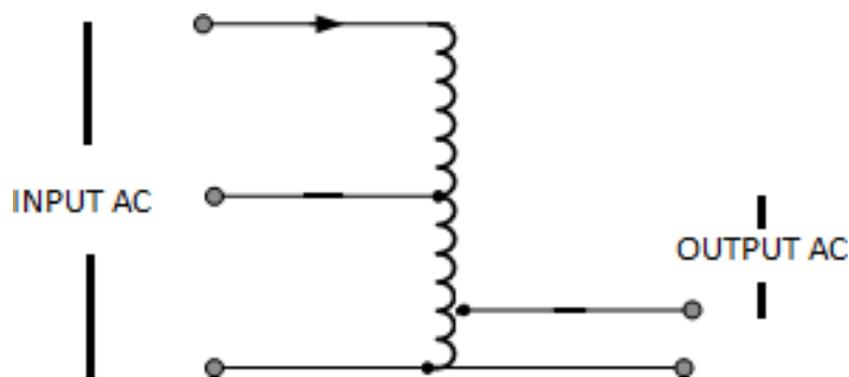


Figura 1.2. Transformador de rango variable (variatic).

1.4.4. Aislamiento galvánico

El aislamiento galvánico es un método que se utiliza para separar dos circuitos o partes de un sistema eléctrico que tienen potenciales eléctricos diferentes, con el fin de prevenir la transferencia no deseada de corriente. Esto se logra utilizando materiales dieléctricos o aislantes que no conducen la electricidad. El aislamiento

galvánico se aplica en una variedad de situaciones, como en transformadores, aisladores eléctricos, convertidores de energía, dispositivos médicos, sistemas de comunicación y control, entre otros. Al evitar el flujo de corriente entre componentes, el aislamiento galvánico ayuda a proteger los equipos y a garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema eléctrico. Es importante destacar que el aislamiento galvánico no solo previene la transferencia de corriente, sino que también protege contra posibles sobretensiones y aislamiento de ruido eléctrico, contribuyendo así a la integridad y confiabilidad de los sistemas eléctricos.

1.4.5. Control ON/OFF

El control ON-OFF, también conocido como control todo-nada o control de encendido y apagado, es un método de control utilizado en sistemas de automatización y regulación para mantener una variable de proceso específica, como la temperatura, presión, nivel de líquido, flujo, o cualquier otra, dentro de un rango deseado o en torno a un punto de referencia predeterminado. Este enfoque de control se caracteriza por su simplicidad y eficacia en situaciones donde se necesita mantener una variable de proceso dentro de ciertos límites.

La principal característica del control ON-OFF es que opera en dos estados discretos y opuestos: completamente encendido (ON) o completamente apagado (OFF). Cuando la variable de proceso se desvía por encima del valor de referencia establecido, que se conoce como punto de ajuste, el sistema de control activa el dispositivo de control para que funcione en su estado ON con el objetivo de corregir la desviación. Una vez que la variable de proceso regresa al rango deseado o se acerca lo suficiente al punto de ajuste, el sistema cambia el dispositivo de control al estado OFF, lo que detiene la corrección activa.

Este proceso de encendido y apagado se repite de forma cíclica en función de las desviaciones de la variable de proceso con respecto al punto de ajuste. Cuando la variable se desvía nuevamente, el sistema vuelve a encender el dispositivo de control, y así sucesivamente. La frecuencia con la que ocurren estos cambios depende de la magnitud de la desviación y de la configuración del sistema de control.

El control ON-OFF es particularmente adecuado para situaciones donde se pueden tolerar oscilaciones o variaciones significativas alrededor del punto de ajuste, y donde la simplicidad y la eficiencia son más importantes que la precisión extrema. Sin embargo, en sistemas donde se requiere un control más preciso y la minimización de oscilaciones, se utilizan enfoques más avanzados, como el control proporcional, integral y derivativo (PID) u otros métodos de control continuo que ajustan gradualmente la acción de control en lugar de simplemente encender o apagar el dispositivo de control.

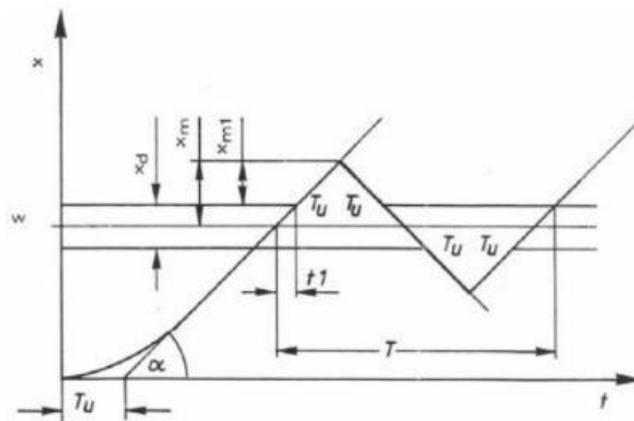


Figura 1.3. Gráfica con controlador ON/OFF con histéresis

Con el controlador ON/OFF no es posible obtener un valor exacto a la salida, es por eso por lo que muchas veces se trabaja acompañado de un rango de histéresis que permite la actuación de la salida.

Para configurar el controlador, son importantes ajustar los parámetros de amplitud y periodo de tiempo de oscilación.

1.4.6. Motor Síncrono

Se les llama motores síncronos, dado que el rotor y el campo magnético del estator giran con igual velocidad. Como función principal, se encarga de convertir la energía eléctrica en energía mecánica y la velocidad de rotación del eje dependerá de la frecuencia de la red eléctrica que se le suministre.

Cabe mencionar que este tipo de motores también pueden funcionar como generador, llamado generador síncrono. Sin embargo, su principal utilidad es en máquinas grandes que tienen una carga variable. Además, son de gran ayuda cuando se requiere mantener una velocidad constante.

La velocidad con la que gira el rotor se puede relacionar mediante la siguiente expresión matemática, teniendo en cuenta la frecuencia y el número de polos.

Donde:

n : Velocidad de la maquina

P : Número de pares de polo que tiene la maquina

p : Número de polos que tiene la maquina

f : Frecuencia de la red eléctrica a la que se conecta la máquina

$$n = \frac{60 * f}{P} = \frac{120 * f}{p}$$

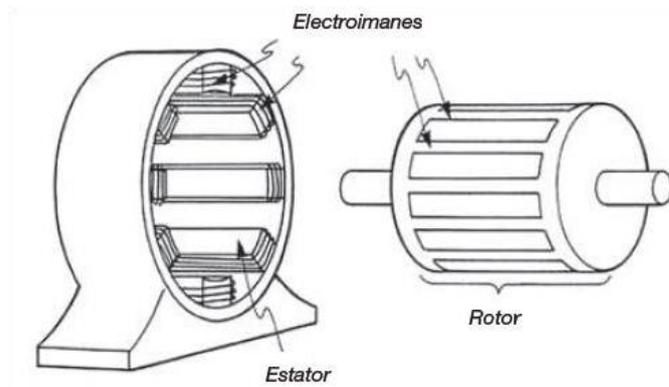


Figura 1.4. funcionamiento de motor síncrono

Los motores síncronos, tienen su rotor que está formado por imanes permanentes o por rotor bobinado y alimentado con corriente continua mediante anillos rozantes. ("Motores Síncronos. - Formación para la Industria 4.0") El estator, es similar al de un motor asíncrono.

Principio de Funcionamiento

Los motones síncronos, no pueden arrancar por si solos, ya que no tiene par de arranque, por lo que se lleva la maquina a la velocidad de sincronismo y se alimentan el devanado del rotor con corriente continua y el devanado del estator con corriente alterna. "La interacción entre los campos creados por ambas corrientes mantiene el giro del rotor a la velocidad de sincronismo." ("Máquina síncrona - la enciclopedia libre")

1.4.7. Rectificador AC/DC

El funcionamiento de los convertidores AC/DC se fundamenta en el encendido y apagado de dispositivos rectificadores, lo que permite obtener energía de corriente continua (DC) a partir de una fuente de corriente alterna (AC). Los rectificadores suelen ser diodos o tiristores. Cuando se utilizan diodos como rectificadores, proporcionan un voltaje constante en los terminales del convertidor.

Los rectificadores se clasifican en función de diversas características, que incluyen:

- Número de fases de la red eléctrica.
- Número de pulsos generados por el convertidor.
- Conexión de los elementos del convertidor, ya sea diodos o tiristores.
- Uso de elementos no controlados, elementos totalmente controlados o una combinación de ambos.
- Utilización del diodo de conmutación.

Los convertidores trifásicos se utilizan en aplicaciones de alta potencia. Hay varias razones por las cuales se prefiere una configuración trifásica:

- Carga simétrica proveniente de la fuente de alimentación trifásica.
- Bajo contenido armónico en la corriente de línea.
- El rizado de voltaje de corriente continua (DC) en la salida del convertidor presenta componentes armónicos de mayor frecuencia, pero de menor amplitud.

Para las señales de medición del voltaje controlado se requiere de un valor constante en la operación sustractiva con el valor de referencia, por lo tanto, se ha seleccionado la rectificación de onda completa no controlada.

1.4.7.1 Rectificador trifásico de onda completa no controlado

El rectificador trifásico no controlado, es ampliamente utilizado en aplicaciones de alta potencia. Este tipo de convertidor es un rectificador de onda completa que genera componentes ondulatorios de seis pulsos en el voltaje de salida. Cada uno

de los diodos conduce durante 120 grados y están numerados en orden secuencial de conducción. El orden de conducción es 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 y 6-1. Cuando el transformador tiene una configuración D-Y tanto en su lado primario como secundario, el voltaje de línea a línea en el lado primario es igual al voltaje de línea a línea en el lado secundario dividido por la relación de transformación.

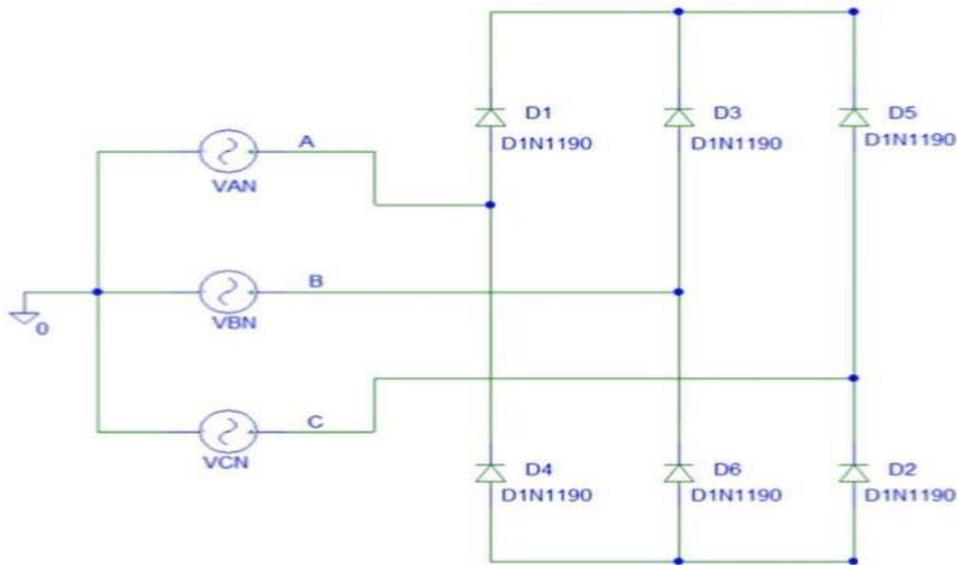


Figura 1.5. Diagrama rectificador onda completa trifásico.

El voltaje de salida se representa por la siguiente ecuación:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi/6} V_{max} \cos \omega d(\omega t)$$

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} V_{max} = 0.955 V_{max}$$

(1.4.)

1.4.8. Sensor final de carrera

Los sensores finales de carrera también son conocidos como sensor de contacto, es un tipo de switch que se coloca en lugares específicos sobre la línea de movimiento de un elemento móvil para saber la posición de dicho objeto.

1.4.8.1 Final de carrera Normalmente abierto (NO) y Normalmente cerrados (NC)

- Cuando se conecta al contacto que se encuentra normalmente abierto, indica que en su estado inicial los contactos se encuentran abiertos y cuando se activa el sensor se activa y procede a cerrarse.
- Por otro lado, cuando se trata del contacto normalmente cerrado, inicialmente el contacto se encuentra cerrado, y cuando se activa el final de carrera procede a abrirse.

1.4.8.2 Tipos de accionamiento de un final de carrera

Existen distintos tipos de sensores final de carrera, sin embargo, es necesario elegir el más adecuado según su función y lugar donde se va a ubicar. A continuación, se presentan varias opciones de finales de carrera según su accionamiento.

- Accionamiento por palanca
- Accionamiento por rodillo
- Accionamiento por varilla
- Accionamiento con pulsador
- Accionamiento con resorte
- Accionamiento por 2 o más palancas con rodillo
- Accionamiento ajustable
- Accionamiento combinado

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La industria presenta diversos problemas internos y uno de ellos es el ocasionado por la fluctuación de voltaje, este supone unos de los más graves inconvenientes ya que ocasiona pérdidas económicas y productividad. Por lo tanto, en busca de la solución se postulan los siguientes métodos para la regulación de voltaje: cambio manual de la posición del TAP que poseen los transformadores, construir una subestación propia para la industria, regulaciones desde el suministro eléctrico correspondiente a la empresa eléctrica, ajustar la jornada de producción a los horarios de menos fluctuación eléctrica, instalar reguladores de voltaje automáticos en media tensión y, instalar reguladores de voltaje automático en baja tensión.

La gran mayoría de soluciones enlistadas están acompañadas de problemas en su aplicación, tales como: permisos correspondientes a empresas externas, pérdida o disminución de la producción, costos no monetarios (costos de tiempo, costos de búsqueda y costo físicos) y pérdidas económicas (por tiempo muerto, fallos en los equipos más sensibles, contratistas eléctricos, etc.)

Sin embargo, la última propuesta resulta ser la más adecuada al no presentar los aspectos adversos mencionados en los casos anteriores, ya que su fabricación e implementación requiere de menos recursos no monetarios y no necesita permisos adicionales, esto significa un apoyo considerable en cualquier industria y para lograr este objetivo se diseñó un sistema de regulación automática de voltaje en baja tensión.

2.1 Diseño conceptual de la etapa de potencia

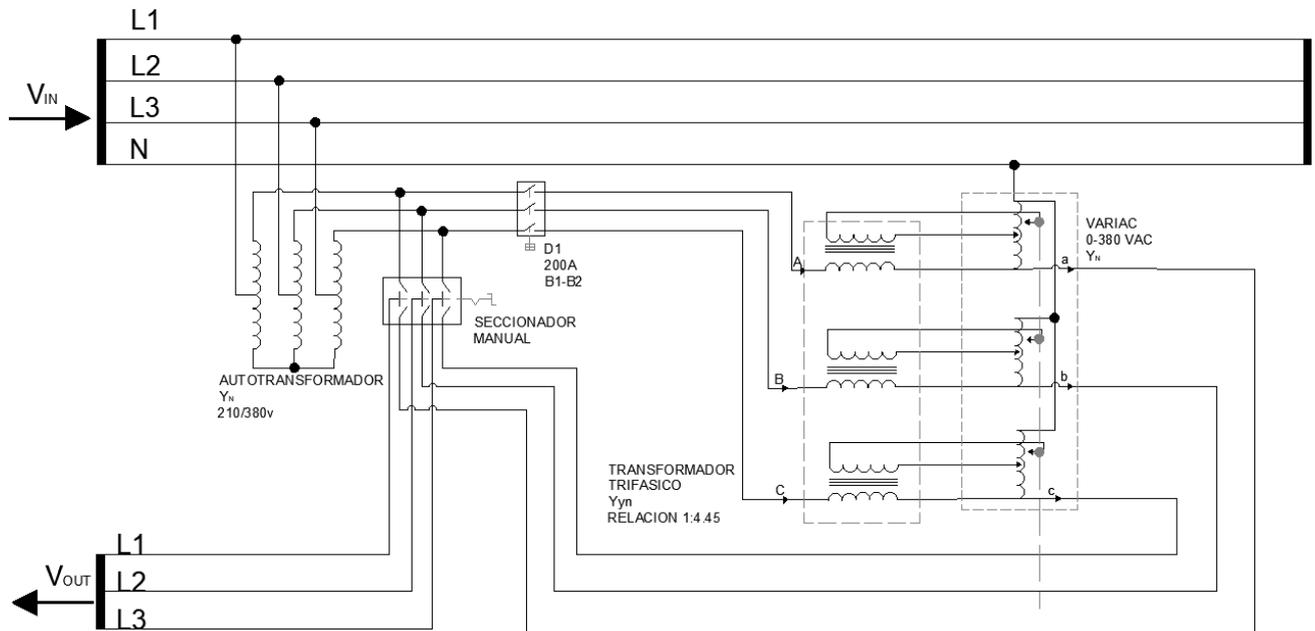


Figura 2.1. Diagrama unifilar eléctrico potencia.

