



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

“INGENIERO ELÉCTRICO”

**“REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE VOLTAJE TERMINAL DEL GENERADOR DC MODELO
DYN 400 POR MEDIO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.”**

Autores:

**ANDREA DENISSE BASTIDAS MOREJÓN
JONATHAN JAVIER MINA QUIÑONEZ**

Tutor:

ING. DAVID HUMBERTO CÁRDENAS VILLACRES

GUAYAQUIL – ECUADOR

2019

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA

Todos los conceptos desarrollados en el presente proyecto de titulación, desde el desarrollo del tema, el análisis y respectivas conclusiones de este, corresponden exclusivamente a **Andrea Denisse Bastidas Morejón** con cédula de identificación 0923250880 y **Jonathan Javier Mina Quiñonez** con cédula de identificación 0803558410 y el patrimonio intelectual del mismo a la **Universidad Politécnica Salesiana**.

Guayaquil, septiembre del 2019

Andrea Denisse Bastidas Morejón

C.I: 0923250880

Jonathan Javier Mina Quiñonez

C.I: 0803558410

DOCUMENTO DERECHOS DE AUTOR

Nosotros **Andrea Denisse Bastidas Morejón** con cédula de identificación 0923250880 y **Jonathan Javier Mina Quiñonez** con cédula de identificación 0803558410, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la titularidad sobre los derechos del actual proyecto de titulación en virtud de que somos los autores del tema: **“REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE VOLTAJE TERMINAL DEL GENERADOR DC MODELO DYN 400 POR MEDIO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA”**, mismo que ha sido realizado para la obtención del título de: **INGENIERO ELÉCTRICO**, quedando la universidad facultada para ejercer y usar los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra anteriormente citada.

En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hagamos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la **Universidad Politécnica Salesiana**.

Guayaquil, septiembre de 2019

Andrea Denisse Bastidas Morejón
C.I: 0923250880

Jonathan Javier Mina Quiñonez
C.I: 0803558410

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo Ing. David Humberto Cárdenas Villacrés certifico que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto técnico de titulación “**REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE VOLTAJE TERMINAL DEL GENERADOR DC MODEL DYN 400 POR MEDIO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA**”, realizado por los señores **Andrea Denisse Bastidas Morejón** y **Jonathan Javier Mina Quiñonez** para la obtención del título de **Ingeniero Eléctrico**.

Por medio de la presente certifico que el documento cumple con los requisitos establecidos en el Instructivo para la Estructura y Desarrollo de Trabajos de Titulación para pregrado de la Universidad Politécnica Salesiana.

En virtud de lo anterior, autorizo su presentación y aceptación como una obra auténtica y de alto valor académico.

Guayaquil, Septiembre de 2019.

Ing. David Humberto Cárdenas Villacrés

DEDICATORIA

Le dedico este proyecto a mi madre y mis hermanos ya que con su amor, paciencia y confianza he logrado culminar esta pequeña meta que me propuse.

Andrea Denisse Bastidas Morejón

A mi mamá y a mi hermana, quienes en mi confiaron y supieron apoyarme en todo momento, otorgándome toda su paciencia

Jonathan Javier Mina Quiñonez

AGRADECIMIENTO

Primero a Dios por darme la bendición y la oportunidad de demostrar que con amor, dedicación y paciencia se puede lograr llegar a una meta y no dejarse vencer por los obstáculos en el transcurso del camino, a mi madre Nancy Sofía Morejón Mendoza por ser un ejemplo de lucha y constancia, a mis hermanos Antonio y John que de distintas maneras me ayudaron a seguir y nunca rendirme.

Mi familia y amigos que siempre han estado prestos a ayudarme en momentos de flaqueza.

Gracias infinitas a las personas que confiaron en mí.

Andrea Denisse Bastidas Morejón

Agradezco a mi mamá y a hermana por el apoyo incondicional

Jonathan Javier Mina Quiñonez

RESUMEN

El presente proyecto de titulación plantea el control automático del voltaje en terminal de un generador DC, los generadores son dispositivos capaces de mantener un voltaje constante entre sus terminales mediante el giro de un motor de corriente alterna, a medida que aumenta la velocidad de giro de este motor de corriente alterna, el voltaje generado entre los terminales puede variar.

Este voltaje generado en los terminales es constante si no hay carga que lo perturbe, pero este voltaje puede caer dependiendo de la carga de trabajo a la que esté sometido, es decir, al alimentar una carga, puede producir una caída de voltaje en el voltaje terminal del generador DC.

Para compensar este efecto de caída de voltaje, el motor del generador debe girar más rápido para aumentar el voltaje, pero el generador DYN 400 no tiene un mecanismo que lo haga automáticamente, lo que significa que la velocidad del motor del generador debe aumentar manualmente para que el generador genere más voltaje más alto que compense la caída de voltaje causada por la carga colocada.

Para poder variar la velocidad de rotación del motor de corriente continua del generador y así aumentar el voltaje de los terminales, que es un dispositivo capaz de generar una cierta señal de frecuencia, lo que utilizará el motor de corriente continua como referencia para girar.

Para lograr aumentar la velocidad del motor del generador DC mediante el variador de frecuencia es importante poder medir el voltaje que el generador está entregando en sus terminales y a través de este valor y el valor esperado se puede llevar a cabo un control de

circuito cerrado que determina el valor de frecuencia ideal que debe emitir el variador para obtener siempre el voltaje deseado en los terminales.

Para realizar la lectura del voltaje del generador se implementó y digitalizo una interfaz capaz de medir el voltaje generado para enviarlo al PLC, este dispositivo programable tiene como objetivo hacer la comparación entre el voltaje medido y el voltaje deseado, una vez que se detecte la variación de voltaje, envía la información al convertidor de frecuencia para aumentar o disminuir la velocidad del motor de corriente alterna, logrando así una tensión estable entre los terminales del generador de corriente continua.

Palabras clave: Generador, Variador, Frecuencia, Voltaje.

ABSTRACT

This titling project involves automatic terminal voltage control of a DC generator, generators are devices capable of maintaining a constant voltage between their terminals by turning a DC motor; as the turning speed of this AC motor increases, the voltage generated between the terminals can be varied.

This voltage generated at the terminals is constant if there is no load to disturb it, but this voltage can drop depending on the workload is subjected to, it means when feeding a load, can produce a voltage drop in the terminal voltage of the DC generator.

To offset this voltage drop effect, the generator motor must rotate faster to increase the voltage, but the DYN 400 generator doesn't have a mechanism that does this automatically, it means the speed of the generator motor must be increased manually for the generator to generate a higher voltage which compensates the voltage drop caused by the load placed.

To be able to vary the rotation speed of the DC motor of the generator and thus increase the voltage of the terminals, which is a device capable of generating a certain frequency signal whichever will use the DC engine of the generator as a reference to rotate.

To manage to increase the speed of the DC generator motor using the frequency inverter, it's important to be able to measure the voltage that the generator is delivering in their terminals and through this value and the expected value a closed loop control can be carried out which determines the ideal frequency value that must emit the variator to get the desired voltage in the terminals always.

To perform the generator voltage reading, an interface capable of measuring the generated voltage was implemented and digitized to send it to the PLC, this programmable device aims to

make the comparison between the measured voltage vs the desired voltage and once the voltage variation is detected will send the information to the frequency inverter to increase or decrease the speed of the ac motor thus achieving a stable tension between the dc generator terminals.

Keywords.- Engine, Generator, Variator, Frequency, Voltage

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA.....	ii
DOCUMENTO DERECHOS DE AUTOR.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE GENERAL.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS	xx
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema.....	2
1.1. Delimitación.....	2
1.1.1. Espacial	2
1.1.2. Temporal.....	3
1.1.3. Académica	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Importancia	7
1.4. Alcance	7
1.5. Justificación.....	8

1.6.	Objetivos	8
1.6.1.	Objetivo general	8
1.6.2.	Objetivos específicos	8
2.	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	9
2.1.	Generador	9
2.2.	Dínamo	10
2.3.	Alternador.....	11
2.4.	Electromagnetismo.....	11
2.5.	Motor.....	12
2.5.1.	Motores de corriente continua	15
2.5.2.	Motores de corriente alterna.....	16
2.5.3.	Motores monofásicos	16
2.5.4.	Motores trifásicos	16
2.5.5.	Conexión en estrella.....	17
2.5.6.	Conexión en delta	18
2.6.	HP	20
2.7.	Watt.....	21
2.8.	Frecuencia	21
2.9.	Hertzios.....	22
2.10.	Voltaje.....	23
2.11.	Corriente.....	24

2.12.	Amperios	25
2.13.	Automatización industrial	25
2.14.	Controladores industriales	26
2.15.	PLC	27
2.16.	Ladder	28
2.17.	Labview	29
2.18.	Diagramas de flujo	31
2.19.	Sistemas de control	32
2.20.	Control en lazo abierto	32
2.21.	Control en lazo cerrado.....	33
2.22.	PID	33
2.23.	Variador de frecuencia.....	35
2.24.	Voltímetro	37
2.25.	Amperímetro.....	37
3.	MARCO METODOLÓGICO	39
3.1.	Metodología de la investigación	39
3.1.1.	Método de análisis y síntesis.....	39
3.1.2.	Método científico	39
3.1.3.	Método experimental.....	40
3.2.	Técnicas de investigación	40
3.2.1.	La observación.....	41

3.3. Población y muestra.....	41
3.4. Recolección de información.....	41
3.5. Propuesta de solución	41
3.5.1. Generador	42
3.5.2. Variador de frecuencia	46
3.5.3. Motor AC.....	50
3.5.4. Banco de pruebas para máquinas asíncronas.....	51
3.5.5. PLC.....	52
3.5.6. PID.....	56
3.5.7. Labview.....	57
3.5.8. Panel de administración	62
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
4.1. Prueba de vacío	65
4.1.1. Procedimiento	65
4.1.2. Análisis de resultados	67
4.2. Prueba con carga de 4.5 A.....	70
4.2.1. Procedimiento	70
4.2.2. Análisis de resultados	70
4.3. Curvas características	72
4.3.1. Curvas de operación	76
CONCLUSIONES.....	81

RECOMENDACIONES	82
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN VINCULADOS	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	87
PRESUPUESTO.....	87
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	88
PROGRAMACIÓN DEL PLC EN LENGUAJE LADDER	88
TABLAS DE CÁLCULO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	94
TABLAS DE MEDICIONES.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana. (Google Maps, 2019)	3
Figura 2 - Disco de faraday	4
Figura 3 - Dínamo de Pixii	5
Figura 4 - Dínamo de Pacinotti	6
Figura 5 - Alternador para carros.....	7
Figura 6 - Dínamo Ruston 6VE, author Andy Dingley	9
Figura 7 – Dínamo de botella en una bicicleta, fuente Seitenläufer-Dynamo für ein fahrendes Gerät.....	10
Figura 8 - Modelado simple de un dínamo.....	10
Figura 9 - Modelado simple de un alternador	11
Figura 10 – Cuerpo conductor expuesto a un campo magnético variable, Autor Bela Nemeth	12
Figura 11 - Bobinado de un motor de paso, fuente Phidgets	13
Figura 12 - Clasificación de las máquinas eléctricas, fuente Control de velocidad de un motor sin escobillas de CD, autor Ing. Luis Godoy Rodriguez.....	14
Figura 13 - Clasificación de los motores de corriente alterna, fuente Control de velocidad de un motor sin escobillas de CD, autor Ing. Luis Godoy Rodriguez.....	15
Figura 14 - Conexión en estrella de un motor, fuente coparoman (https://coparoman.blogspot.com/2014/09/motores-electricos-trifasicos-de-6.html)	18
Figura 15 - Conexión en delta de un motor, fuente coparoman (https://coparoman.blogspot.com/2014/09/motores-electricos-trifasicos-de-6.html)	19
Figura 16 - Esquema de conexión de un motor trifásico	19
Figura 17 - Ejemplo gráfico de la unidad de medida caballos de fuerza	20
Figura 18 - Equivalencias de los Newtons	21

Figura 19 - Ondas oscilando a diferentes frecuencias	22
Figura 20 - Heinrich Hertz, fuente Wikipedia	23
Figura 21 - Movimiento de los electrónes	24
Figura 22 - André-Marie Ampère, fuente TheFamousPeople (https://www.thefamouspeople.com/profiles/andre-marie-ampere-535.php)	25
Figura 23 - Planta industrial automatizada.....	26
Figura 24 - Panel de control de una planta	27
Figura 25 - PLC S1200.....	28
Figura 26 - Ejemplo de lenguaje de programación Ladder	29
Figura 27 - Flujo de automatización en LabVIEW.....	30
Figura 28 - Logo de LabVIEW	31
Figura 29 - Diagrama de flujos	31
Figura 30 - Esquema básico de un sistema de control	32
Figura 31 - Sistema de control en lazo abierto	33
Figura 32 - Sistema de control en lazo cerrado	33
Figura 33 - Estructura del controlador PID.....	34
Figura 34 - Respuesta de un controlador PID.....	35
Figura 35 - Varias señales sinusoidales a diferentes frecuencias.....	36
Figura 36 - Variador de frecuencia	36
Figura 37 - Multímetro digital.....	37
Figura 38 - Amperímetro inalámbrico.	38
Figura 39 - Arquitectura de la solución	42
Figura 40 - Componentes internos de un motor.....	43
Figura 41 - Campo eléctrico producido por un campo magnético	44
Figura 42 - Placa de datos del generador DC.....	45
Figura 43 - Vista aérea de una turbina eólica	45

Figura 44 – Placa del variador de frecuencia.....	46
Figura 45 - Valore de la certificación IP	47
Figura 46 - Ubicación del variador de frecuencua.....	49
Figura 47 - Conexión con jumpers del variador de frecuencia	50
Figura 48 - Placa del motor AC	51
Figura 49 - Banco de prueba de una máquina asíncrona trifásico	52
Figura 50 - PLC Siemens S1200	53
Figura 51 - Sistema de fusibles para controlar los picos de energía	54
Figura 52 - Marcha y paro del PLC en local y remoto	55
Figura 53 - Sistema de marcha local del PLC.....	55
Figura 54 - Control de marcha y paro del control PID	56
Figura 55 - Cálculo del voltaje de armadura para el controlador PID	57
Figura 56 - Botonera de control	61
Figura 57 - Interfaz de control de variador de frecuencia	61
Figura 58 - Programación en LabVIEW	62
Figura 59 - Panel de control del sistema.....	63
Figura 60 - Vista lateral del panel de administración	64
Figura 61 - Acomple de motor y generador	65
Figura 62 - Conexión de ethernet	66
Figura 63 - Gráfias de voltaje y corriente en pruebas de vacío	68
Figura 64 - Gráfica de revoluciones por minuto del motor	69
Figura 65 - Grafica de revoluciones por minuto del motor, vista de cerca.....	69
Figura 66 - Gráficas de voltaje y corriente con carga de 4.5 ^a	71
Figura 67 - Relación entre corriente y torque.....	72
Figura 68 - Cálculo de eficiencia del Sistema	74
Figura 69 – Cálculo de eficiencia del Sistema	75

Figura 70 - Curva de operación a 1800RPM	76
Figura 71 - Pendiente de operación.....	77
Figura 72 - Gráfica de corriente de terminal vs ED	78
Figura 73 - Gráfica de corriente terminal vs Eficiencia.....	79
Figura 74 – Corriente de terminal vs torque de rozamiento	79
Figura 75 - Gráfica de corriente de terminal vs Perdidas mecánicas	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Valores comunes medidos en voltios	24
Tabla 2 - Clasificación contra el polvo de acuerdo a la certificación IP	47
Tabla 3 - Tabla de certificación IP para líquidos	48
Tabla 4 - Principales componentes de LabVIEW	58
Tabla 5 - Estructuras de control básica de LabVIEW	59
Tabla 6 - Operaciones aritméticas básicas de LabVIEW	60
Tabla 7 - Resultados de las pruebas del generador con carga y una corriente de campo constante	71
Tabla 8 - Cálculos de parámetro del motor	73
Tabla 9 - Cálculos de parámetro del motor	74
Tabla 10 - Mediciones del motor	76
Tabla 11 - Presupuesto para implementación	87
Tabla 12 - Conograma de actividades	88

1. INTRODUCCIÓN

Los generadores dc son ampliamente usados para poder generar energía eléctrica, esto se logra mediante el giro de un eje del generador, este giro logra que en sus extremos o terminales el generador tenga un voltaje equivalente a las vueltas que da su eje, existen diversas formas de hacer girar dicho eje, se pueden usar las fuerzas de la naturaleza como las mareas tal como se usan en las centrales hidroeléctricas o se puede usar un motor el cual haga girar el eje central del generador.