La parte de potencia del regulador de voltaje automático está constituida por las siguientes etapas: amplificación y regulación. Para la regulación se tiene los elementos transformador y variac que se complementan para el control del potencial. La amplificación realiza el incremento del voltaje de entrada proveniente del suministro eléctrico de la industria, esto se realiza en caso de que el nivel de tensión de la red eléctrica sea diferente al requerido para el funcionamiento adecuado de las maquinas.

2.1.1. Autotransformador trifásico con relación fija

El regulador de voltaje automático en baja tensión se diseñó para el caso de una demanda trifásica de hasta 100kVA a 380V, donde el transformador principal de la industria suministra un nivel de tensión de 210V (línea – línea) en sus devanados secundarios, sin embargo, existen máquinas que requieren de alimentación a 380V (línea – línea), por lo que se requiere una elevación del voltaje. Cuya relación está dada por la siguiente ecuación:

Donde:

S : Potencia aparente nominal kVA

N_1 : Número de vueltas bobina primaria

N_2 : Número de vueltas bobina secundaria

V_1 : Voltaje en la bobina primaria

V_2 : Voltaje en la bobina secundaria

m : Razón de transformación

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = m$$

$$V_1 = 210 \text{ V}; V_2 = 380 \text{ V}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{210}{380} = \frac{I_2}{I_1} = 0.5526$$

También, en base a la potencia aparente en kVA se calcula la corriente del embobinado primario y secundario.

$$S = 100 \text{ kVA}$$

$$V_1 = 210 \text{ V}; V_2 = 380 \text{ V}$$

$$I_1 = 274.93 \text{ A}; I_2 = 151.93 \text{ A}$$

Parámetro	Valor
Numero de fases	3
Potencial nominal	100kVA
Frecuencia	60Hz
Calentamiento	65°C
Norma de fabricación	NTE-INEN
Tensión primaria	220V
Corriente primario	262.43A
Corriente secundario	151.93A
Grupo de conexión	Yn
Tensión secundaria	380V
Mat. Dev.	Al / Al

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del autotransformador elevador del regulado de voltaje.

2.1.2. Modo de conexión estable o directa

Para ampliar la funcionalidad del AVR se colocó un seccionador de tres posiciones, el cual permite seleccionar el tipo de voltaje de salida: directa y estable. El modo de salida directa proviene del voltaje de entrada amplificado por el autotransformador hacia las maquinas. Por otro lado, el modo de salida estable se deriva del proceso controlado. La posición intermedia desconecta la salida de todos los suministros de energía eléctrica antes mencionados.

2.1.3. Desconexión automática de la estabilización

Cuando el AVR funciona de manera directa, el circuito de potencia que realiza la estabilización debe ser desconectado, para no forzar la regulación del sistema si no está en uso.

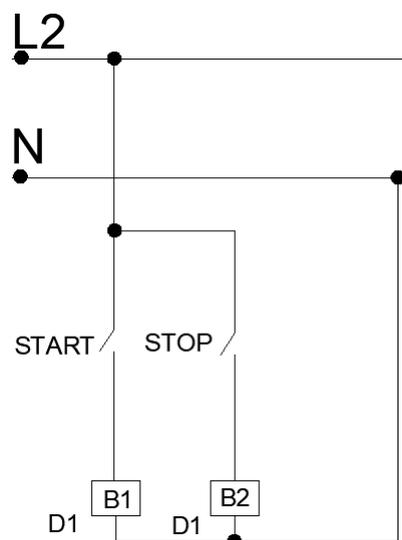


Figura 2.2. Diagrama de accionamiento de dos bobinas de disparo del disyuntor principal.

2.1.4. Transformador trifásico relación fija para regulación

En la bobina primaria se refleja un nivel de potencial variable respecto a la posición de las escobillas en el variac. La inducción electromagnética al aplicar una fuerza electromotriz en el devanado primario produce la inducción de un flujo magnético variable en el núcleo de hierro, como resultado aparece una fuerza electromotriz en el devanado secundario, este voltaje dado la configuración en la que se encuentran el transformador con el variac resulta ser sustractivo o aditivo respecto a la tensión de entrada. La relación de transformación viene expresada por la siguiente ecuación:

Donde:

N_1 : Número de vueltas bobina primaria

N_2 : Número de vueltas bobina secundaria

V_1 : Voltaje en la bobina primaria

V_2 : Voltaje en la bobina secundaria

I_2 : Corriente en la bobina secundaria

I_1 : Corriente en la bobina primaria

m : Razón de transformación

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = m$$

$$V_1 = 380 \text{ V}; V_2 = 85 \text{ V}$$

$$I_2 = 152 \text{ A}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = 4.45$$

2.1.4.1. Capacidad del transformador

La potencia aparente (S) del transformador trifásico se la determina por la siguiente ecuación:

Donde:

S : Potencia aparente nominal kVA

V_2 : Voltaje en la bobina secundaria

I_2 : Corriente en la bobina secundaria

$$S = \sqrt{3} * V_2 * I_2$$

$$S = \sqrt{3} * 85 * 152 \text{ A}$$

$$S = 22.3781 \text{ kVA}$$

Parámetro	Valor	
Numero de fases	3	
Potencial nominal	23kVA	
Frecuencia	60Hz	
Calentamiento	65°C	
Norma de fabricación	NTE-INEN	
Tensión primaria	380V	
Corriente primario	34A	
Corriente secundario	152A	
Tensión secundaria	85V	
Mat. Dev.	Al / Al	

Tabla 2.2. Características del transformador trifásico para regulación

2.1.5. Autotransformador trifásico relación variable (VARIAC)

Para realizar la regulación de voltaje se requiere sumar o restar un porcentaje variable del voltaje de salida de tal manera que se mantenga un nivel de tensión estable de 380V, por ello es necesario cumplir con las siguientes condiciones:

- El voltaje de alimentación línea a línea debe corresponder al voltaje de salida regulada.

V_{INAB} : Voltaje de entrada de Línea A a Línea B

V_{INBC} : Voltaje de entrada de Línea B a Línea C

V_{INCA} : Voltaje de entrada de Línea C a Línea A

$$V_{INAB} = 380V$$

$$V_{INBC} = 380V$$

$$V_{INCA} = 380V$$

- El voltaje entre las escobillas de los extremos del variac deben entregar un voltaje regulable mínimo de 0V – 380V.

V_{OUTAB} : Voltaje de salida de Linea A a Linea B

V_{OUTBC} : Voltaje de salida de Linea B a Linea C

V_{OUTCA} : Voltaje de salida de Linea C a Linea A

$$V_{OUTAB} = (0 - 380)V$$

$$V_{OUTBC} = (0 - 380)V$$

$$V_{OUTCA} = (0 - 380)V$$

2.1.5.1 Capacidad del autotransformador (VARIAC)

La potencia aparente en kVA debe compensar la potencia total del regulador cuando el voltaje de entrada se encuentra en su valor máximo o mínimo. El límite de regulación viene dado por la siguiente ecuación:

Donde:

V_{OUT} : Voltaje de salida a la carga

V_{IN} : Voltaje de entrada del suministro electrico

$\%_{TRANSFORMADOR}$: Valor porcentual del voltaje secundario respecto del voltaje primario

$\%_{SALIDA VARIAC}$: Valor porcentual del voltaje entre las escobillas del VARIAC

$$V_{OUT} = V_{IN} \pm (V_{OUT} * \%_{TRANSFORMADOR} * \%_{SALIDA VARIAC})$$

Los valores V_{out} y $\%_{transformador}$ vienen fijadas junto a la capacidad del regulador de voltaje automático:

$$V_{OUT} = 380V ; \%_{TRANSFORMADOR} = \frac{1}{4.45} * 100\% = 22.4719\%$$

Con estos valores se puede encontrar los niveles de voltaje máximo y mínimo, ya que estos corresponden al $\pm 100\%$ del variac respectivamente:

$$380 = V_{IN} \pm (380 * 0.224719 * 1)$$

$$\begin{cases} V_{IN} = 380 - (380 * 0.224719 * 1) = 294.6068V \\ V_{IN} = 380 + (380 * 0.224719 * 1) = 465.3932V \end{cases}$$

Para calcular la capacitada se parte del caso cuando el voltaje de entrada es exactamente igual al esperado en la regulación, la diferencia de potencial entre las escobillas es cero y el variac no actúa en la compensación, por lo tanto, la corriente viaja de la fuente de suministro directamente a la carga:

$$I_{IN} = I_{CARGA}$$

$$I_{IN} = I_{CARGA} = \frac{100000}{380 * \sqrt{3}} = 151.9343A$$

Con este dato se calcula la corriente máxima del variador, el cual sucede cuando la diferencia de potencial entre las escobillas es el -100%.

$$I_{IN} = \frac{100000}{294.6068 * \sqrt{3}} = 195.9732A$$

$$I_{VARIAC} = I_{CARGA} - I_{IN}$$

$$I_{VARIAC} = 151.9343 - 195.9732 = -44.0389A$$

La potencia aparente viene dada por la siguiente expresión:

$$S_{VARIAC} = \sqrt{3} * V_{VARIAC} * I_{VARIAC}$$

$$S_{VARIAC} = \sqrt{3} * 294.6068 * 44.0389$$

$$S_{VARIAC} = 22.4719kVA$$

2.1.6. Etapa de potencia regulador de voltaje automático

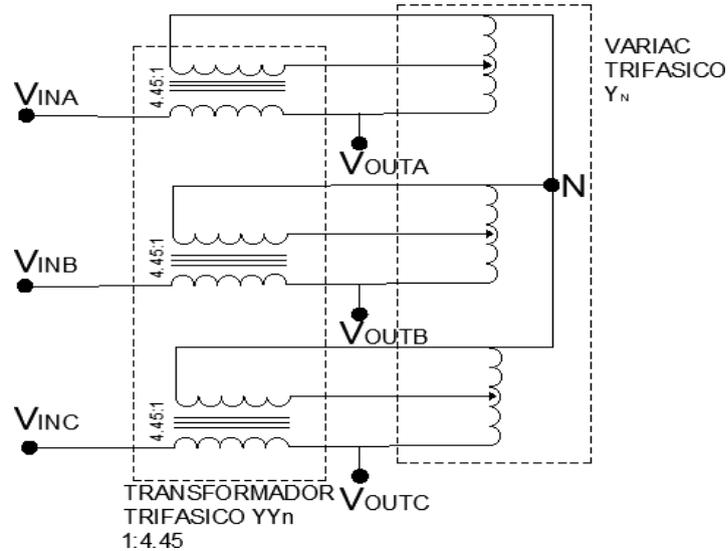


Figura 2.3. Etapa de regulación.

El diseño clave para la regulación se basa en dos elementos: Transformador y Variac. La configuración del transformador en el lado primario es Yn al compartir el mismo neutro con el variac, por otro lado, en la bobina del secundario se induce una diferencial de potencial que influye directamente sobre el voltaje de entrada, usando propiedades sustractivas y aditivas entre fuentes eléctricas.

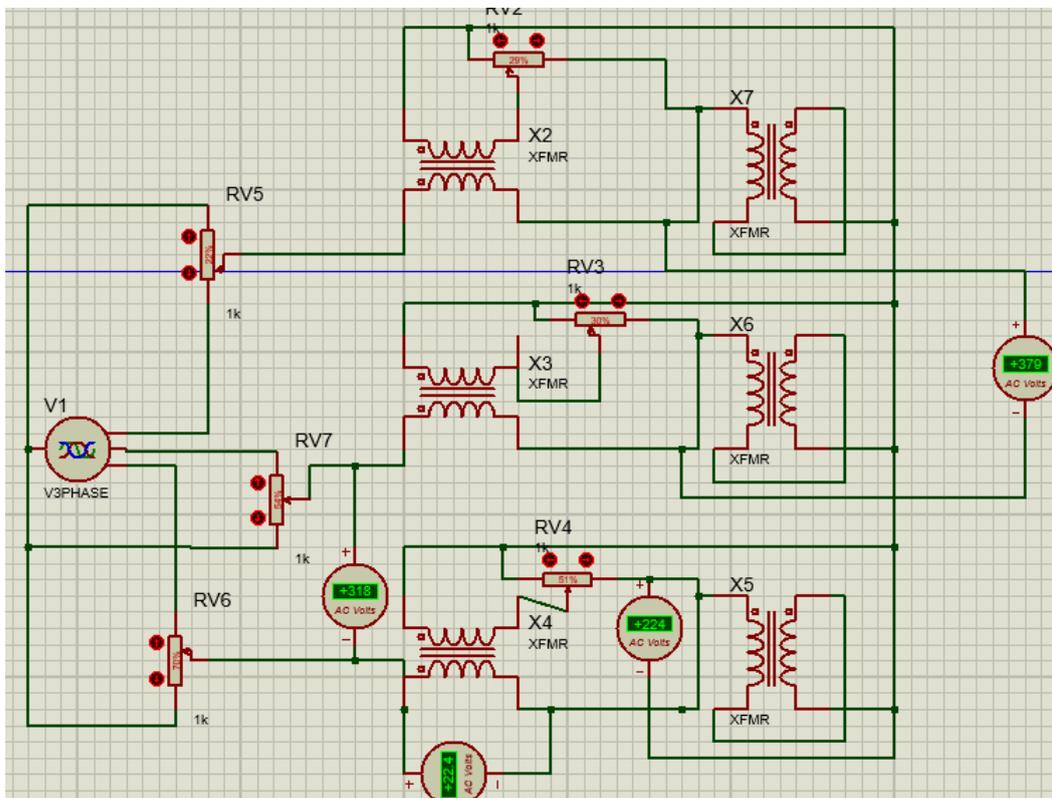


Figura 2.4. Etapa de potencia simulada regulación.

Entonces partiendo de la ecuación del voltaje de salida.

Donde:

V_{OUT} : Voltaje de salida a la carga

V_{IN} : Voltaje de entrada del suministro eléctrico

$\%_{TRANSFORMADOR}$: Valor porcentual del voltaje secundario respecto del voltaje primario

$\%_{SALIDA VARIAC}$: Valor porcentual del voltaje entre las escobillas del VARIAC

$$V_{OUT} = V_{IN} \pm (V_{OUT} * \%_{TRANSFORMADOR} * \%_{SALIDA VARIAC})$$

Y considerando las características internas del regulador de voltaje automático.

$$V_{OUT} = 380V ; \%_{TRANSFORMADOR} = \frac{1}{4.45} * 100\% = 22.4719\%$$

El $\%$ transformador nos indica el rango de operación, el cual se encuentra entre.

$$\begin{cases} V_{IN} = 380 - (380 * 0.224719 * 1) = 294.6068V \\ V_{IN} = 380 + (380 * 0.224719 * 1) = 465.3932V \end{cases}$$

Para el caso cuando el voltaje de entrada es 465V aproximadamente, y usando la ecuación del voltaje de salida podemos obtener el porcentaje del voltaje entregado por el variac.

$$\begin{aligned} 380 &= 465 - (380 * 0.224719 * \%_{SALIDA VARIAC}) \\ \%_{SALIDA VARIAC} &= \frac{380 - 465}{-380 * 0.224719} * 100 = 99.53\% \end{aligned}$$

Al usar el voltaje máximo tenemos que necesitar el 99.53% del voltaje de salida para mantener el voltaje estable en 380V.

$$\begin{aligned} V_{OUT} &= 465 - (380 * 0.224719 * 0.9953) \\ V_{OUT} &= 465 - (85) = 380V \end{aligned}$$

Ahora bien, en la configuración del transformador con el variac los niveles de voltaje intermedios son:

Voltaje primario del transformador.

$$V_{primario} = 380 * 0.9953 = 378.214V$$

Voltaje secundario del transformador corresponde a la diferencia entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida (línea a línea).

$$V_{secundario} = V_{IN} - V_{OUT}$$

$$V_{secundario} = 465 - 380 = 85V$$

O también resulta de la razón de transformación.

$$V_{secundario} = \frac{V_{Primario}}{4.45}$$

$$V_{secundario} = \frac{378.214}{4.45} = 85V$$

2.2 Diseño conceptual de la etapa de control

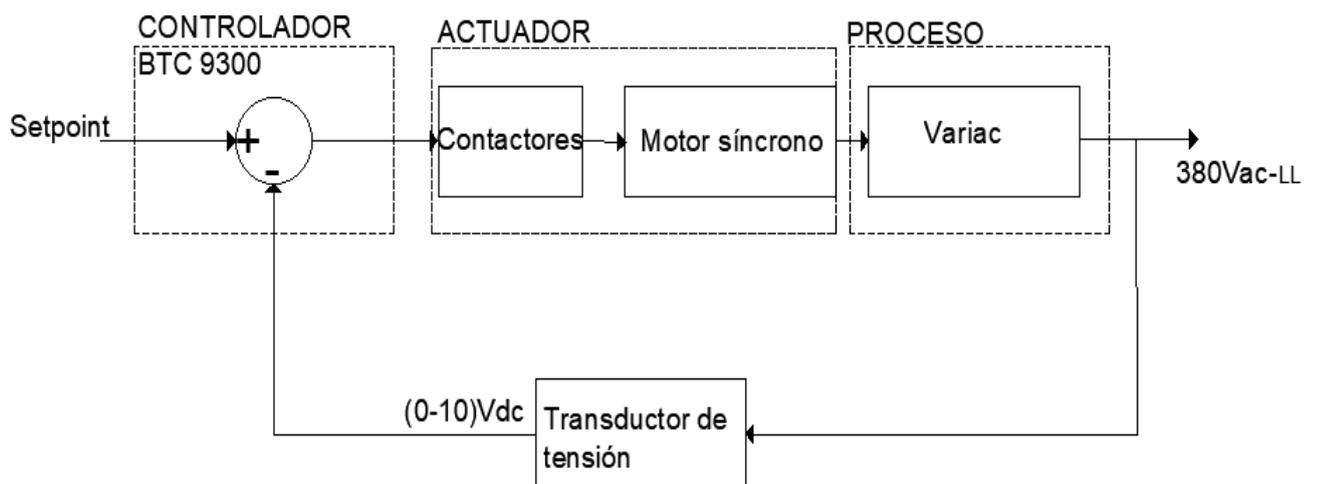


Figura 2.5. Diagrama de bloques de la etapa de control

2.2.1. Transductor de tensión

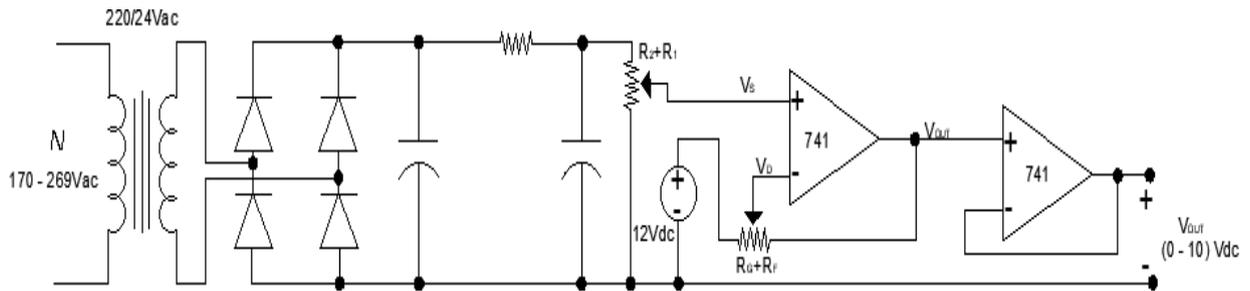


Figura 2.6. Circuito transductor de tensión

Para realimentar el sistema de lazo cerrado del control se tiene que enviar una señal proveniente de la salida de voltaje, pero en una escala menor ya que dicho valor lo toma el controlador en su entrada para el procesamiento y la acción del controlador. Por ello el potencial que debe llegar debe estar entre los valores de (0 – 10) Vdc, esto requiere del acondicionamiento de la señal de salida, es decir, del voltaje de salida que se encuentra dentro de un vecindario alrededor de 380Vac, se debe transformar a una salida continua entre el rango de 0 – 10 Vdc. Entonces la aplicación requerida se basa en el diseño electrónico del transductor de tensión en base a amplificadores operacionales tal como se muestra en el siguiente diagrama:

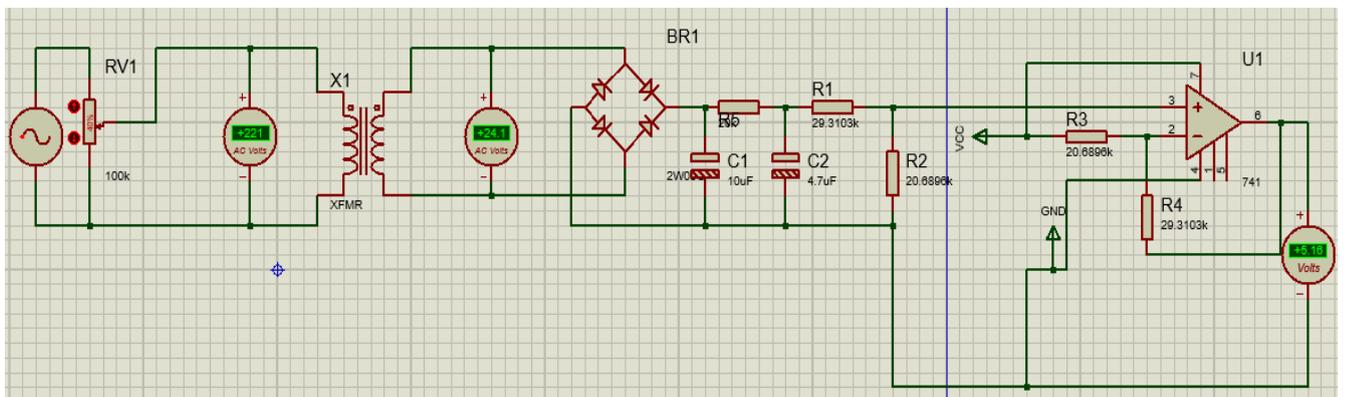


Figura 2.7. Circuito simulado transductor de tensión

2.2.1.1. Elemento aislador

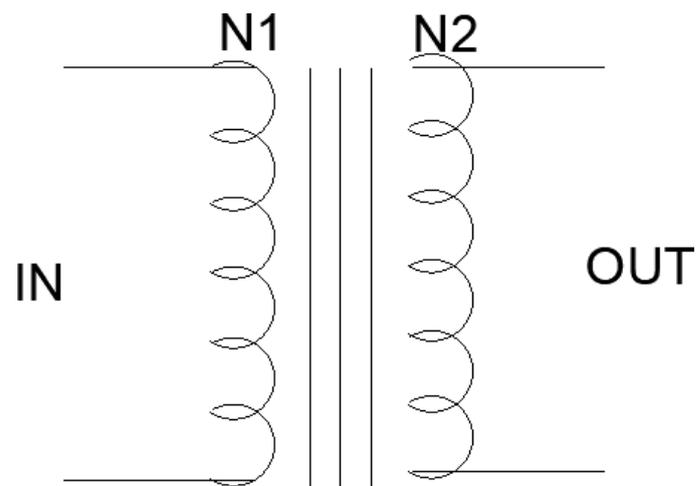


Figura 2.8. Diagrama de un transformador

El transformador tiene una relación de 220Vac / 24Vac, cuyas funciones principales son: aislar el circuito de potencia con el de control y entregar un voltaje menor respecto al de entrada para su acondicionamiento.

Cuya relación viene expresada por la siguiente ecuación:

Donde:

N_1 : Número de vueltas bobina primaria

N_2 : Número de vueltas bobina secundaria

V_1 : Voltaje en la bobina primaria

V_2 : Voltaje en la bobina secundaria

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = m$$

$$V_1 = 220 \text{ V}; V_2 = 24 \text{ V}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = 9.1667$$

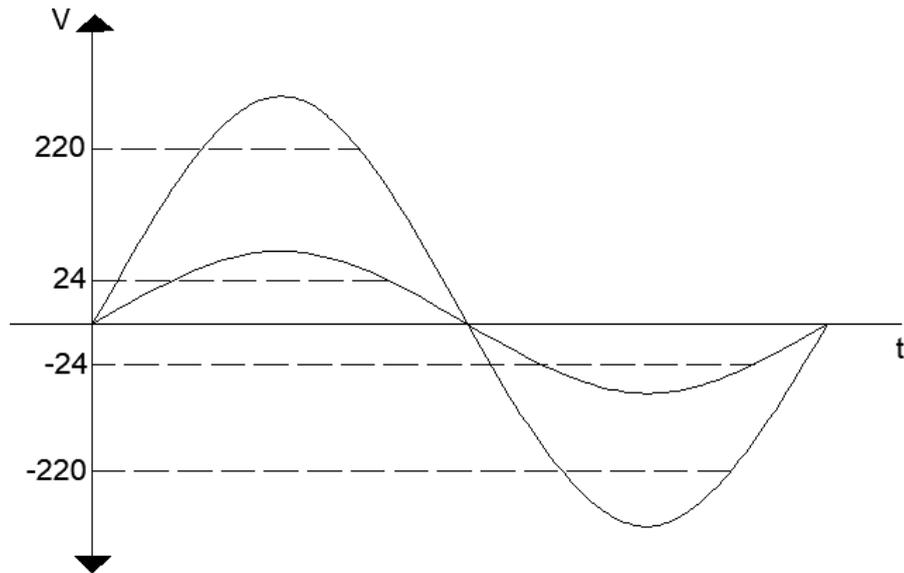


Figura 2.9. Gráfica de la relación de transformación

En esa etapa se toma tanto los valores de entrada de voltaje variable proveniente de la salida del regulador y los voltajes de la salida del transformador, para experimentalmente calcular la relación real entre las tensiones máxima, mínima y el punto de operación.

Entonces se tiene:

Donde:

V_{LL} : Voltajes de entrada línea – línea

V_{LN-P} : Voltajes de entrada línea – neutro, primario

V_S : Voltajes de salida, secundario

R_r : Relación real del transformador

$$\begin{array}{rcccl}
 295 & / \sqrt{3} & 170.3183 & \%RT & 21.6927 \\
 V_{LL} \{ \begin{array}{l} 380 \\ 465 \end{array} \} & \rightarrow \rightarrow & V_{LN-P} \{ \begin{array}{l} 219.3931 \\ 268.4679 \end{array} \} & \rightarrow \rightarrow & V_S \{ \begin{array}{l} 27.9432 \\ 34.1936 \end{array} \}
 \end{array}$$

$$V_{LN-P} = 219.3931 \text{ V}; \quad V_S = 27.9432 \text{ V}$$

$$R_r = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = 7.8514$$

2.2.1.2. Rectificador monofásico no controlado de onda completa

Como siguiente fase se tiene la rectificación de la señal de salida transformada, para ello se usa un puente de diodos para aprovechar toda la onda sinusoidal durante su periodo $1/60$ seg y seguido un capacitor que filtrara la señal de voltaje dando como resultado una tensión más suavizada llamada también ‘tensión de rizado’.

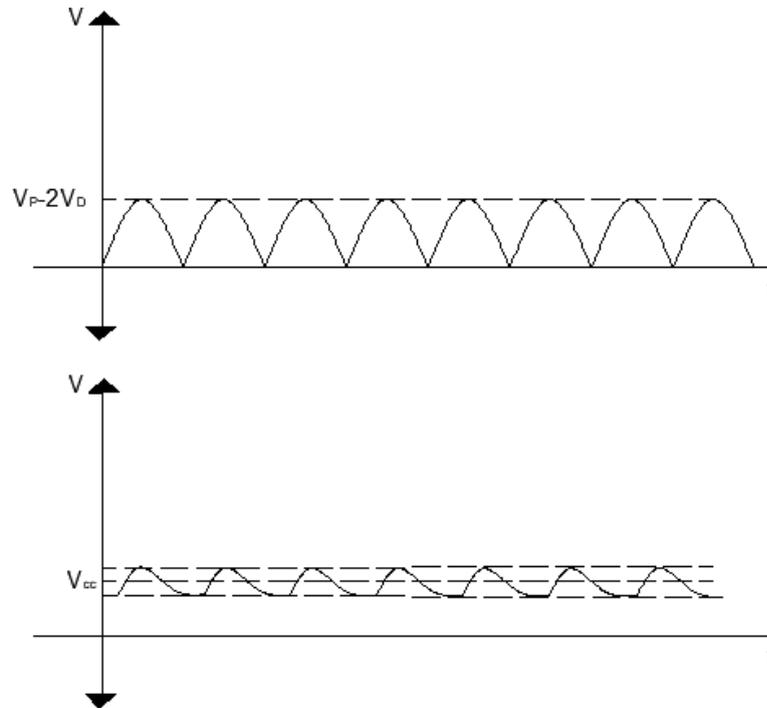


Figura 2.10. Gráfica de voltaje rectificado y filtrado

Los valores experimentales tomados para cada voltaje máximo, mínimo y punto de operación. Corresponde a la media del voltaje pico a pico del rizado:

Donde:

V_{LL} : Voltajes de entrada línea – línea

V_{LN-P} : Voltajes de entrada línea – neutro, primario

V_S : Voltajes de salida, secundario

V_{CC} : Voltajes medio de rizado V_{CC}

$$\begin{array}{ccccccc}
 295 & / \sqrt{3} & 170. & \%RT & 21.6927 & V_{CC} & 31.5420 \\
 & & 3183 & & & & \\
 V_{LL} \{ 380 & \rightarrow & V_{LN-P} \{ 219.3931 & \rightarrow & V_S \{ 27.9432 & \rightarrow & \{ 25.7762 \\
 465 & & 268.4679 & & 34.1936 & & 20.0105
 \end{array}$$

2.2.1.3. Acondicionamiento restador no inversor

Con la señal rectificadora y filtrada el siguiente paso es adaptar el voltaje continuo a un rango establecido de 0 – 10 Vdc, para lograr este objetivo se utiliza el amplificador operacional con la configuración de restador no inversor la cual se ajusta a los requerimientos.