Una vez el generador genera el voltaje requerido se puede agregar las cargas para las cuales se está generando dicho voltaje, pero cuando las cargas son muy elevadas, el voltaje generado por el generador decae, es decir no se puede mantener estable en el valor nominal, sino que este disminuye.

Cuando el voltaje disminuye el proceso no funciona correctamente por lo que es importante que este voltaje se mantenga estable, la caída de tensión es inevitable, entonces la única alternativa viable sería subir el voltaje hasta que regrese al valor nominal, para esto se debe controlar la velocidad el eje del generador ya que si esta gira más rápido el voltaje sube y si gira más despacio el voltaje baja.

Para controlar la velocidad del eje del generador hay que controlar la velocidad del motor que hace girar este eje, para el giro de este eje se usó un motor AC, los cuales pueden alcanzar mayores velocidades con un menor consumo de energía frente a los motores DC, la mejor forma de controlar la velocidad de un motor AC es usar un variador de frecuencia.

El variador de frecuencias puede generar señales con diferentes frecuencias si esta señal se envía a la entrada del motor AC, este girará a una velocidad equivalente a la frecuencia generada por el variador.

1.1. Descripción del problema

Poder mantener el voltaje estable entre los terminales de un generador es un trabajo de vital importancia ya que los dispositivos que funcionan con corriente directa no soportan estas variaciones de voltaje, en el mejor de los casos los dispositivos simplemente no funcionan, pero estos pueden llegar hasta a averiarse si las variaciones de voltaje son muy grandes.

Por eso es importante que el sistema de control diseñado para aumentar o disminuir la velocidad del motor del generador sea robusto y haga que estas fluctuaciones de voltaje sean imperceptibles para los equipos.

Para esto las mediciones del voltaje del generador deben ser precisas, el control del variador de frecuencia debe ser robusto, pero sobre todo el programa del controlador debe ser estable y realizar siempre un control adecuado.

1.1. Delimitación

1.1.1. Espacial

Se realizará un análisis de voltaje y frecuencia en el generador Dyn 400, ubicado dentro de la Universidad Politecnica Salesiana sede Guayaquil en la provincia del Guayas, tal como se muestra en la *Figura 1*.



Figura 1 - Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana. (Google Maps, 2019)

1.1.2. Temporal

EL presente proyecto de titulación será efectuado en el periodo de Mayo del 2018 a Septiembre del 2019.

1.1.3. Académica

El presente proyecto de titulación consiste en programar un sistema de control en lazo cerrado para regular la salida de voltaje de un generador DC, para lograr este objetivo es necesario tener un amplio conocimiento en áreas como funcionamiento de maquinas eléctrica, programación de sistemas industriales con PLC, diseños de sistemas de control, además es importante tener una sólida base en electrónica para poder entender el funcionamiento de cada componente que se utilizará.

1.2. Antecedentes

Los generadores son dispositivos capaces de convertir la energía mecánica en energía eléctrica gracias al electromagnetismo, por otro lado un motor es un dispositivo el cual realiza el proceso inverso al convertir energía eléctrica en energía mecánica.

Los generadores se dividen en dos grandes tipos como son los generadores DC y los generadores AC, los generadores DC son comúnmente conocidos como dinamos, mientras que los generadores AC se los conoce como alternadores.

El dinamo más antiguo data de 1831 y es el disco de Faraday el cual lo podemos apreciar en la Figura 2, este consiste en un disco conductor que gira en forma perpendicular a un imán de herradura produciendo un voltaje relativamente bajo en el orden de unos pocos voltios.

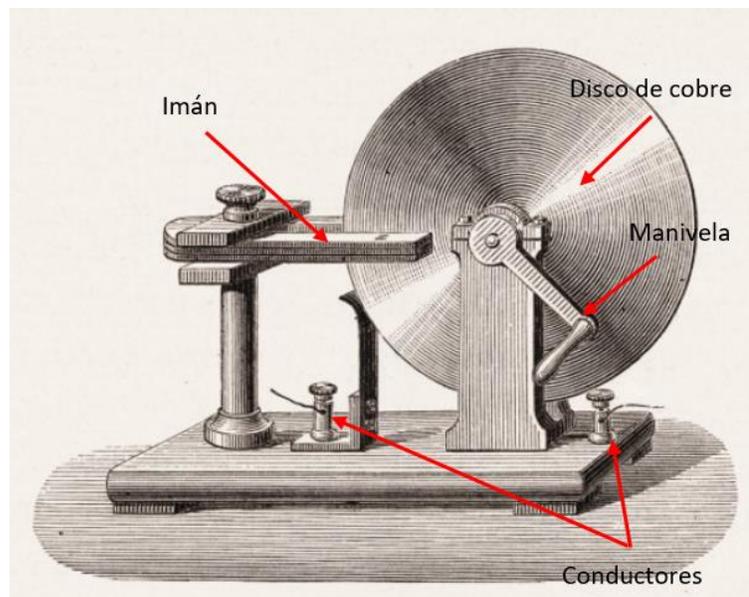


Figura 2 - Disco de Faraday

El primer generador eléctrico que comenzó a usarse dentro de la industria se basó en el modelo de Faraday y fue construido en 1832 por el francés Hippolyte Pixii el cual

empleaba un imán permanente girado por una manivela como se puede apreciar en la Figura 3.

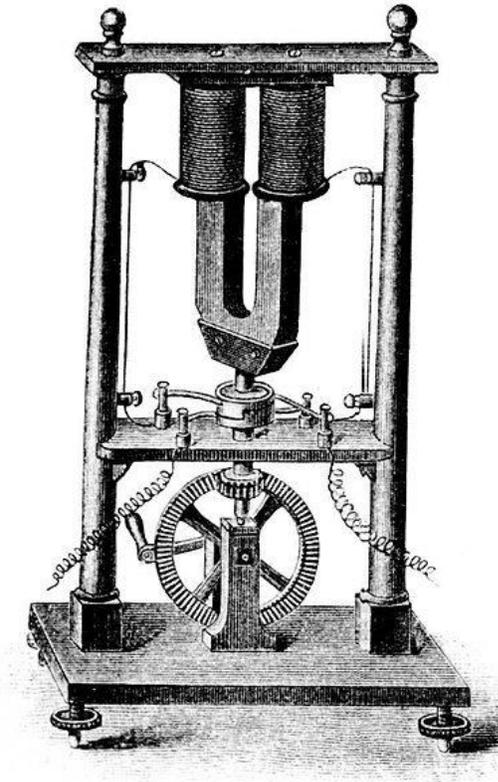


Figura 3 - Dínamo de Pixii

Este imán giraba con su núcleo de hierro con un cable eléctrico enrollado, este imán giratorio producía un pulso eléctrico cada vez que uno de los imanes pasaba junto a la bobina y cada polo del imán producía corriente en el sentido contrario, es decir, producía una corriente alterna, para evitar esto Pixii añadió al sistema un conmutador eléctrico para convertir la corriente alterna en continua.

El principal problema de estos modelos de Farady y Pixii es que estos solo generaban picos de corrientes repentinos cuando el imán pasaba cerca de la bobina, la mayor parte del tiempo que estaba encendido no producía energía, pero en 1870 es

decir casi 40 años después Antonio Pacinotti, un científico italiano reemplazó la bobina giratoria con una forma toroidal como se puede apreciar en la Figura 4, esta se enrollaba alrededor de un anillo de hierro buscando que la bobina siempre esté influida por los imanes, es decir, producía más corriente y reducía los picos de variación en la corriente.