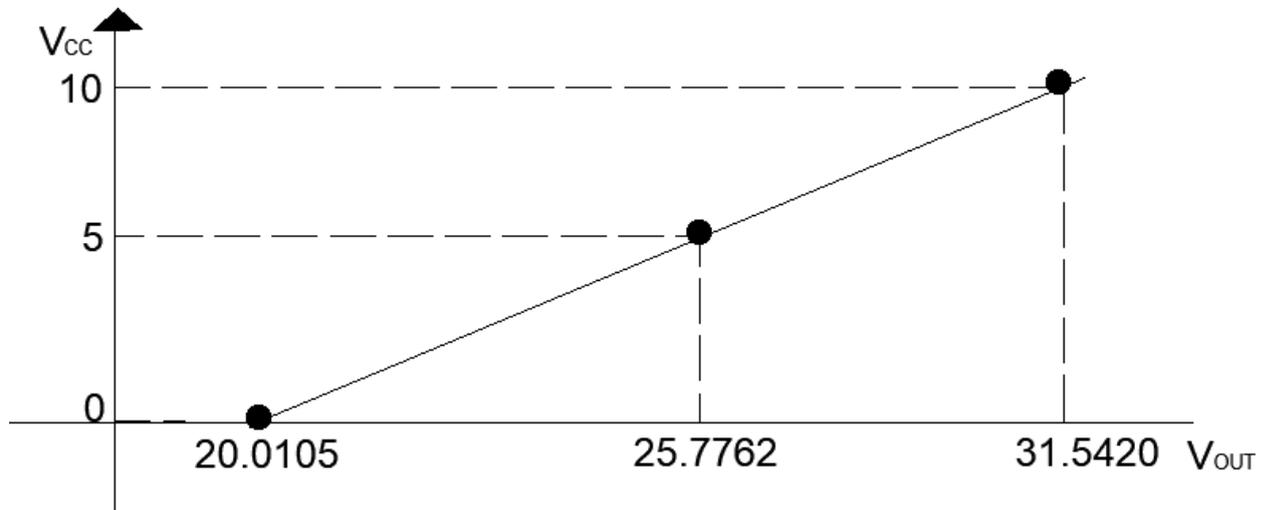


Figura 2.11. Linealidad entre los valores de entrada y salida

La ecuación que representa esta recta viene dada por:

Donde:

V_{LL} : Voltajes de entrada línea – línea

V_{LN-P} : Voltajes de entrada línea – neutro, primario

V_s : Voltajes de salida, secundario

V_{CC} : Voltajes medio de rizado V_{CC}

V_{LL} : Voltajes de entrada línea – línea

V_{LN-P} : Voltajes de entrada línea – neutro, primario

V_s : Voltajes de salida, secundario

V_{CC} : Voltajes medio de rizado V_{CC}

$$y_0 - y = m * (x - x_0)$$

El punto y_0 ; x_0 es el que cruza por cero en 'y' (0; 20.0105):

$$0 - y = m * (x - 20.0105)$$

La pendiente de la recta esta dado por los puntos (5; 25.7762) y (0; 20.0105):

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m = \frac{5 - 0}{25.7762 - 20.0105} = \frac{5}{5.7657} = 0.8672$$

Entonces la gráfica es representada por:

$$y = 0.8672 * (x - 20.0105)$$

$$y = 0.8672 * x - 17.3530$$

Ahora la ecuación del voltaje de salida que representa al restador no inversor es la siguiente:

Donde:

V_{LL} : Voltajes de entrada linea – linea

V_{LN-P} : Voltajes de entrada linea – neutro, primario

V_S : Voltajes de salida, secundario

V_{CC} : Voltajes medio de rizado V_{CC}

$$V_{OUT} = \frac{R1}{(R1 + R2)} * \frac{(RG + RF)}{RG} * V_S - \frac{RF}{RG} V_D$$

Las resistencias $(R1 + R2)$ y $(RG + RF)$ son potenciómetros del mismo valor 10kohm, por lo tanto, la ecuación se resume en:

$$V_{OUT} = \frac{R1}{RG} * V_S - \frac{RF}{RG} V_D$$

Ahora relacionando las ecuaciones:

$$m = \frac{R1}{RG} = 0.8672$$

$$m * x_0 = \frac{RF}{RG} V_D = 17.3527$$

$$V_{OUT} = 0.8672 * V_S - 17.3530$$

En base a esta última ecuación se calcula los valores de las resistencias R_G y R_1 . Conociendo que V_D corresponde a una fuente de 12 Vdc independiente, además partimos sabiendo que $R_F + R_G$ es igual a 10kohm:

$$R_G + R_F = 50kohm$$

$$\frac{R_F}{R_G} = \frac{17.3530}{12} = 1.4461$$

$$\frac{50 - R_G}{R_G} = \frac{17.3530}{12} = 1.4461$$

$$50 = 1.4461R_G + R_G$$

$$R_G = \frac{50}{2.4461} = 20.4407kohm$$

$$R_1 = 0.8672 * 20.4407 = 17.7262kohm$$

2.2.1.4. Amplificador de aislamiento

En la última fase se aplica un seguidor de voltaje, ya que la impedancia de entrada de un amplificador operacional es muy elevada se va a tener una corriente muy pequeña dado por la ley de ohm, por lo tanto, el propósito de esta configuración es aislar y proteger el controlador del voltaje enviado por el transductor de tensión.

El voltaje de salida viene expresado por la siguiente ecuación:

$$V_{out} = V_{in} * 1$$

2.2.2. Controlador BTC 9300

La parametrización para el control del regulador de voltaje automático se lo realiza en el controlador BTC 9300, mostrado en la figura 2.555. Este cuenta con la tecnología de Lógica Difusa que permite un proceso por el que se alcanza el punto de ajuste predeterminado en el menor tiempo posible, el mismo que tiene las características descritas en la siguiente tabla.

Característica	Descripción
Power Input	90 - 264 VAC, 50/60 HZ
Signal Input	Standard Input Input 1 - Universal Input Thermocouple: J, K, T, E, B, R, S, N, L RTD: PT100 DIN, PT100 JIS Current: 4 - 20mA, 0 - 20 mA. Voltage: 0 - 1V, 0 - 5V, 1 - 5V, 0 - 10V Input 2 - CT and Analog Input CT: 0 - 50 Amp. AC Current Transformer Analog Input: 4 - 20 mA, 0 - 20mA, 0 - 1V, 0 - 5V, 1 - 5V, 0 - 10V.
Output 1	Isolated 4 - 20mA / 0 - 20mA
Output 2 / Alarm 2	Form A Relay 2A/240VAC
Alarm 1	Form A Relay 2A / 240VAC
Communications	RS-485

Tabla 2.3. Características controlador BTC9300

La tabla mostrada nos indica que la alimentación del controlador está en un rango de 90 – 264VAC, esta característica es importante ya que la salida del regulador de voltaje proporcionara de energía al control, por ende, este también fluctuara antes de realizar la corrección automática. La entrada permite una amplia gama de sensores y transductores, lo que facilita el uso del transductor de tensión, además posee dos salidas tipo relay las cuales se encargan de accionar el actuador.

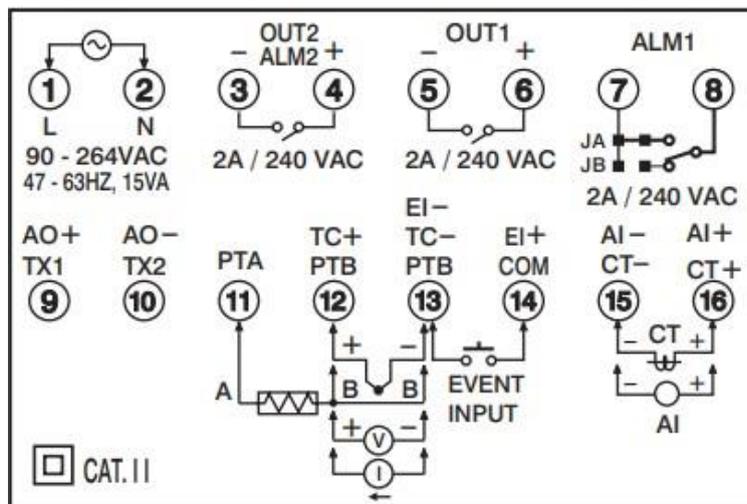


Figura 2.12. Configuración de terminales del controlador universal

La figura muestra el diagrama de conexiones externas enumerada cada entrada y salida del controlador.

2.2.2.1. Parametrización funciones

El ajuste de cada función se basa en el funcionamiento de controlador para que realice las acciones que corregirán el voltaje en la salida del sistema, entonces lo primero que se debe comprender es la navegación dentro del menú, tal como se muestra en la figura.

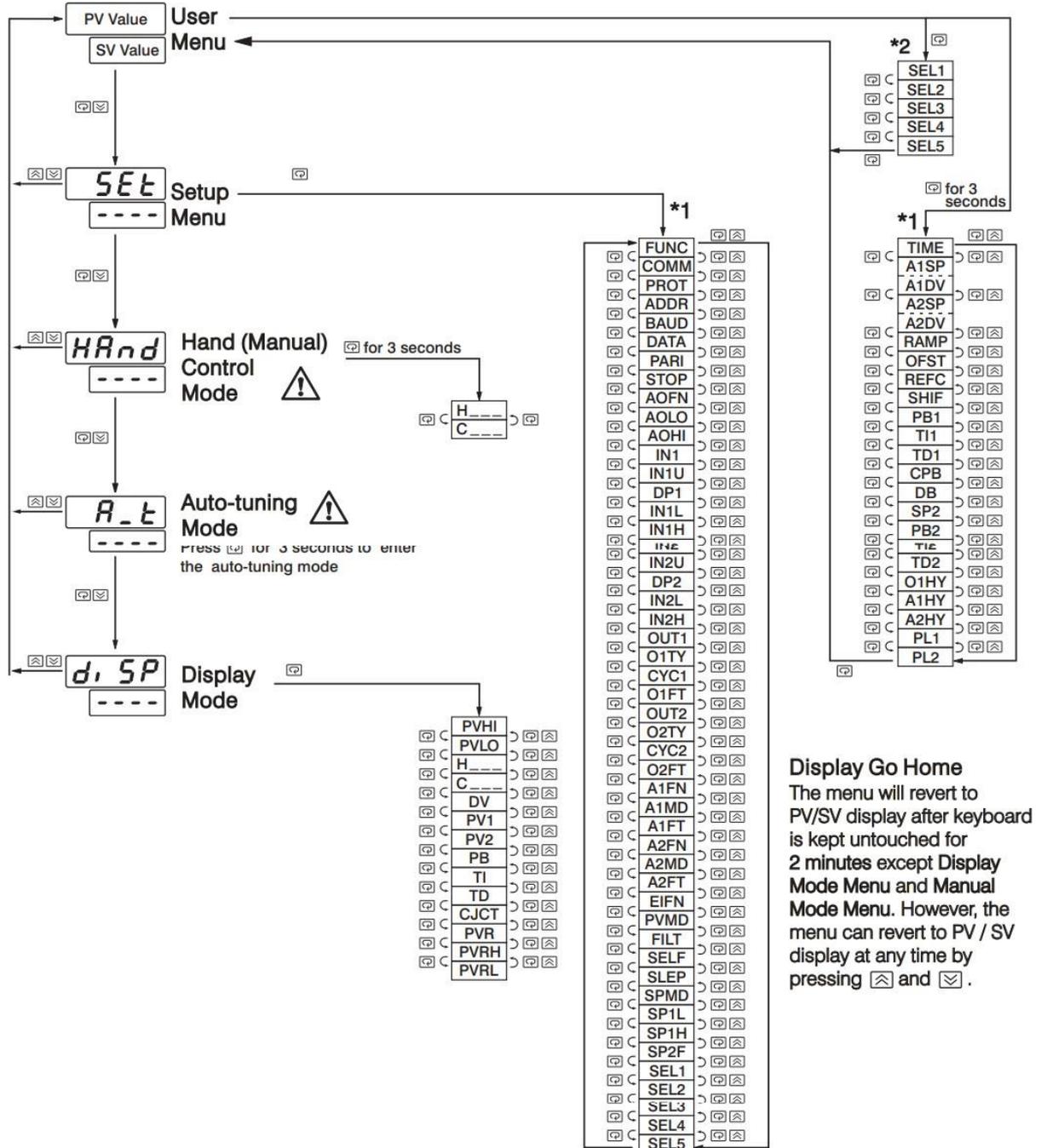


Figura 2.13. Parametrizaciones de funciones del controlador universal

La figura muestra la secuencia de programación en un conjunto de menús de los cuales se hace énfasis a los bloques de funciones menú de usuario y menú setup.

Dentro del menú de usuario se observa el valor del proceso y el valor referencial, este último se ajusta en esta sección, además se tiene una lista de parámetros para determinar el rango de operación. El siguiente paso en el menú setup se encuentran los parámetros que definen una función en específico para cada entrada y salida.

2.2.2.1. Parametrización funciones entrada, salidas y punto de operación

El transductor de tensión usado entrega una señal de voltaje de (0 – 10) Vdc, entonces dentro del menú setup configuramos el siguiente parámetro:

IN1 = 0 – 10

Tal como se muestra la figura a continuación.

✓	IN1	i n 1	IN1 Sensor Type Selection	7 <i>n-tC</i> : N type thermocouple 8 <i>L-tC</i> : L type thermocouple 9 <i>Pt.dn</i> : PT 100 ohms DIN curve 10 <i>Pt.J5</i> : PT 100 ohms JIS curve 11 <i>4-20</i> : 4 - 20 mA linear current input 12 <i>0-20</i> : 0 - 20 mA linear current input 13 <i>0-1V</i> : 0 - 1V linear Voltage input 14 <i>0-5V</i> : 0 - 5V linear Voltage input 15 <i>1-5V</i> : 1 - 5V linear Voltage input 16 <i>0-10</i> : 0 - 10V linear Voltage input 17 <i>SPEC</i> : Special defined sensor curve
---	-----	-------	---------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figura 2.14. Datos de parametrización de IN1

Una ventaja de este controlador es que trabaja hasta con 3 dígitos decimal, por lo que para la aplicación solo requerimos 2 dígitos decimal, además nos permite escalar la entrada en una unidad general del proceso. Para ello se configura el parámetro:

IN1U = PU

DP1 = 2-DP

Tal como se muestra en la figura:

✓	IN1U	<i>IN1U</i>	IN1 Unit Selection	0 0C : Degree C unit 1 0F : Degree F unit 2 P_U : Process unit
✓	DP1	<i>dP1</i>	IN1 Decimal Point Selection	0 no.dP : No decimal point 1 1-dP : 1 decimal digit 2 2-dP : 2 decimal digits 3 3-dP : 3 decimal digits

Figura 2.15. Datos de parametrización de IN1U y DP1

La señal de entrada llega de 0 – 10 VDC al controlador, pero esta se debe escalar dentro de un rango, el cual corresponde a los voltajes máximo y mínimo de regulación (295 y 465) VAC, sin embargo, el controlado utiliza una unidad de proceso, es decir, se tiene que ajustar estos parámetros IN1L y IN1H considerando lo siguiente:

$$\text{Punto de operación} = 380\text{VAC}$$

$$\text{Valor máximo de regulación} = 465\text{VAC}$$

$$\text{Valor mínimo de regulación} = 295\text{VAC}$$

$$\text{Diferencia} = 85\text{VAC}$$

La diferencia corresponde al valor entre el punto de operación con los valores límites de regulación, y este se lleva a la escala del controlador, dado que se trabaja con dos decimales, se toma cada unidad centésima del proceso como unidad de voltaje, por lo tanto:

$$UV = \text{Unidad de Voltaje}$$

$$UP = \text{Unidad de Proceso}$$

$$UCP = \text{Unidad Decimal del Proceso}$$

$$\text{Diferencia UV} = 85 \xrightarrow{UCP} \Rightarrow 0.85$$

Si se considera el punto de operación en la unidad de proceso, tenemos:

$$\text{Punto de operación UV} = 380 \xrightarrow{UP} \Rightarrow 38.00$$

Sumando la diferencia máxima y mínima en la unidad de proceso se tiene:

Punto de operación UP = 38.00

Diferencia UP = 0.85

Valor maximo de regulación UP = 38.85

Valos minimo de regulacion UP = 37.15

Ahora se tiene los valores que se tiene que ajustar en los siguientes parámetros:

IN1L = 37.15

IN1H = 38.85

Dentro de menú de usuario se ajusta el setpoint en:

SV = 38.00

✓	IN1L	<i>in lL</i>	IN1 Low Scale Value	Low: -19999	High: 45536
✓	IN1H	<i>in lH</i>	IN1 High Scale Value	Low: -19999	High: 45536

Figura 2.16. Datos de parametrización de IN1L y IN1H

Las salidas OUT2/ALM2 y ALM1 se configura de la siguiente manera. Para OUT2 se ajustan los siguientes parámetros:

OUT2 = =AL2

O2TY = RELY

✓	OUT2	<i>out2</i>	Output 2 Function	0 <i>none</i> : Output 2 no function 1 <i>COOL</i> : PID cooling control 2 <i>=AL2</i> : Perform alarm 2 function 3 <i>dCPS</i> : DC power supply module installed
✓	O2TY	<i>o2ty</i>	Output 2 Signal Type	Same as O1TY

Figura 2.17. Datos de parametrización de las salidas

✓	O1TY	<i>o 1ty</i>	Output 1 Signal Type	0 <i>rELy</i> : Relay output 1 <i>SSrd</i> : Solid state relay drive output 2 <i>SSr</i> : Solid state relay output 3 <i>4-20</i> : 4 - 20 mA current module
---	------	--------------	----------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figura 2.18. Datos de parametrización de O1TY

Estas salidas están activadas como relé, ahora se tienen que configurar para que realicen la función alrededor del punto de operación, entonces se debe ajustar los siguientes parámetros:

A1FN = DEHI

A2FN = DELO

A1MD = NORM

A2MD = NORM

✓	A1FN	<i>R 1Fn</i>	Alarm 1 Function	0 <i>nonE</i> : No alarm function 1 <i>t, nr</i> : Dwell timer action 2 <i>dEH,</i> : Deviation high alarm 3 <i>dELo</i> : Deviation low alarm 4 <i>dbH,</i> : Deviation band out of band alarm 5 <i>dbLo</i> : Deviation band in band alarm 6 <i>PY 1H</i> : IN1 process value high alarm 7 <i>PY 1L</i> : IN1 process value low alarm 8 <i>PY 2H</i> : IN2 process value high alarm 9 <i>PY 2L</i> : IN2 process value low alarm 10 <i>P 12H</i> : IN1 or IN2 process value high alarm 11 <i>P 12L</i> : IN1 or IN2 process value low alarm 12 <i>d 12H</i> : IN1 – IN2 difference process value high alarm 13 <i>d 12L</i> : IN1 – IN2 difference process value low alarm 14 <i>Lb</i> : Loop break alarm 15 <i>SEnb</i> : Sensor break or A-D fails
✓	A1MD	<i>R 1Md</i>	Alarm 1 Operation Mode	0 <i>norñ</i> : Normal alarm action 1 <i>Ltch</i> : Latching alarm action 2 <i>HoLd</i> : Hold alarm action 3 <i>LtHo</i> : Latching & Hold action

Figura 2.19. Datos de parametrización de A1FN y A1MD

Las funciones deviation high alarm y deviation low alarm son la parte importante del control, ya que estas nos permiten tomar acciones cuando el proceso (voltaje) de desvía demasiado del punto de referencia. Es aquí donde se puede ajustar la desviación sumativa y sustractiva (A1DV y A2DV), además también el valor de histéresis para evitar problemas de interferencia con el entorno ruidoso.

Los parámetros A1FT y A2FT determinan el estado lógico de la ejecución del actuador, dentro del rango de operación hasta los límites aditivo y sustractivo el valor está en OFF, sin embargo, superando estos puntos cambia a ON. Su ajuste es el siguiente:

A1FT = ON

A2FT = ON

✓	A1FT	<i>A1FT</i>	Alarm 1 Failure Transfer Mode	0 oFF : Alarm output OFF as unit fails 1 oN : Alarm output ON as unit fails
---	------	-------------	-------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------

Figura 2.20. Datos de parametrización de A1FT

Las variaciones de voltaje que para el controlador son interpretadas como desviaciones de tensión, deben de establecerse en un rango determinado y con estos valores ajustar los parámetros A1DV, A2DV, A1HY y A2HY. Entonces se procede de la siguiente manera:

El rango permitido es de un $\pm 5\%$ del voltaje nominal, por lo tanto, partiendo de ello se configura una desviación de $\pm 9\text{VAC}$ que corresponde al 2.5% del valor nominal. La función que utiliza el controlador es la siguiente:

NDH = Nivel de Disparo Alto

NDL = Nivel de Disparo Bajo

SP = SetPoint

$$NDL = SP + A1DV \pm \frac{1}{2} A1HY$$

$$NDH = SP + A2DV \pm \frac{1}{2} A2HY$$

Se asigna los valores para cada parámetro de tal manera que NDH y NDH correspondan a 371VAc y 389VAC respectivamente.

$$A1DV = -0.14$$

$$A2DV = 0.08$$

$$A1HY = 0.01$$

$$A2HY = 0.02$$

$$SV = 38.00$$

$$NDH = 38.00 + 0.08 \pm 0.1 = \begin{cases} 38.09 & \Rightarrow 389VAC \\ 38.07 & \Rightarrow 387VAC \end{cases}$$

$$NDL = 38.00 - 0.14 \pm 0.05 = \begin{cases} 37.91 & \Rightarrow 371VAC \\ 37.81 & \Rightarrow 369VAC \end{cases}$$

Entonces los siguientes parámetros se configuran con los valores previamente calculados:

$$A1DV = -0.14$$

$$A2DV = 0.07$$

$$A1HY = 0.01$$

$$A2HY = 0.02$$

✓	A1DV	A1DV	Alarm 1 Deviation Value	Low: -200.0	High: 200.0
✓	A2DV	A2DV	Alarm 2 Deviation Value	Low: -200.0	High: 200.0
✓	A1HY	A1HY	Hysteresis Control of Alarm 1	Low: 0.1	High: 10.0
✓	A2HY	A2HY	Hysteresis Control of Alarm 2	Low: 0.1	High: 10.0

Figura 2.21. Datos de parametrización

2.2.3. Diagrama de control general del regulador de voltaje automático

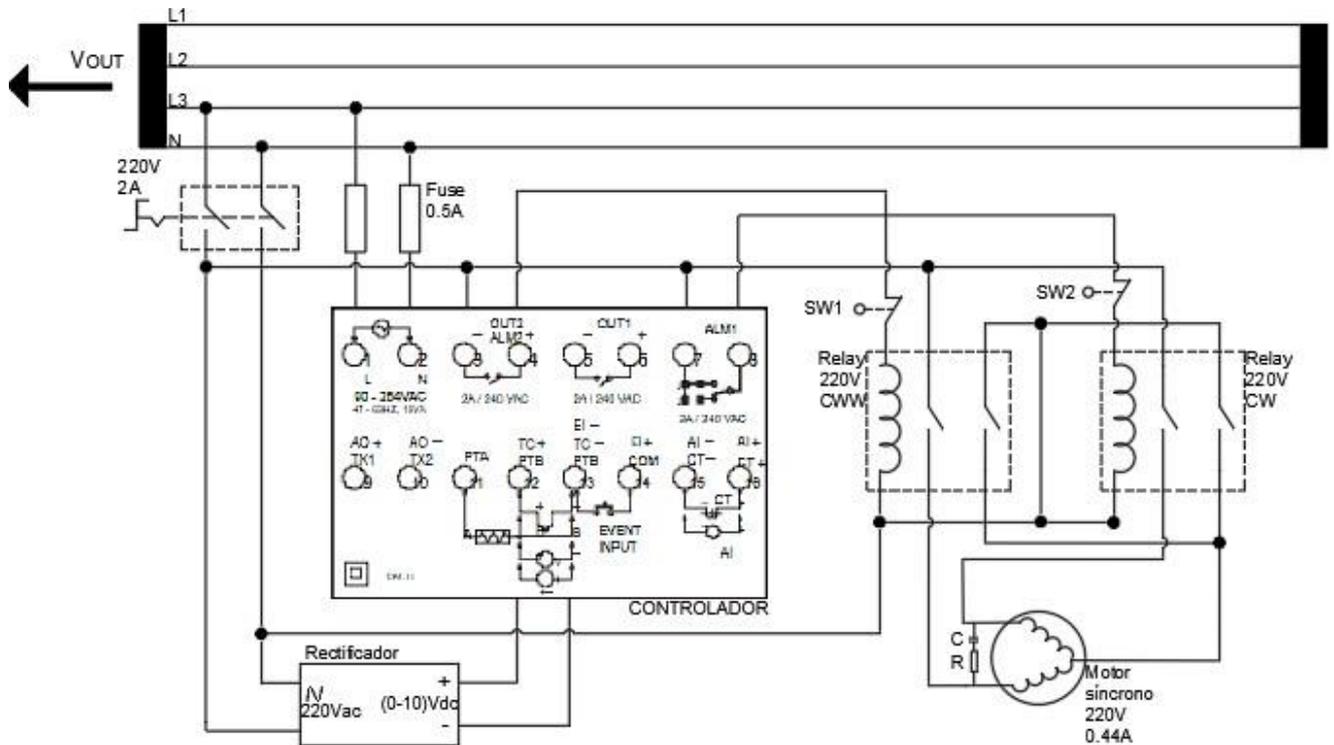


Figura 2.22. Diagrama general del regulador de voltaje automático

El diagrama de control del regulador de voltaje automático muestra el lazo cerrado, tomando al controlador como parte central de la automatización, ya que en este se ajusta el valor de referencia para el procesamiento con la variable medida de voltaje y finalmente actuar sobre el proceso de regulación, es decir, el transductor de tensión le envía una señal de voltaje al controlador comunicándole si existe una desviación superior del $\pm 2.5\%$, y en cualquiera de los casos accionar el motor sincrónico por medio de contactores para ajustar la relación del variac de forma sustractiva o aditiva respectivamente, el detalle del funcionamiento se describe en la figura.

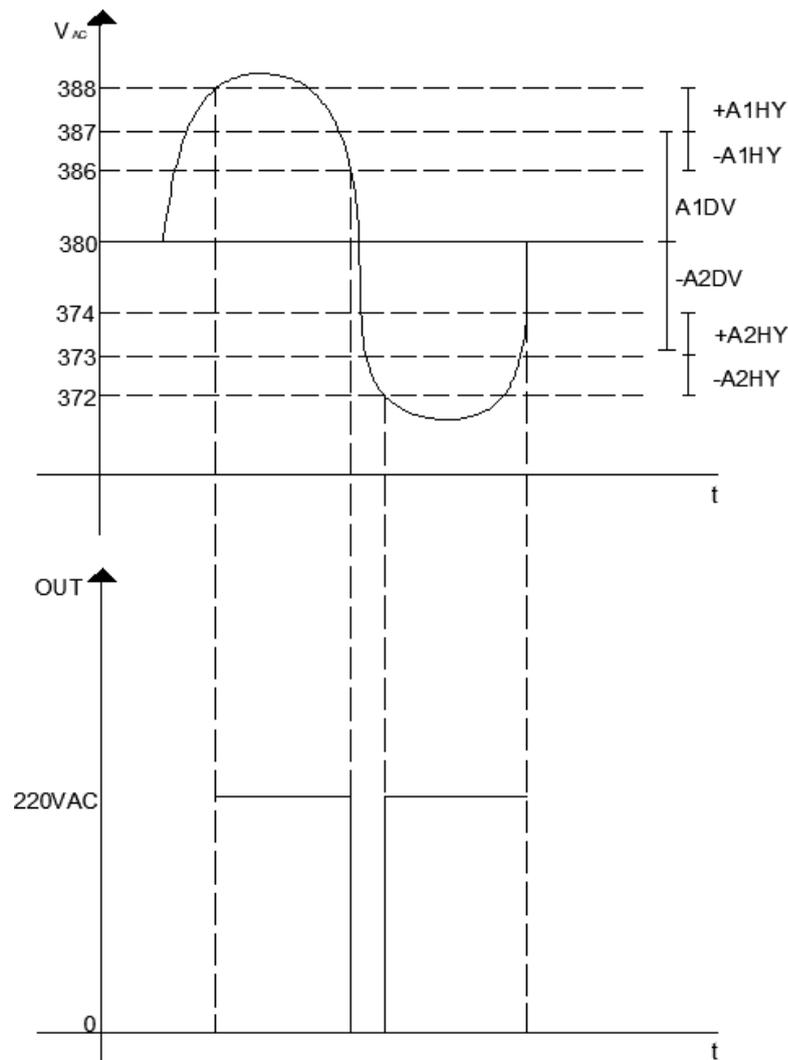


Figura 2.23. Rango de histéresis en los que se activa la salida

Se puede apreciar como el controlador interpreta la señal del transductor de tensión en determinados niveles de voltaje que previamente fueron calculados y parametrizados. Entonces cuando el voltaje de la carga supera el 2.5% del valor nominal ocurre una desviación positiva y se acciona el actuador enviándole 220VAC, este en sentido contrario a las manecillas del reloj incrementa progresivamente la tensión de menor amplitud y signo opuesto al voltaje de salida, hasta llegar al valor al rango de operación del valor referencial, para el caso del -3.0% el motor gira a favor de las manecillas del reloj incrementando el voltaje progresivamente con una amplitud menor y la misma fase al voltaje de salida.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez terminada la etapa de implementación, se procede a realizar pruebas para verificar el funcionamiento adecuado al análisis realizado en el capítulo anterior.

Para determinar el rendimiento del controlador, fue necesario comprobar cada elemento independientemente, comenzando con pruebas de voltaje al transductor de tensión. Posteriormente, se comprobó junto al controlador para diferentes niveles de tensión verificando la activación de salidas sin actuador, luego pruebas de velocidad de respuesta y estabilización con actuador, así como también las pruebas completas de la etapa de potencia junto a la de control en vacío.

3.1. Pruebas de operación y funcionamiento

3.1.1. Transductor de tensión

El requerimiento del acondicionamiento de la señal del transductor es necesario debido a que la etapa de control utiliza su valor para su operación. Los resultados de la prueba de voltaje se presentan en la Tabla 3.1.

Voltaje de entrada LN [VAC]	Voltaje salida [VDC]
170.32	0.85
219.39	4.98
268.46	9.97

Tabla 3.1. Respuesta de voltaje del transductor de tensión

En la Tabla 3.1. se observa el voltaje de salida escalado según su valor de entrada, que es el requerido por el controlador para el procesamiento con el valor referencial, de tal manera reconoce la desviación o fluctuación que se presenta el voltaje y se toma la acción sustractiva o aditiva en base al requerimiento que el proceso de pide del control.

3.1.2. Pruebas con el controlador y transductor de tensión

La respuesta dinámica típica del sistema de control es un criterio que se usa comúnmente para evaluar el rendimiento de los sistemas de control de excitación de lazo cerrado o realimentados. Los índices de rendimiento en la mayoría de los sistemas de control están dados por las características dinámicas de sus elementos cuya salida es la variable controlada en última instancia.

En la figura se muestra la respuesta dinámica del transductor de tensión a una señal tipo paso en la entrada, a voltaje y frecuencias nominales, operando en vacío. Las principales características de interés de la respuesta son los niveles de voltaje en DC para distintos niveles de voltaje en AC en base a la referencia.