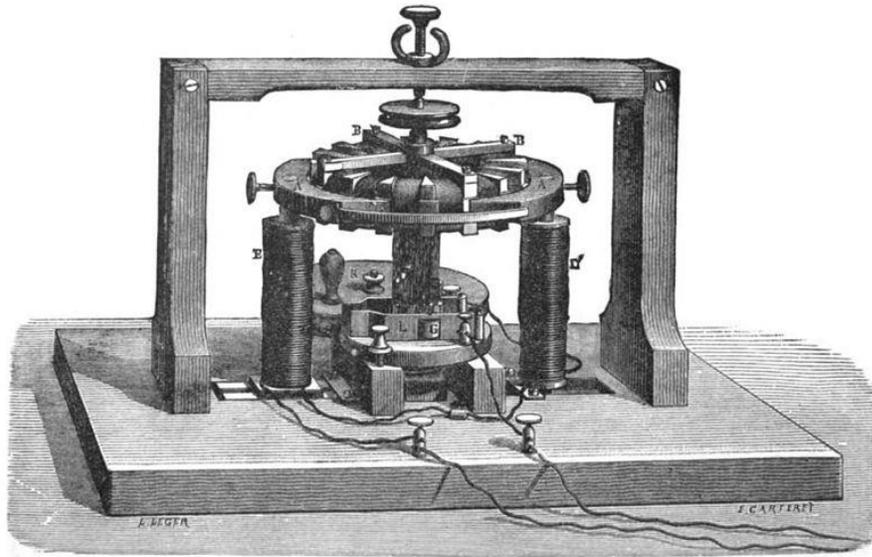


Figura 4 - Dínamo de Pacinotti

Uno de los usos más comunes de los dínamos se dio en el automovilismo, anteriormente se usaban magnetos para la generación de energía dentro del vehículo pero estos demostraron no ser lo suficientemente eficientes para las necesidades de los vehículos de la fecha, mucho menos lo serían hoy en día, entonces se adoptó el uso de estos generadores.

Los generadores de los vehículos no son los dínamos como tal sino que son alternadores ya que producen corriente alterna, un alternador para carro lo podemos apreciar en la Figura 5.

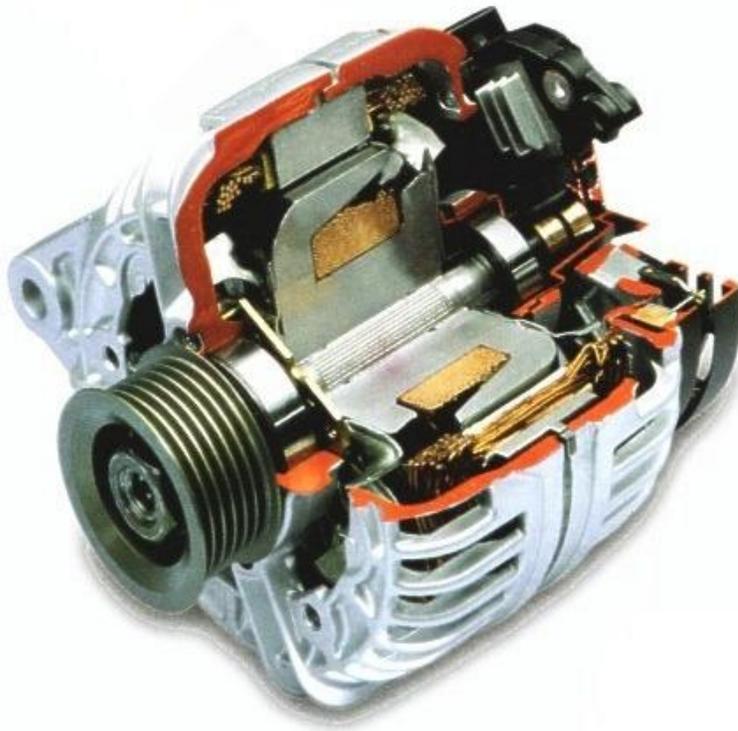


Figura 5 - Alternador para carros

1.3. Importancia

En la actualidad la capacidad de generar señales DC estables permite el correcto funcionamiento de diversos dispositivos, por eso es importante que se disponga de un mecanismo de control capaces de convertir generadores en lazo abierto cuya salida de voltaje puede variar en función de la carga a generadores en lazo cerrado cuya salida de voltaje no varía en función de la carga, sino que el mismo sistema regula la velocidad del motor que mueve el eje del generador para que este aumente la velocidad y así se pueda mantener siempre un voltaje estable entre los terminales del generador.

1.4. Alcance

El alcance del presente proyecto de titulación es:

- Realizar mediciones de voltaje de la salida del generador DC
- Controlar la frecuencia generada por el variador de frecuencias
- Diseñar un programa capaz de utilizar las mediciones de voltaje del generador DC para mandar ordenes al variador de frecuencias

1.5. Justificación

Un variador de frecuencia es un dispositivo capaz de controlar la velocidad de giro en motores de corriente alterna (AC), la caída de tensión en el Generador Dyn 400 representaría pérdidas económicas a largo plazo para la Universidad Politécnica Salesiana-Sede Guayaquil.

En busca de una solución del problema de la caída de tensión nos encontramos en la necesidad de regular el voltaje para que el tiempo de vida del motor y generador que se van a conectar sea más extenso, ahorro energético, y sea automático.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Controlar el voltaje terminal del generador DC.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar las curvas características del generador Dyn 400
- Comprender las curvas características del motor asíncrono
- Realizar una interfaz para el variador de frecuencia
- Analizar el comportamiento del generador DC al estar conectado con el motor asíncrono

2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1. Generador

El generador es una máquina eléctrica rotatoria para la conversión de energía mecánica en eléctrica, por medio de la acción de un electroimán rotatorio para inducir una tensión eléctrica, normalmente, se les conoce, también como plantas de energía.

Un dínamo el cuál se puede apreciar en la Figura 6, fue el primer generador eléctrico, este fue diseñado para transformar el flujo magnético en flujo eléctrico gracias al fenómeno de la inducción electromagnética.



Figura 6 - Dínamo Ruston 6VE, author Andy Dingley

En la actualidad podemos apreciar el uso de los dínamos por los ciclistas, ya que producen energía eléctrica para iluminar sus bicicletas mediante un dínamo de botella como el de la Figura 7, el cual mediante un imán y una bobina estática genera corriente para encender las luminarias de una bicicleta.



Figura 7 – Dínamo de botella en una bicicleta, fuente Seitenläufer-Dynamo für ein fahrendes Gerät

2.2. Dínamo

Un dínamo es un generador de corriente continua el cual funciona mediante un imán el cual hace mover un eje conductor, este movimiento genera corriente sobre el eje el cual mediante un sistema de escobillas transporta la energía hacia la carga.

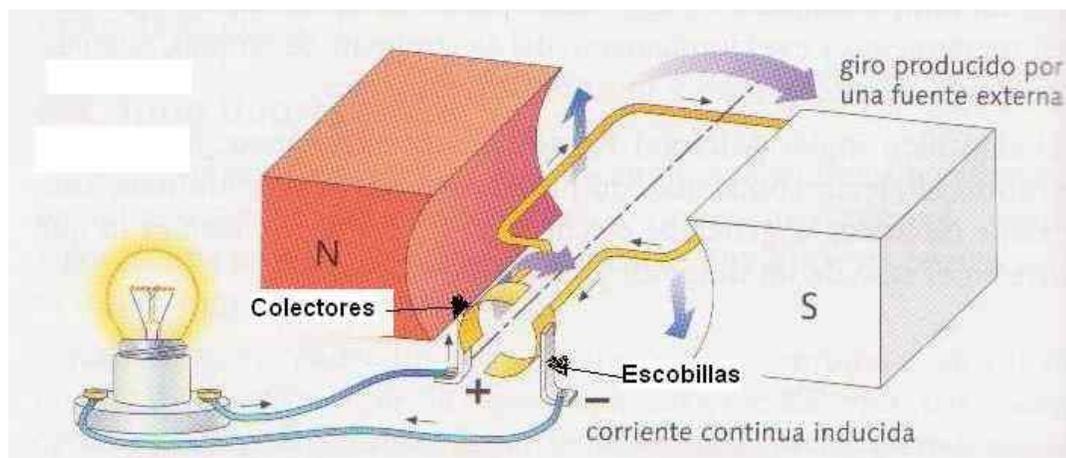


Figura 8 - Modelado simple de un dínamo

2.3. Alternador

Un alternador es un generador de corriente alterna el cual funciona de manera similar al dínamo, el principio de funcionamiento es el mismo con la diferencia que las escobillas no están recortadas sino que son continuas esto hace que cuando el eje gire 180 grados y cambie de polaridad los electrones cambie de dirección en el mismo cable, consiguiendo así un vaivén de la corriente como se puede apreciar en la Figura 9.

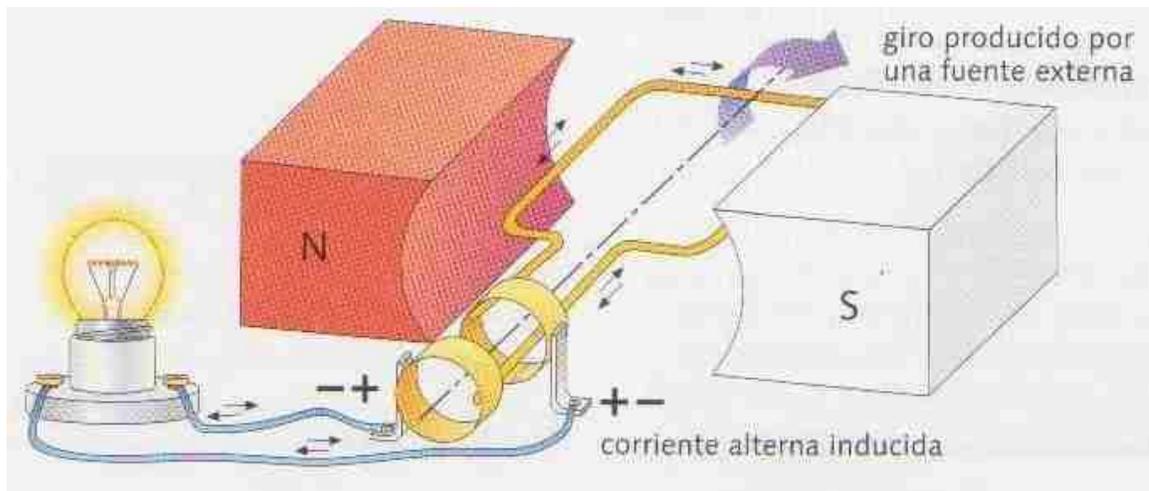


Figura 9 - Modelado simple de un alternador

2.4. Electromagnetismo

El electromagnetismo es un fenómeno físico descubierto por el físico inglés Michael Faraday en el año 1831.

Cuando un cuerpo conductor de electricidad se expone a un campo magnético variable en el cuerpo expuesto se genera un campo eléctrico variable, es decir una energía eléctrica mejor conocida como corriente inducida, a este fenómeno de generación de corriente a partir de un campo magnético se le conoce como electromagnetismo.

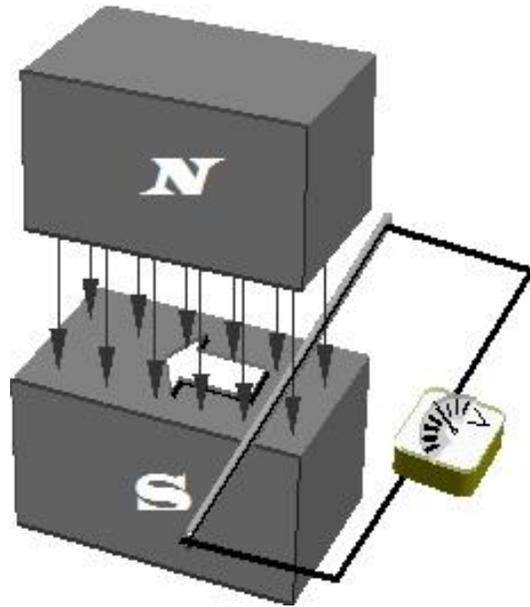


Figura 10 – Cuerpo conductor expuesto a un campo magnético variable, Autor Bela Nemeth

2.5. Motor

Un motor es un dispositivo capaz de transformar algún tipo de energía (eléctrica, fósil, etc.) en energía mecánica capaz de realizar un trabajo.

Es una máquina según sea la constitución del motor: núcleo con cable arrollado, sin cable arrollado, monofásico, trifásico, con imanes permanentes o sin ellos, busca generar movimiento.

Los motores más usados en la actualidad por precio y sencillez son los motores eléctricos, pero cuando se desea tener una potencia muy alta se usan motores de combustión interna.

En los motores eléctricos la potencia que genere el motor depende del calibre del alambre, las vueltas del alambre y la tensión eléctrica aplicada, en la Figura 11

podemos apreciar un motor de paso el cual está compuesto por una serie de bobinados, los cuales al polarizarse hacen mover el eje del motor.

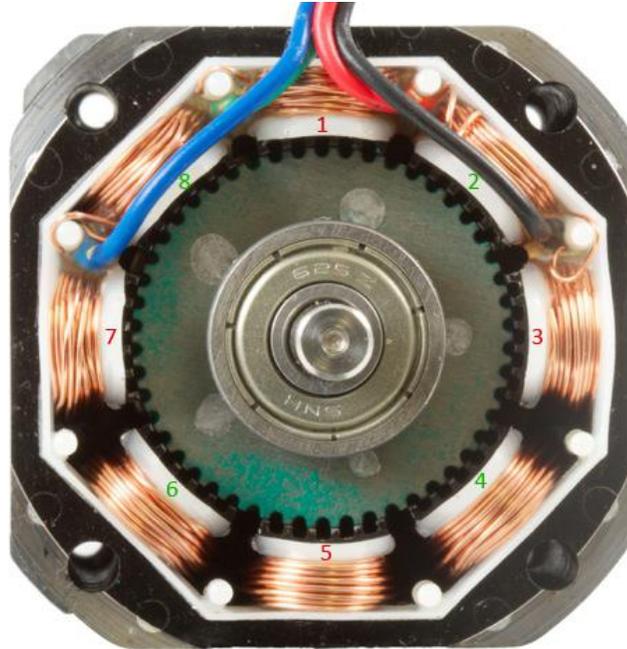


Figura 11 - Bobinado de un motor de paso, fuente Phidgets

El motor es el elemento que usaremos para producir movimiento en el eje del generador y que este pueda producir energía, en la industria es muy común usar este esquema de conexión ya que existen grandes variedades de motores y resulta muy sencillo acomplarlo al eje de un generador para que este genere energía, la ventaja de los generadores es que puede generar diversos niveles de voltaje en función del movimiento aplicado en su eje, es decir se puede crear una fuente de energía (variable y regulable) alimentada por un motor conectado a la corriente alterna.

El motor es una máquina eléctrica rotatoria dentro de la clasificación de las máquinas eléctricas como se puede apreciar en la Figura 12.

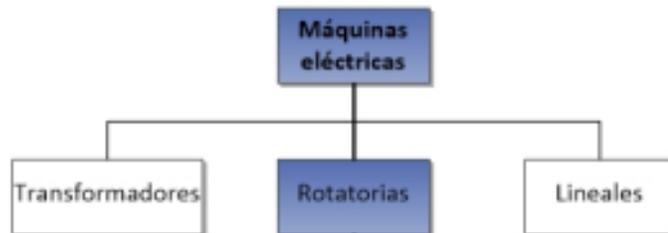


Figura 12 - Clasificación de las máquinas eléctricas, fuente Control de velocidad de un motor sin escobillas de CD, autor Ing. Luis Godoy Rodríguez

Las máquinas eléctricas rotatorias se clasifican en motores de corriente alterna (CA) y de corriente directa (CD) como se puede apreciar en la Figura 13, la principal diferencia está en el tipo de energía eléctrica que usan y en el como se genera el torque.

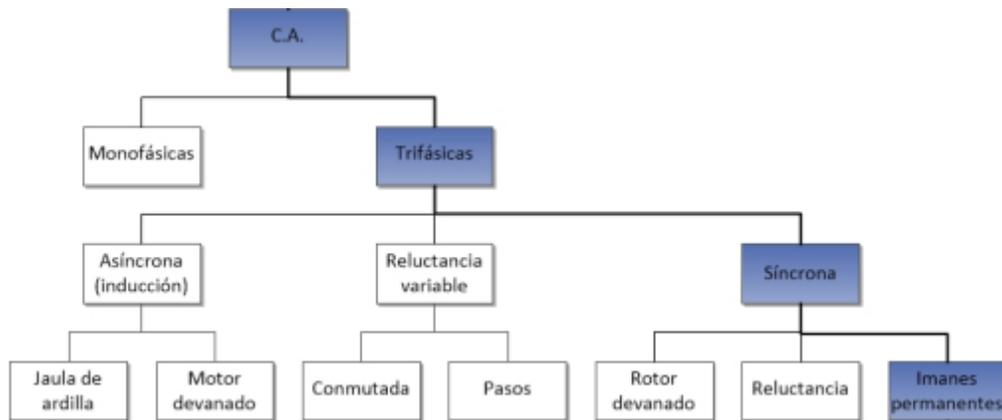


Figura 13 - Clasificación de los motores de corriente alterna, fuente Control de velocidad de un motor sin escobillas de CD, autor Ing. Luis Godoy Rodríguez

2.5.1. Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua aparecieron antes que los motores de corriente alterna, ya que anteriormente la energía se llevaba a los hogares en forma de corriente directa.