Figura 3.1. Respuesta del transductor de tensión ante una subida de voltaje.

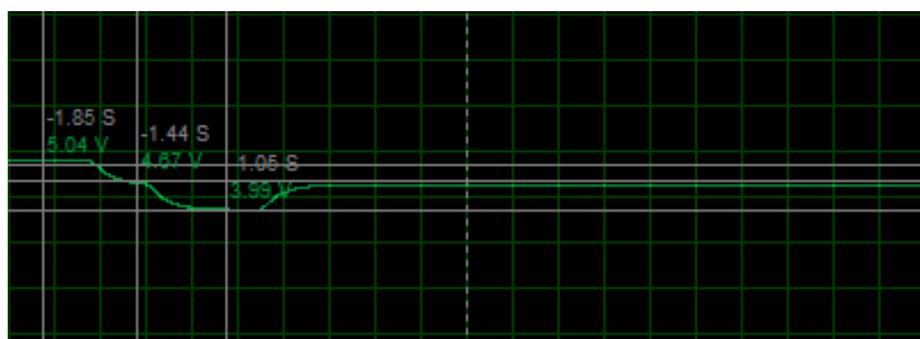


Figura 3.2. Respuesta del transductor de tensión ante una caída de voltaje

Para el caso de la respuesta dinámica del transductor hacia el controlador implementado, se tiene como resultado exactitud en los niveles de voltaje que son

apropiados a la hora de controlar un sistema de regulación automático, cuyas perturbaciones deben ser de corta duración e imperceptibles al sistema.

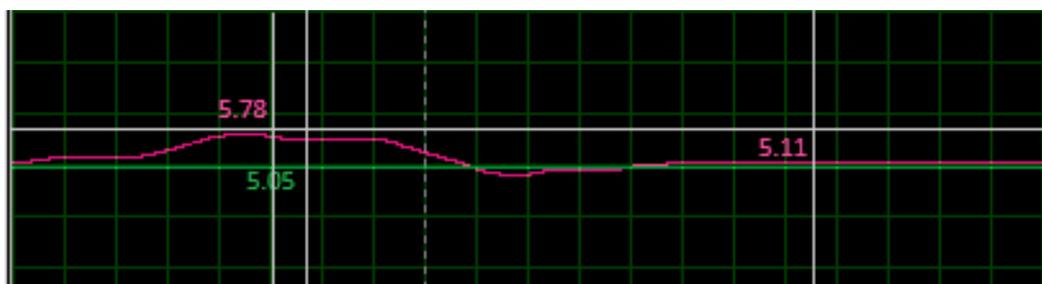


Figura 3.3. Prueba de respuesta del controlador.

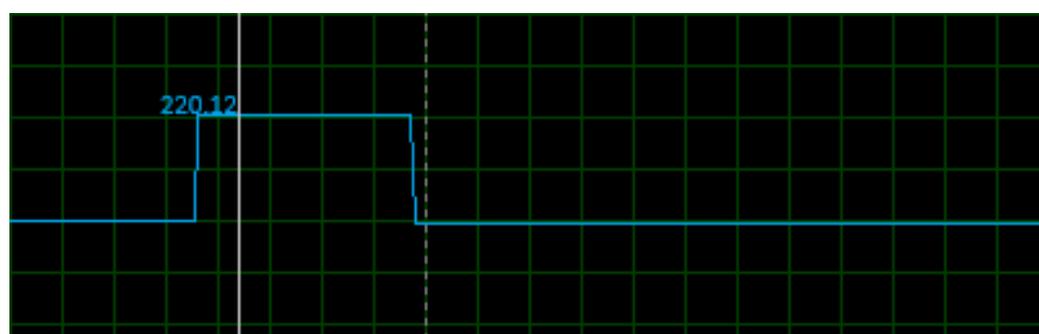


Figura 3.4. Grafica de la respuesta del controlador superado el umbral.

En esta prueba figura se verifica como el regulador de voltaje automático responde ante variaciones leves en la referencia. La referencia se implementa mediante la configuración del controlador mientras que las variaciones se realizan externamente y de forma manual desde un transformador seco regulable. Durante la prueba se lleva a cabo las fluctuaciones de voltaje en pequeños pasos de 1 V hasta llegar al voltaje umbral, y esta se realiza a frecuencia nominal y en vacío.

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema de control de regulación dentro de esta prueba se realiza dos ensayos, el primero para tomar medidas reales de voltaje en la salida regulada cuando el voltaje se incrementa levemente. Estos datos se tabulan y se muestran en la tabla. El segundo ensayo se realiza para obtener mediciones del voltaje de salida cuando la tensión decremента levemente. De esta manera se permite tener la representación tabular de la respuesta a los cambios de voltaje por pasos.

Incremento de voltaje por pasos [VAC]	Voltaje de salida [VAC]
---------------------------------------	-------------------------

380.12	380.18
381.45	381.49
382.65	382.68
383.23	383.27
384.48	384.52
385.75	385.80
386.89	386.91
387.56	387.59
388.41	378.45
389.43	379.40
390.40	380.43

Tabla 3.2. Valores experimentales obtenidos en el incremento de voltaje.

Decremento de voltaje por pasos [VAC]	Voltaje de salida [VAC]
379.85	380.18
378.74	378.65
377.45	377.55
376.59	376.89
375.12	375.32
374.23	374.85
373.98	373.89
374.48	374.65
373.41	373.59
372.45	372.15
371.35	371.78
370.78	380.54
369.98	379.65
368.68	378.78

Tabla 3.3. Valores experimentales obtenidos ante una caída de voltaje.

Al examinar la tabla se puede observar que la magnitud del voltaje terminal es igual a la variación del voltaje con una magnitud constante, sin embargo, al llegar al 2.5% el valor de salida cae rápidamente al rango de operación normalizado y se sigue

aumentado el voltaje de entrada, pero la tensión de salida ahora es diferente ya que no supera el límite establecido. Lo mismo sucede para la Tabla con el -3.2% del voltaje de entrada.

3.1.3 Pruebas de velocidad de respuesta y estabilización

En esta prueba se comprueba la respuesta del regulador de voltaje automático a varios pasos de voltaje por encima del umbral, cuando la tensión supera por encima o por debajo del 5% normalizado.

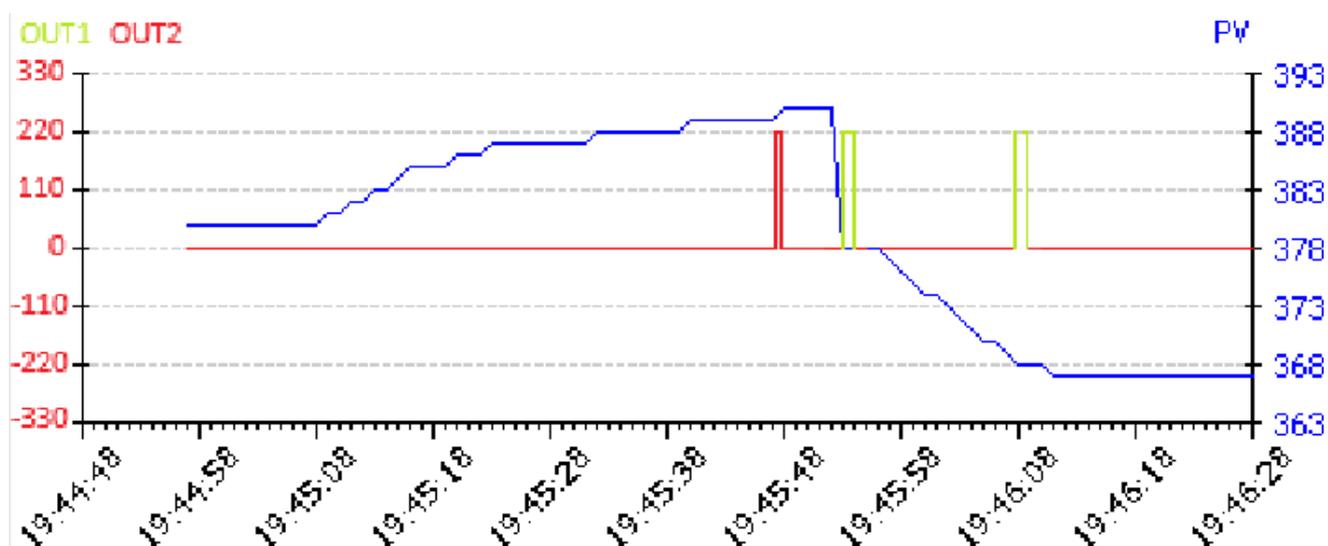


Figura 3.5. Grafica de las señales de salida 1, salida 2 y voltaje de entrada.

La prueba se plantea conectando la salida 1 color verde y la 2 color rojo del controlador a contactores, de tal manera que pueda accionarse el motor en sentido antihorario o horaria según sea el caso respectivamente. La prueba se realiza desde el punto de operación 380VAC y frecuencial nominal 60 Hz.

De la figura se puede resaltar el correcto funcionamiento del regulador de voltaje automático en respuesta a los pasos de voltaje, actuando en base lo esperado. Al ir incrementando el nivel de tensión llegando a superar por poco al umbral el controlador activa la salida 2 por menos de un segundo obteniendo en la salida el ajuste de voltaje al deseado, en este punto el voltaje en la entrada es superior a valor referencial por ende si se reduce el voltaje de entrada desde la fuente externa, también se verá reducida en la salida del regulador hasta el valor umbral inferior lo cual activa la salida 2 durante el segundo que le toma subir el voltaje al valor deseado.

3.1.3 Pruebas de operación del regulador de voltaje automático en baja tensión

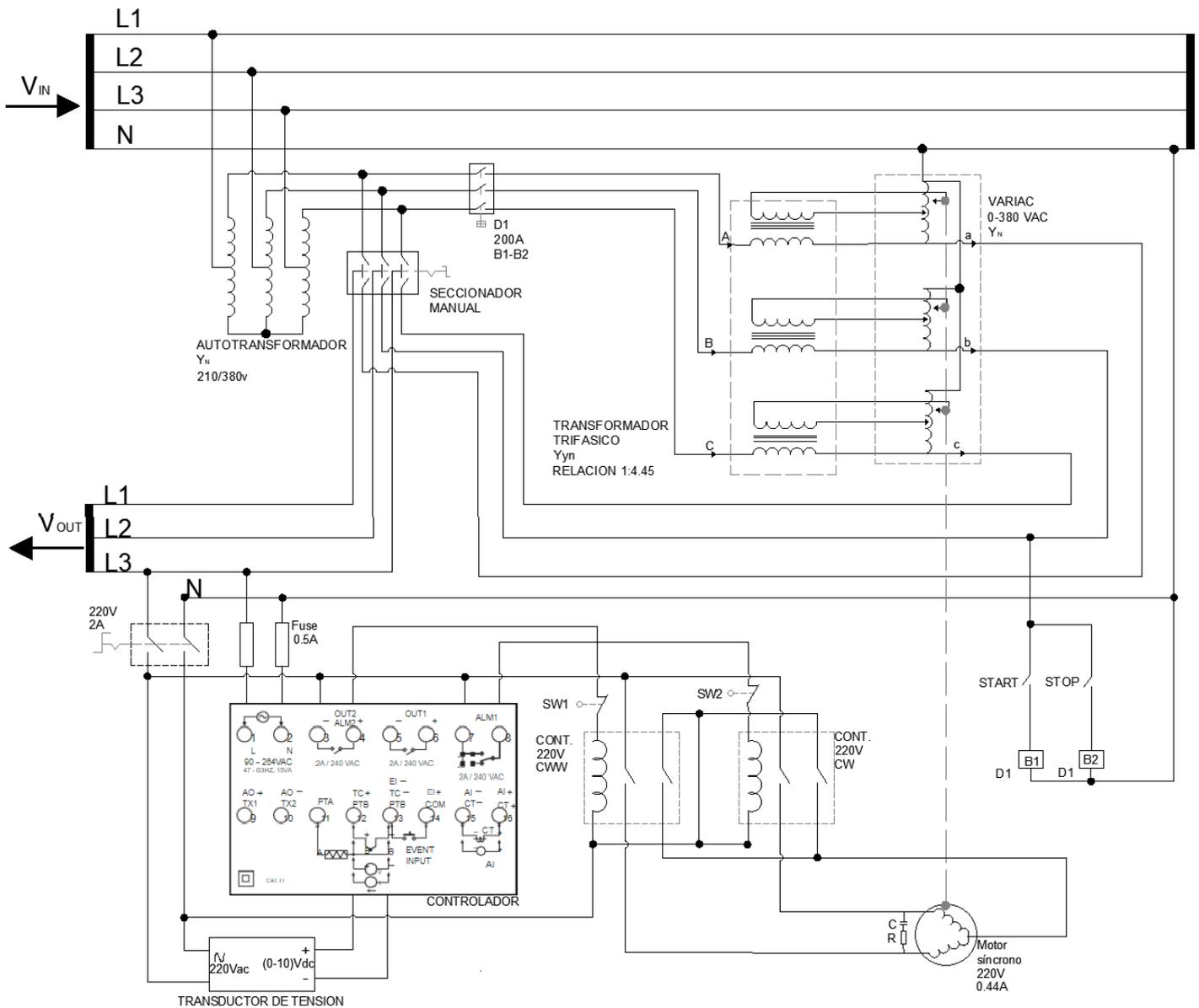


Figura 3.6. Diagrama completo de la etapa de control y potencia

Esta prueba tiene la finalidad de analizar el comportamiento del sistema de regulación cuando se le acopla al suministro eléctrico variable en el tiempo de un generador de pruebas. Para ello se conecta a un transformador seco que proporciona una salida de tensión regulada manualmente, mediante un analizador de energía, de tal manera que se miden, para distintos valores de voltaje en cada fase, corriente de cada fase, así como también potencias activas y reactivas del regulador. La prueba se realiza a una referencia de 380V y frecuencia 60Hz debido a las condiciones de red eléctrica.

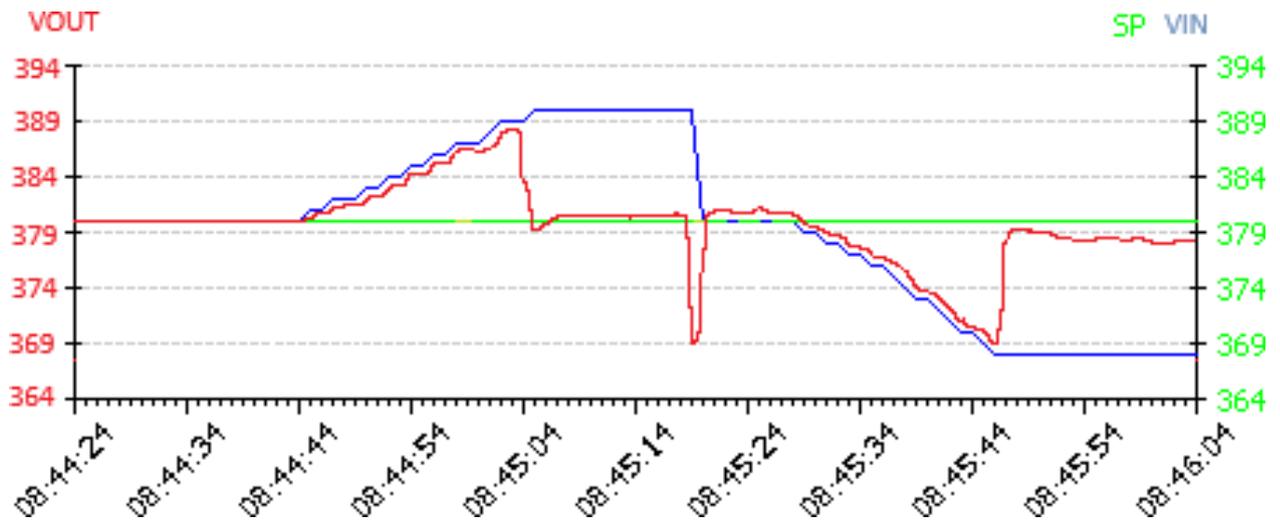


Figura 3.7. Grafica de las señales del voltaje de salida, voltaje de entrada y valor de referencia en base a datos experimentales.