El motor de corriente directa se compone principalmente de dos partes, una es el estator el cual contiene los polos de la máquina y da soporte mecánico al motor y la otra es el rotor el cual gira al ritmo del campo magnético generado por el estator.

2.5.2. Motores de corriente alterna

Los motores de corriente alterna se clasifican en dos grandes grupos de acuerdo a la cantidad de líneas que lo alimentan, tenemos:

- Motores monofásicos
- Motores trifásicos

Estos dos tipos de motores se diferencian por la cantidad de potencia que pueden generar, los motores trifásicos gracias a que usan 3 diferentes bobinados pueden producir mucha más potencia que los motores monofásicos, pero de la misma forma se necesita una fuente de alimentación que pueda entregar potencia a cada una de las bobinas que necesita el motor para su funcionamiento.

2.5.3. Motores monofásicos

Se trata de motores que usualmente son de tamaño reducido y con un par de potencia relativamente pequeño, estos motores funcionan con una sola fase, de allí el nombre de monofásicos.

Estos motores son sencillos y fáciles de reparar por lo que son usados principalmente en hogares, oficinas, tiendas y empresas pequeñas esto principalmente a su bajo precio.

Son principalmente usados en electrodomésticos, refrigeración comercial y doméstica, taladros y sistemas de apertura de puertas para parkings.

2.5.4. Motores trifásicos

Los motores trifásicos tienen 3 bobinados que funcionan de forma independiente, cada uno de estos funciona en una fase diferente, estos bobinados cuentan con dos

terminales para su polarización, es decir un motor trifásico cuenta con 6 puntos de conexión los cuales pueden ser conectados en dos esquemas de conexión como lo son:

- Conexión en estrella
- Conexión en delta

Estos dos esquemas de conexión son la forma en que el bobinado interno del motor se van a unir e interactuar, cada una de estas conexiones tiene sus ventajas y desventajas, pero principalmente se usa la conexión en estrella para motores que requieren baja corriente de arranque, mientras que la conexión en delta es usada cuando se necesita un alto torque en el arranque del motor.

2.5.5. Conexión en estrella

En la conexión en estrella el voltaje de la línea (V_l) es igual a el voltaje de la fase (V_f) por la raíz cuadrada de 3, es decir en el voltaje de cada línea del motor tendremos un voltaje menor a la fase a la que se conecte, pero la corriente de cada línea es igual a la corriente de la fase.

En la Figura 14 podemos apreciar como se realiza el esquema de conexión de estrella de un motor.

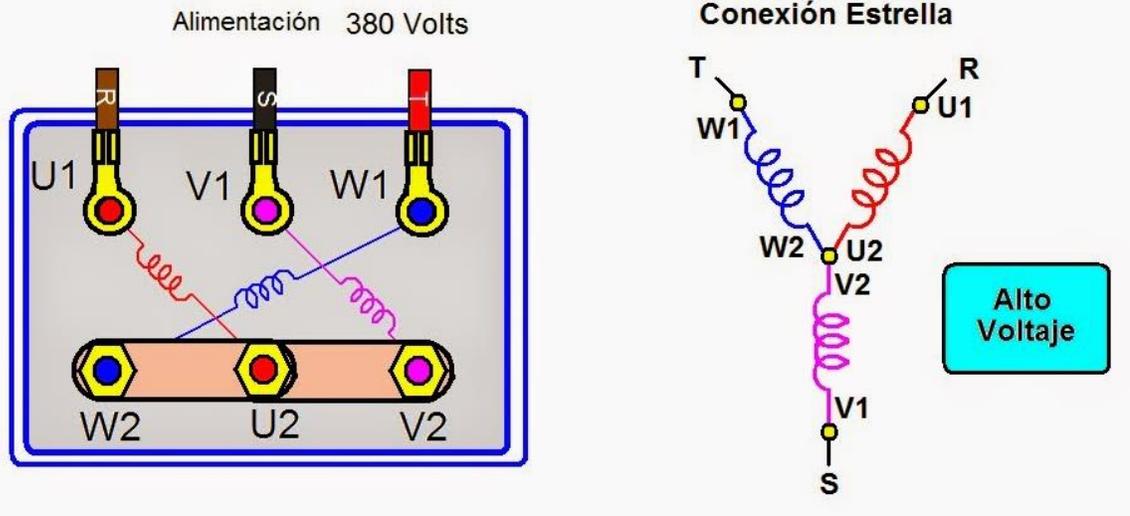


Figura 14 - Conexión en estrella de un motor, fuente coparoman
<https://coparoman.blogspot.com/2014/09/motores-electricos-trifasicos-de-6.html>

2.5.6. Conexión en delta

En la conexión en delta el voltaje de la línea (V_l) es igual a el voltaje de la fase (V_f), es decir en el voltaje de cada línea del motor tendríamos el mismo voltaje de la fase a la que se conecte, pero la corriente de cada línea es igual a la corriente de la fase por la raíz cuadrada de 3, es decir tenemos menos corriente circulando por el bobinado del motor.

En la Figura 15 podemos apreciar como se realiza el esquema de conexión en delta de un motor.

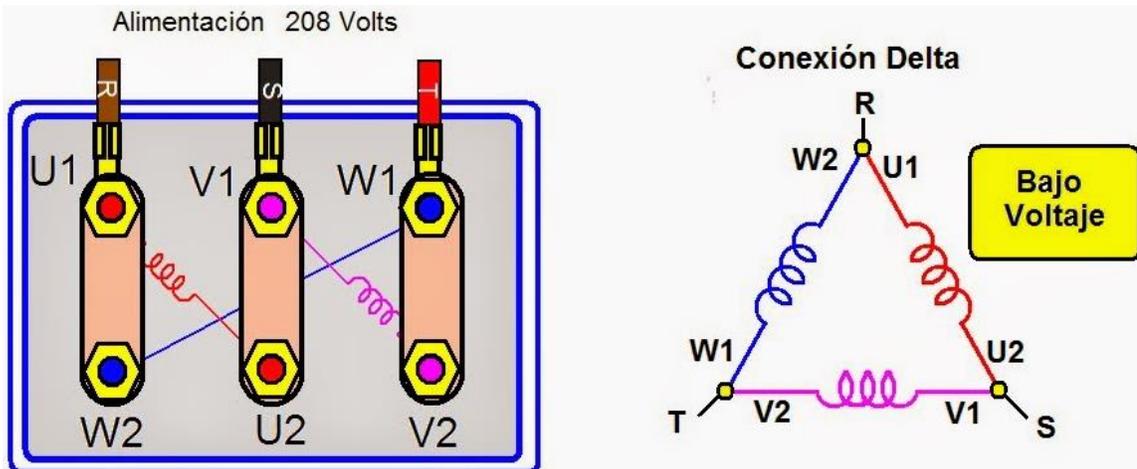


Figura 15 - Conexión en delta de un motor, fuente coparoman
<https://coparoman.blogspot.com/2014/09/motores-electricos-trifasicos-de-6.html>

En la Figura 16 podemos apreciar las partes de un motor de corriente alterna y sus esquemas de conexión.