De la figura se puede observar que el ajuste del voltaje en la salida depende de la variación en la entrada, conforme se aumenta el voltaje hasta llegar al umbral no hay respuesta del control, sin embargo, una vez superado, la tensión de salida cae durante un segundo y se estabiliza dentro del rango normalizado.

Después de la primera prueba se mantiene constante pero ahora el voltaje de entrada es mayor al de la salida tal como se espera, luego de un tiempo se reduce el voltaje hasta llegar al umbral inferior que coincide con el punto de operación, entonces la tensión de salida sube en un periodo de un segundo y se estabiliza cerca de la referencia. Posteriormente se sigue reduciendo el voltaje de entrada hasta llegar a superar el umbral y tener la misma respuesta del caso anterior.

Dentro del análisis de esta prueba, se tiene que el voltaje se regula según los cambios que se inyectan al suministro eléctrico determinando la cantidad de perdidas. Cabe indicar que las pruebas fueron realizadas con un suministro variable manual, por ende, las fluctuaciones de voltaje se realizan en perdidos cortos, sin embargo, los cambios de voltaje en el suministro eléctrico proveniente de las centrales eléctricas y subestaciones surgen dentro de un periodo de 24 horas a pasos de voltaje lentos.

3.2. Análisis de Costos

La construcción del regulador de voltaje automático posee los elementos que se presentan en la Tabla. el diseño de cada una de las partes que conforman el sistema de control y de potencia fueron considerados para que el producto final sea rentable sin perder aspectos importantes como la eficiencia y calidad.

Materiales	Descripción	Cantidad	Costo unitario [\$]	Costo total [\$]
Controlador	Control universal BTC 9300	1	274.28	274.28
Transformador	Trifásico 23kVA 380/85 VAC	1	1800.00	1900.00
Autotransformador	Variac Trifásico 23kVA 0-380VAC	1	2250.00	2300.00
Transductor de tensión	Diseño y construcción	1	33.45	33.45
Contactores	Bobina 220VAC Capacidad 10A	2	9.61	19.22
Sensores finales de carrera	Con switch NC y NO	2	3.45	6.90
Disyuntor 200A	600VAC 3 polos	1	72.62	72.62
Disyuntor 6A	2 polos	1	5.41	5.41
Fusibles 1A	2 polos con porta fusible	2	1.04	2.08
Motor síncrono	220VAC 0.44A 60r/min Monofásico	1	75.52	75.52
Seccionador manual	3 posiciones 3 polos	1	15.85	15.85
Gabinete metálico	Diseño y construcción	1	578.56	578.56

Misceláneos	Cables, botoneras, luz piloto, amarras, etc.	1	150.00	150.00
TOTAL				5433.89

Tabla 3.4. Listado de materiales usados en el regulador de voltaje con sus respectivos precios.

Los equipos descritos en la Tabla fueron utilizados para la implementación del prototipo de regulador de voltaje automático, los cuales cumplen con todas las demandas del sistema en general.

La adquisición de un AVR en el mercado en general conlleva una serie de costos: monetarios y no monetarios. Entre los monetarios se encuentra el costo del AVR más los costos adicionales que implica la importación y transporte. Por otro lado, en los no monetarios entra el costo de tiempo y costo de búsqueda, que pueden llegar a ser los más importantes en los servicios que en los productos al momento en que el cliente toma la decisión de realizar una compra o recompra.

La viabilidad de este producto depende del echo que cuya fabricación y desarrollo se lo hace a nivel nacional con materiales de fácil adquisición y con opciones de reemplazo, lo que agrega un valor, el cual se complementa con la rapidez de compra y traslado al sector industrial o residencial que solicita de este servicio.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Con el pasar de los años, la empresa eléctrica del Ecuador se ha esforzado por mejorar sus servicios con la finalidad de que no existan problemas de estabilidad de voltaje en las industrias y en los hogares, sin embargo, es evidente que en los sectores industriales el problema continúa cuando se conectan cargas de gran potencia, o muchas cargas empiezan a operar al mismo tiempo.

Debido a que la empresa eléctrica limita realizar proyectos en media tensión, se diseñó un regulador automático de voltaje en baja tensión aplicando técnicas de control de tal manera que el voltaje que ingresa a la industria se mantenga constante, sin importar las variaciones que se generen en la parte de media tensión. De esta forma, se ayuda a la industria aumentando sus horas de producción y alargando el tiempo de vida útil de sus máquinas, ya que, no tienen la necesidad de detener la producción para cambiar el TAP del transformador.

- Se diseñó un circuito eléctrico-mecánico capaz de regular automáticamente el voltaje que ingresa a la planta industrial, para ello, se utilizó un controlador universal que cuenta con características PID el cual nos permite ajustar un set-point deseado y mediante su salida de tipo ON-OFF se encarga de mover el motor incorporado en el Variac el cual permite el movimiento de las escobillas del transformador y seguidamente se regule el voltaje según el margen de error calculado entre el set-point y el voltaje medido.

El controlador universal nos permite modificar el rango de histéresis en el cual se requiere que actúen las salidas, por lo que, si se quiere una respuesta más exacta, se debe disminuir el rango de histéresis, por otro

lado, si la salida no requiere mucha exactitud, el rango de histéresis puede ser mayor.

Para la aplicación en la industria se concluye que con un rango de histéresis aproximado de un 2% el regulador de voltaje actúa de forma adecuada, ya que las variaciones de voltaje no se generan de forma brusca durante el día, permitiendo así pequeñas variaciones de voltaje permitidas sin que se active la salida, y que el motor del Variac no se encuentre en constante movimiento.

- Este método de control usado para un sistema cuya aproximación es no lineal satisface los requerimientos de rapidez y exactitud ante cambios inusuales de voltaje en el suministro eléctrico, además en base a las pruebas se encontró también que todos los aspectos de eficiencia dependen de la calidad de la onda al no presentar armónicos, caso contrario el transductor de tensión se ve perturbado por señales de ruido interno.

4.2 Recomendaciones

- ✎ Si en un futuro se requiere adaptar el regulador de voltaje automático para otro objetivo que requiera de mayor precisión y exactitud, se recomienda utilizar un PLC que tenga la posibilidad de programar bloques PID con el que se pueda ajustar el valor de set-point tanto para cambios de aumento como para decremento voltaje. Esto implicaría también, tener que añadirle un variador de frecuencia para posteriormente conectarle al motor que regula el voltaje del variac
- ✎ Para tener mayor precisión, también se recomienda cambiar el motor por un motor paso a paso, o por un servomotor. Este tipo de motores se caracterizan por brindar la posibilidad de tener un mayor control, ya que se enfocan en establecer valores de aceleración, posición angular o la velocidad a la que van a girar.

BIBLIOGRAFÍA

Motor síncrono. (2016, 22 noviembre). Máquinas Eléctricas. Recuperado 20 de junio de 2023, de <https://maquinaselectricasblog.wordpress.com/motor-sincrono-2/>

Jesús, F., & Nistal, C. (2014). Motores Síncronos.

https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/029001.pdf

Formación para la Industria 4.0. (2021, 11 junio). *Motores síncronos. - Formación para la industria 4.0.* Recuperado 22 de junio de 2023, de <https://automatismoindustrial.com/curso-carnet-instalador-baja-tension/motores/motores-sincronos/>

Crodriguez, & Crodriguez. (2023). Servomotores ¿Qué son y cómo funcionan? *SDI.*

<https://sdindustrial.com.mx/blog/que-es-un-servomotor-y-como-funciona/#Principales-caracteristicas-de-los-servomotores>

Transformador Seco – Moretran. (s. f.). Recuperado 18 de junio de 2023, de

<https://www.moretran.ec/transformador-seco/>

Transformadores tipo seco en baja tensión. (s. f.). Recuperado 23 de junio de 2023, de

<https://corpnewline.com/transformadores-en-seco.htm>

Transformadores Variables - Variacs NEWLINE. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2023, de

<https://corpnewline.com/variacs.htm>

Mecafenix, I. (2023). Que es un final de carrera Y para qué sirve. *Ingeniería Mecafenix.*

<https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensores/final-de-carrera/>

<https://www.areatecnologia.com>. (s. f.). *Final de carrera con ejemplos.* Recuperado 28 de junio de

2023, de <https://www.areatecnologia.com/EJEMPLO%20FINAL%20DE%20CARRERA.htm>

BTC-9300. (s. f.). Bielco. Recuperado 12 de julio de 2023, de <https://www.bielco.com/es/btc-9300-0>

Flores Estrella, Y. R., & Gutiérrez Terán, C. E. (2019). *Diseño y construcción de un regulador automático de voltaje para el generador sincrónico de 8, 58 kVA del laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia* (Bachelor's thesis, Quito, 2019.).

ANEXOS

ANEXOS A

Construcción del regulador de voltaje automático en baja tensión
Etapa de potencia



Figura 6.1. Adquisición de autotransformador variable (VARIAC) de un laboratorio.

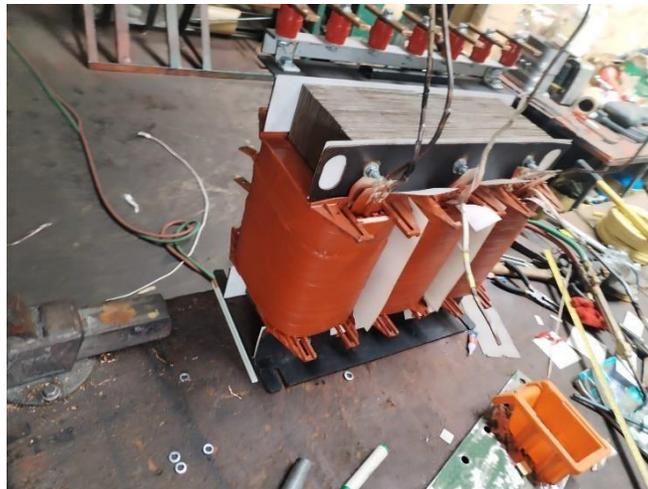


Figura 6.2. Adaptación de núcleo y rebobinado del transformador trifásico para regulación
380/85VAC



Figura 6.3. Conexión de transformador trifasico, lado secundario con los aisladores de entrada y aisladores de salida y lado primario con las escobillas de autotransformador variable.



Figura 6.4. Conexión de escobillas con el lado secundario del transformador, conexión de alimentación con los aisladores de entrada con netro y conexión de motor sincrónico a sensores final de carrera.



Figura 6.5. Aisladores de entrada fase A, B, C y N, Aisladores de salida a, b y c

ANEXOS B

Construcción del regulador de voltaje automático en baja tensión

Etapa de control



Figura 6.6. Adquisición del controlador BTC9300

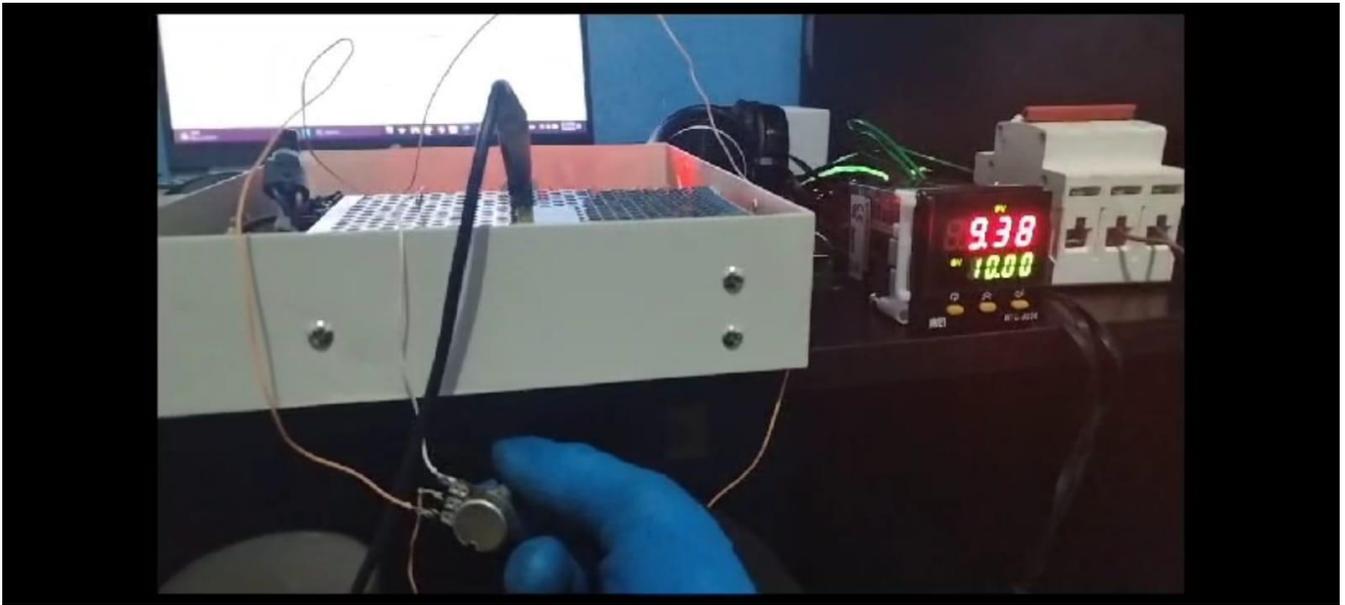


Figura 6.7. Parametrización para conocer la respuesta y velocidad del controlador ante una entrada de voltaje regulada por un potenciómetro de 0-10Vdc desde una fuente de 12Vdc

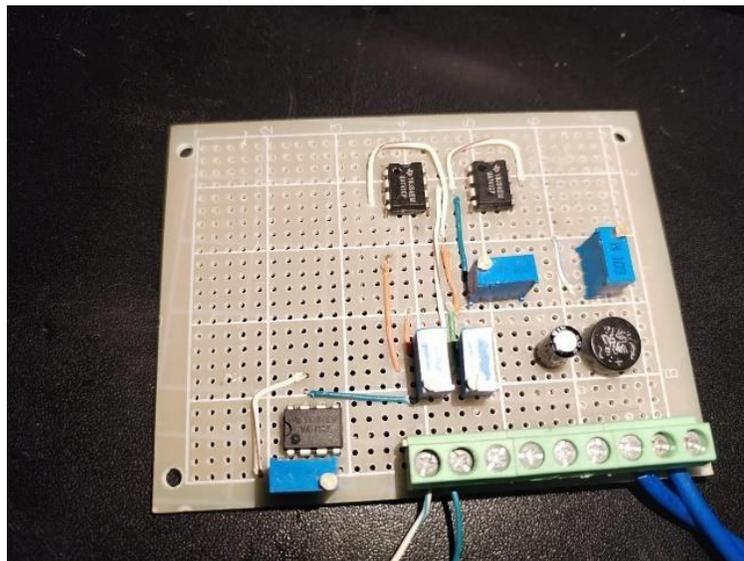


Figura 6.8. Primer diseño del transductor de tensión con opams y potenciómetro para ajustar las constantes de la ecuación de la recta.