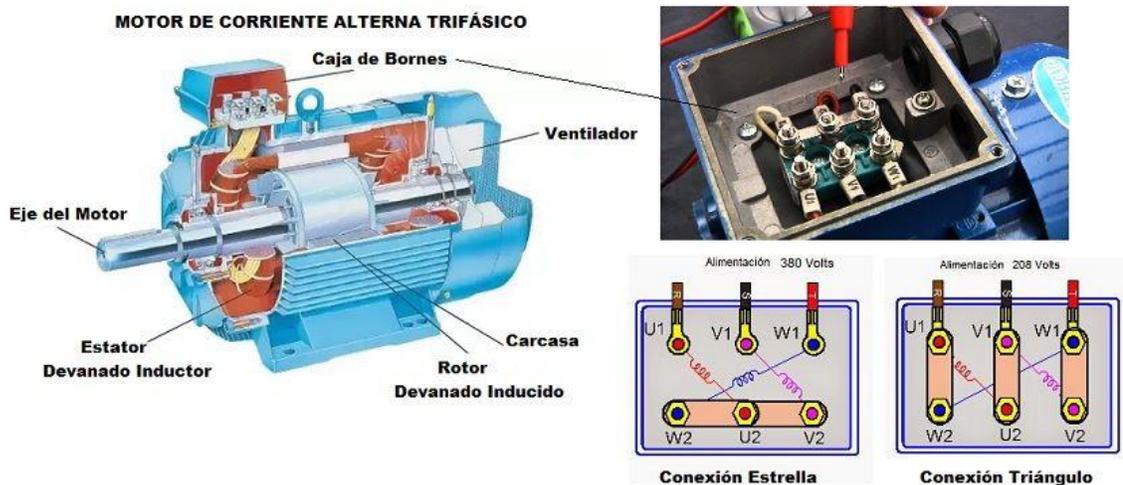


Figura 16 - Esquema de conexión de un motor trifásico

Estos motores trifásicos son ampliamente usados en la industria debido a la cantidad de potencia que pueden generar mientras que los motores monofásicos suelen tener un uso más doméstico como por ejemplo: las aspiradoras, bombas de agua, etc.

Para poder controlar la potencia que generará el generador de voltaje se debe poder controlar la velocidad de giro del motor, existen multiples formas de controlar la velocidad de giro de un motor AC.

2.6. HP

Unidad de medida de la potencia eléctrica real, su nombre proviene del inglés Horse Power o en español Caballos de fuerza.

Esta es una medida de potencia no de fuerza, aunque su traducción en español diga lo contrario, en 1782 James Watt comenzó a comparar la potencia de las máquinas de vapor de las épocas con la potencia generada por los caballos de tiro, debido a esto hasta la actualidad se usa esta unidad para medir la potencia generado por un motor.

James Watt estimó mediante experimentos que un caballo podía levantar 330 libras-fuerza a una altura de 100 pies en un minuto como se puede apreciar en la Figura 17.

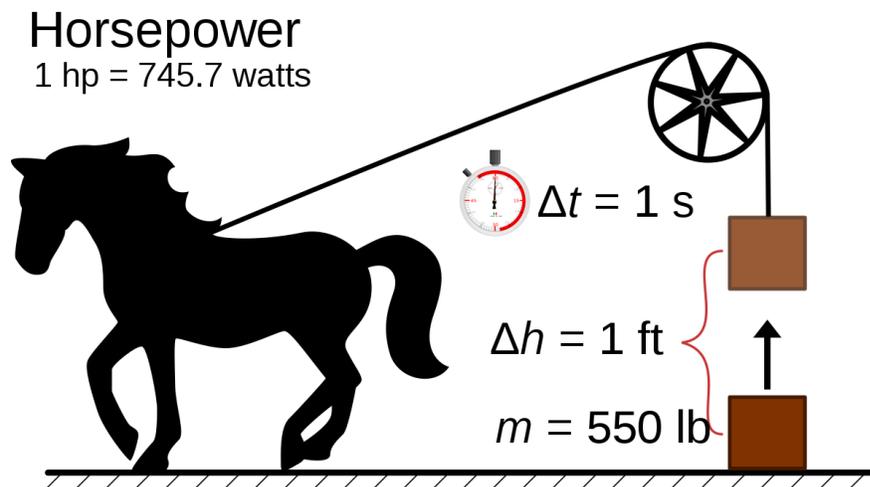


Figura 17 - Ejemplo gráfico de la unidad de medida caballos de fuerza

Si podemos esto en la fórmula de la potencia que es:

$$Potencia = \frac{trabajo}{tiempo} = \frac{fuerza \times distancia}{tiempo}$$

Se puede concluir que un caballo de fuerza es equivalente a 330000 libras pie por minuto o lo que es lo mismo 550 libras pie por segundo.

No se debe confundir esta unidad con la unidad caballos vapor, ya que son dos unidades que tiene un valor similar, pero no son exactamente iguales.

2.7. Watt

Los Watts o Vatios en español son una unidad de medida de la potencia eléctrica real, su nombre es en honor al físico inglés, James Watt.

El Watt se usa para medir la potencia en general, sea esta eléctrica, mecánica, etc.

El Watt se expresa en Newtons metro por segundo como se puede apreciar en la Figura 18, es decir la cantidad de fuerza Newtons que es necesaria para acelerar una masa de 1Kg a 1m/s²

$$W = \frac{J}{s} = \frac{N \cdot m}{s} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$$

Figura 18 - Equivalencias de los Newtons

2.8. Frecuencia

Frecuencia es la medida del número de veces que se repite un fenómeno por unidad de tiempo, la frecuencia se mide en Hertzios (Hz).

En la Figura 19 podemos apreciar como todas las ondas tienen un pico máximo y mínimo en el eje de las “y” y este pico se repite cada cierto tiempo en el eje de las “x” donde “x” son unidades de tiempo, si contáramos la cantidad de picos que tenemos en una determinada distancia “x”, es decir en un determinado tiempo estaríamos midiendo la frecuencia de la onda.

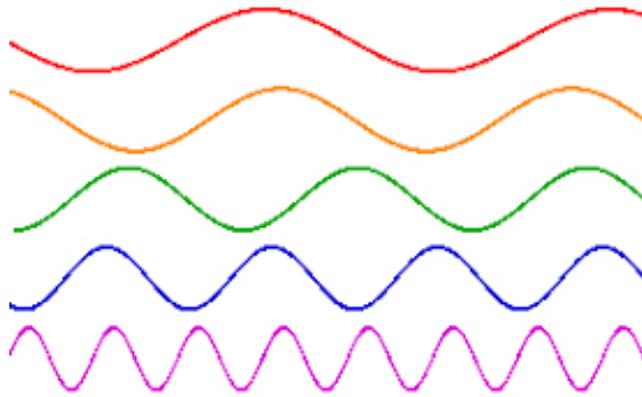


Figura 19 - Ondas oscilando a diferentes frecuencias

2.9. Hertzios

El nombre Hertzios fue usado para medir la frecuencia a partir del año 1930 gracias a que lo estableció la Comisión Electrotécnica Internacional esto en honor al físico alemán, Heinrich Rudolf Hertz a quien se puede apreciar la Figura 20.



Figura 20 - Heinrich Hertz, fuente Wikipedia

2.10. Voltaje

El voltaje físicamente significa el trabajo necesario para desplazar una carga eléctrica, su unidad de medida es el Voltio, esta unidad se usa para medir la tensión eléctrica.

Esta unidad recibe su nombre en honor al físico y químico Alessandro Volta el cual en 1800 inventó la pila voltaica.

En la Tabla 1 podemos apreciar valores comunes medidos en voltios.

Tabla 1 - Valores comunes medidos en voltios

Aparato	Valor
Potencial de acción de una neurona	cerca de 75 mV
Batería de célula simple	1,2 V
Batería de mercurio	1,355 V
Batería alcalina no recargable	1,5 V
Batería recargable de litio	3,75 V
Transistor de tecnología TTL	5 V
Batería PP3	9 V
Sistema eléctrico de un automóvil	12 V (en algunos casos: 16 V y 24 V)
Líneas de corriente de trenes de alto voltaje	Aproximadamente 25 kV
Red de transporte de energía eléctrica de alto voltaje	110 kV o más
Rayo	100 MV

2.11. Corriente

La corriente es la circulación de cargas o electrones a través de un circuito eléctrico cerrado como se puede apreciar en la Figura 21, estas cargas se mueven siempre del polo negativo al polo positivo de la fuente de energía.