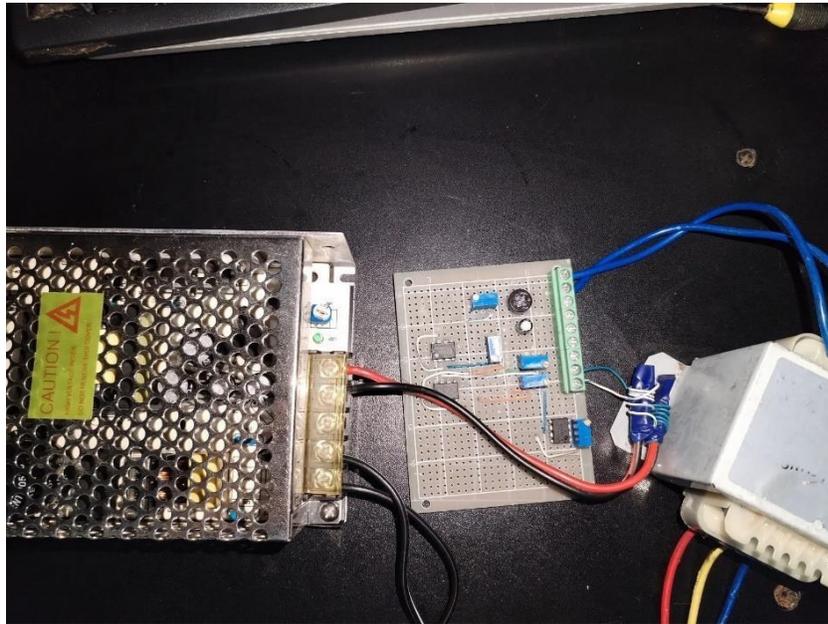


Figura 6.9. Prueba con el primer diseño de transductor de tensión para verificar los voltajes en la salida de este.

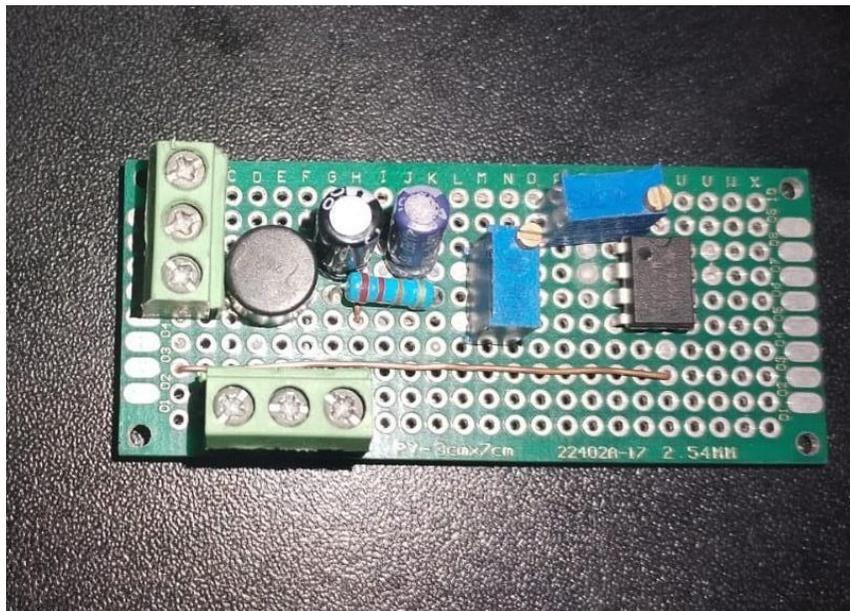


Figura 6.9. En base las pruebas realizadas al primer modelo se rediseña una forma más reducida del transductor que cumple las condiciones necesarias para el control.

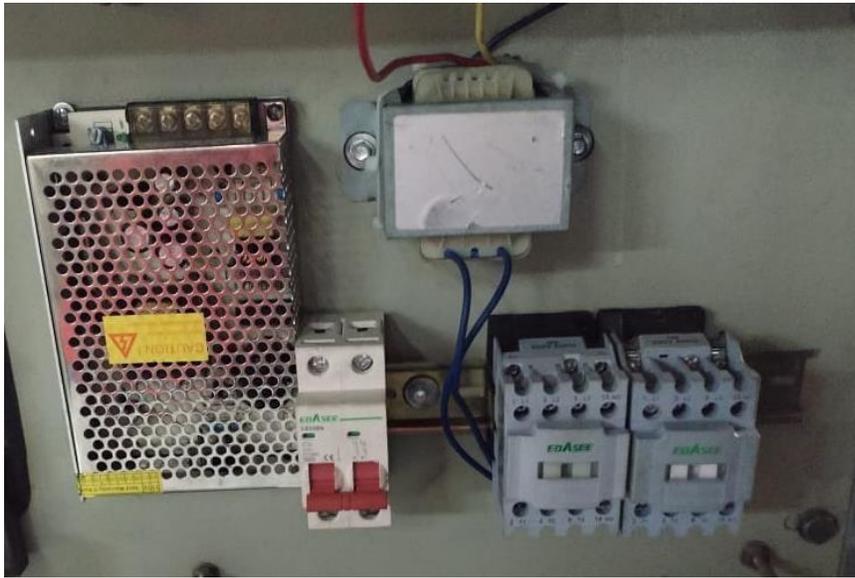


Figura 6.10. Montaje en el gabinete del regulador de voltaje la fuente de 12VDC, transformador de aislamiento, transductor de tensión y contactores uno parada giro.



Figura 6.11. Montaje del controlador BTC9300 en el gabinete del regulador de voltaje.

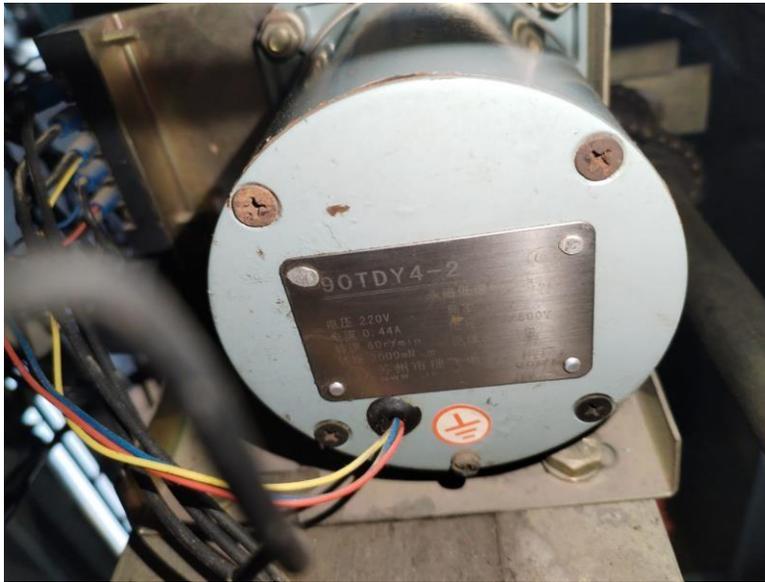


Figura 6.12. Conexión del motor síncrono a los contactores.

ANEXOS C

Pruebas realizadas al regulador de voltaje automático



Figura 6.13. Laboratorio de la empresa donde se realizan pruebas con la fuente regulable.



Figura 6.14. Prueba del transductor de tensión con controlador ante variaciones controladas de voltaje alrededor del punto de operación 380VAC.



Figura 6.15. Se mide el voltaje que se envía al control del regulador de voltaje, el cual es 380VAC aproximadamente.



Figura 6.16. Prueba de la respuesta del regulador ante variación elevadas en el voltaje de entrada, se observa que un incremento de 430VAC mientras que el voltaje de salida es de 380VAC aproximadamente como lo indica el controlador.

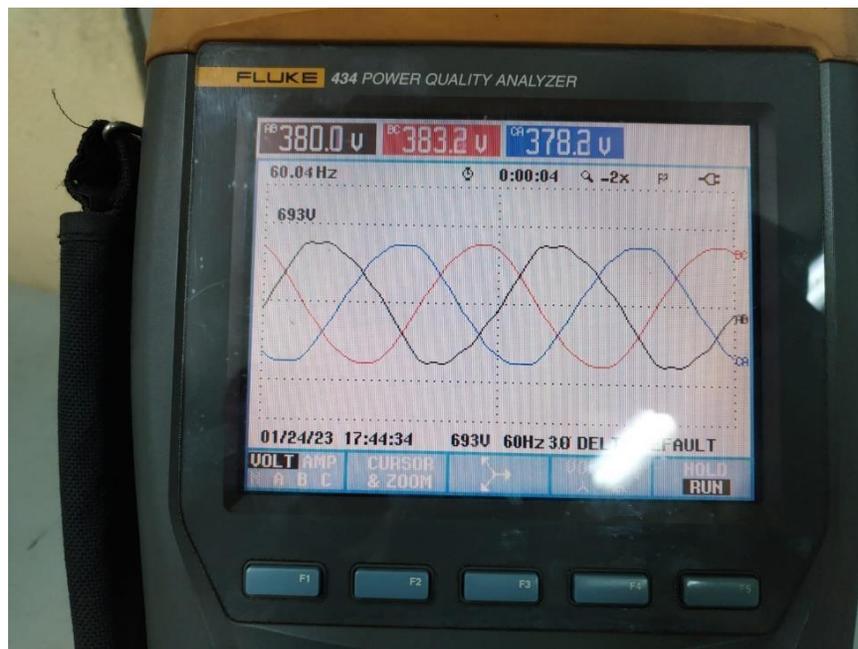


Figura 6.17. Análisis de onda en cada fase para saber cuál presenta menos cantidad de armónicos y conectar el control para reducir el ruido en el transductor de tensión.

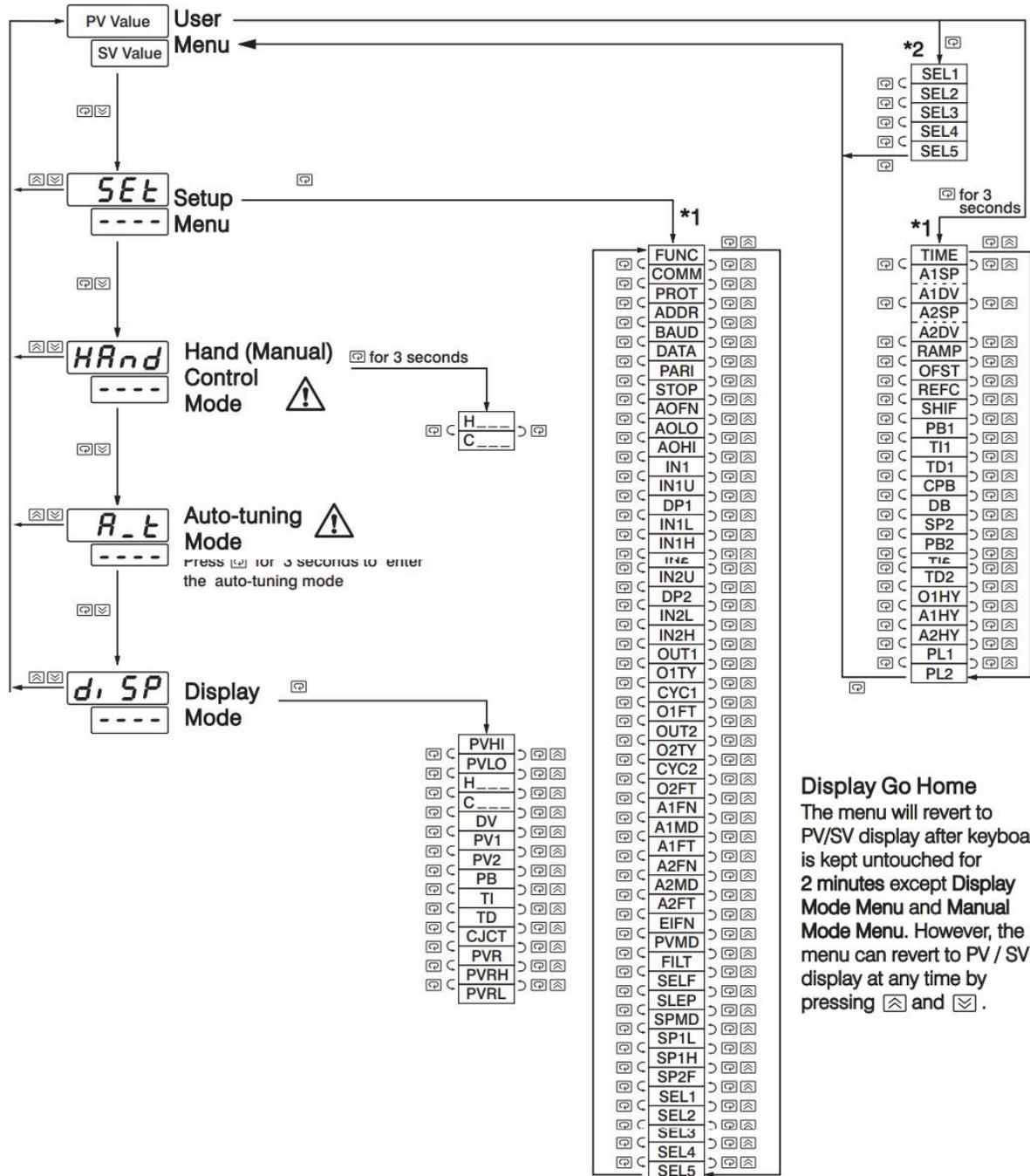


Figura 6.18. Análisis del voltaje de salida del regulador, tomada de la fase b y el neutro del sistema, para verificar la relación que muestra el controlador con el valor real de voltaje y se confirma el correcto funcionamiento, ya que el indicador en rojo esta próximo al punto de operación 380VAC y 217.8VAC corresponde a 377.24VAC línea a línea.

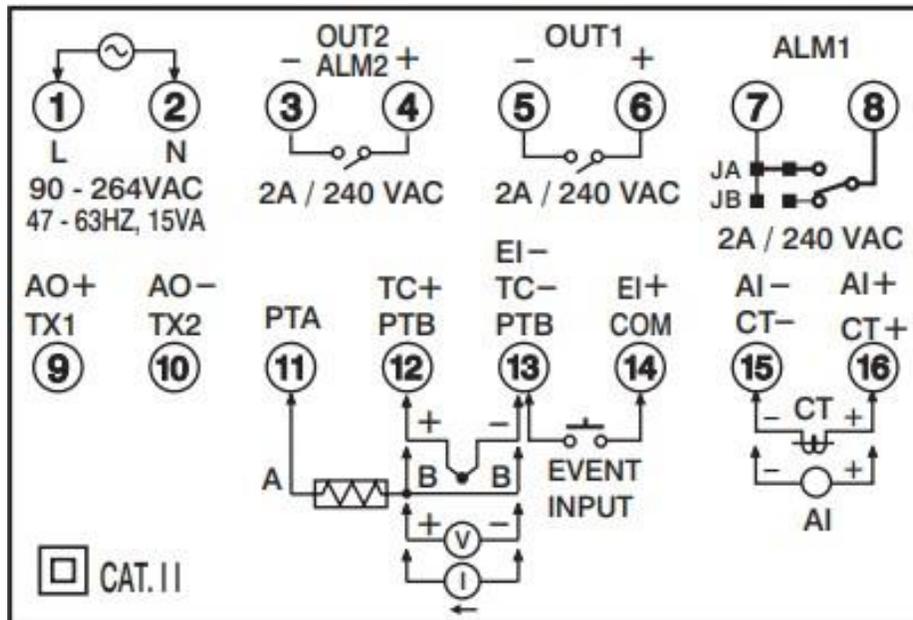


Figura 6.19. Prueba con todas las etapas interconectadas, por medio del suministro del laboratorio de la empresa se realizan fluctuaciones de voltaje reales y se observa la regulación efectiva, en el caso se tiene un voltaje 222.8VAC del multímetro y desde un medidor externo se mide 386.4VAC línea en la salida del regulador, se puede ver como las escobillas se encuentran separadas por una distancia equivalente al voltaje sustraído.

APÉNDICES



Parametrizaciones de funciones del controlador universal



Configuración de terminales del controlador universal