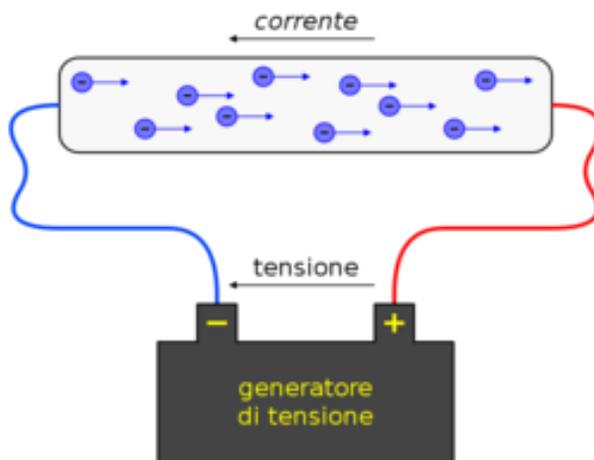


Figura 21 - Movimiento de los electrones

2.12. Amperios

El amperio es una unidad de intensidad eléctrica y lleva su nombre en honor al físico francés André-Marie Ampère a quien podemos apreciar en la Figura 22.



Figura 22 - André-Marie Ampère, fuente TheFamousPeople (<https://www.thefamouspeople.com/profiles/andre-marie-ampere-535.php>)

En 1948 se dio una nueva definición al amperio durante la novena Conferencia General de Pesas y Medidas, la definición fue:

Un amperio es la corriente constante que, mantenida en dos conductores rectos paralelos de longitud infinita, de sección circular despreciable, y colocados a un metro de distancia en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud.

2.13. Automatización industrial

La automatización industrial es el uso de sistemas electromecánicos computarizados para lograr que ciertas tareas se realicen de forma automática.

La automatización industrial es la disciplina más amplia que un simple sistema de control, ya que esta abarca desde la instrumentación industrial, sistemas de control y recolección de datos y aplicativos de software para la gestión de los mismos.

En la Figura 23 se puede apreciar un panel de control industrial mediante el cual se define los parámetros de una planta industrial.



Figura 23 - Planta industrial automatizada

2.14. Controladores industriales

Un sistema de control industrial es un término que engloba los sistemas de control e instrumentos de medición que conforma una planta automática.

Estos sistemas se forman principalmente por un controlador programable que en las industrias usualmente es un PLC, una serie de sensores y actuadores los cuales permiten adquirir datos del mundo real y realizar acciones sobre el mismo y finalmente disponen de un sistema de monitoreo para poder controlar el estado de la planta.

En la Figura 24 podemos apreciar un panel de control basado en PLC.



Figura 24 - Panel de control de una planta

2.15. PLC

Un PLC es un Programming Logic Controller o en español Programador Lógico Controlable, el PLC es un dispositivo programable altamente utilizado en la automatización industrial debido a su robustez y estandarización dentro de la industria.

Los PLC a diferencia de otros dispositivos programables están diseñados para poder manipular diversas entradas y salidas en condiciones no favorables como por ejemplo altas temperaturas, ubicaciones con alta exposición al ruido eléctrico, vibración e impacto, todos estos factores externos afectan negativamente a otros dispositivos, pero los PLC están diseñados para funcionar en estos entornos, de allí que sean tan ampliamente usados en la industrial.

Los primeros PLC fueron diseñados para reemplazar a los clásicos sistemas de relays lógicos, esto permitió que para modificar una parte de un proceso de

automatización no sea necesario volver a cablear más relays, sino que simplemente con cambiar el programa dentro del PLC este podría realizar nuevas tareas.

En la Figura 25 podemos apreciar un PLC S1200 de la marca Siemens, este es un PLC ampliamente usado en la industria.



Figura 25 - PLC S1200

2.16. Ladder

Los PLC al ser programables reciben instrucciones las cuales determinan su funcionamiento y ejecución, pero para esto existen una serie de instrucciones previamente definidas que el PLC puede realizar y el uso de estas instrucciones en secuencia forman el programa que ejecutará el PLC.

Existen muchos lenguajes de programación para PLC siendo el lenguaje Ladder el más usado debido a su gran similitud con los diagramas de conexión de relays, permitiendo esto que los ingenieros que realizaban las automatizaciones mediante los

antiguos sistemas de relays puedan tener un punto de base sólido para la programación de estos PLC.

En la Figura 26 podemos apreciar al lado derecho de la imagen un ejemplo de un programa en Ladder, podemos notar como las entradas simulan un relay final de carrera el cual abre o cierra un circuito, mientras que las salidas simulan un actuado al final de cada línea.

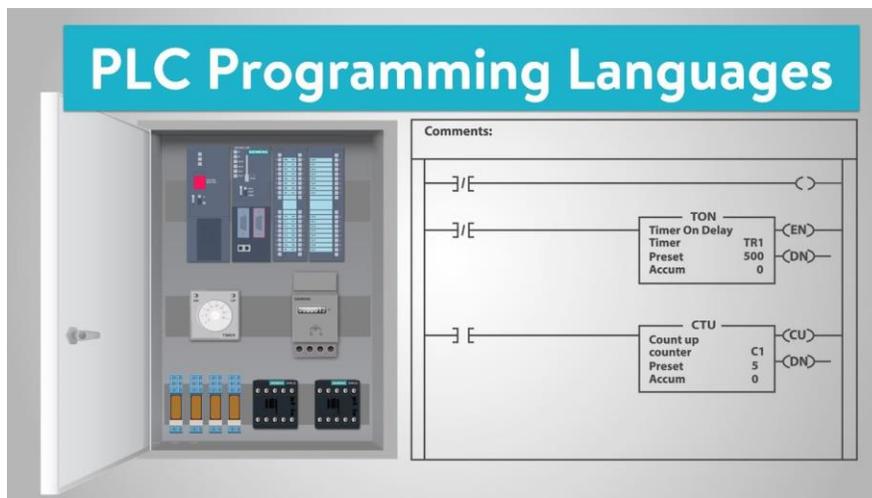


Figura 26 - Ejemplo de lenguaje de programación Ladder

2.17. Labview

National Instruments define a LabVIEW en su sitio web como "LabVIEW es un software de ingeniería de sistemas que requiere pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware e información de datos".

LabVIEW es un software el cual permite crear programas orientados a la automatización y el control, si bien con cualquier software de uso general se puede crear programas de automatización y control LabVIEW gracias al respaldo de National Instruments ha desarrollado módulos de hardware y software especialmente diseñado

para estos fines, lo que dota a LabVIEW de una base sólida para tareas de automatización e ingeniería.

LabVIEW usa un lenguaje de programación orientado a flujos, es decir no programa instrucción por instrucción una debajo de la otra, sino que se usan bloques que se unen entre si mediante flujos tal como se puede apreciar en la Figura 27.

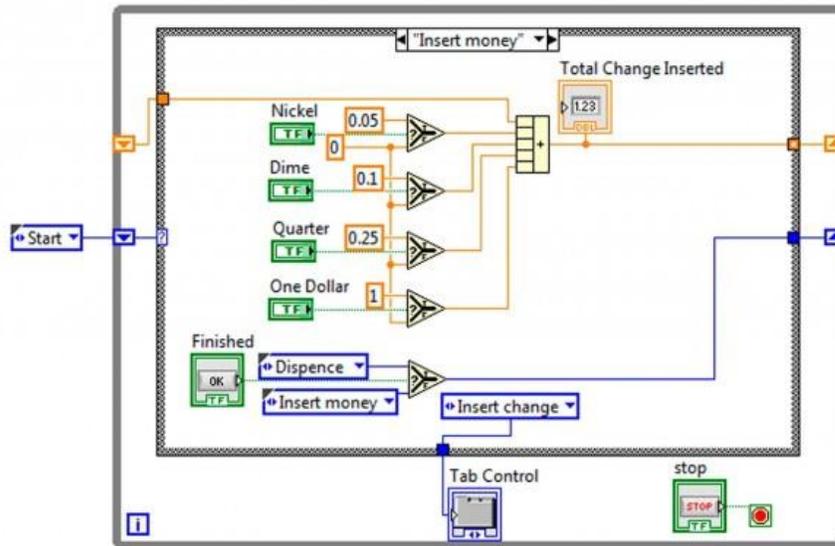


Figura 27 - Flujo de automatización en LabVIEW

El logo de LabVIEW lo podemos apreciar en la Figura 28.



Figura 28 - Logo de LabVIEW

2.18. Diagramas de flujo

Un diagrama de flujo es la representación de un proceso o algoritmo mediante una serie de pasos los cuales se ejecutan en forma secuencial siguiendo las líneas que los unen como se puede apreciar en la Figura 29.

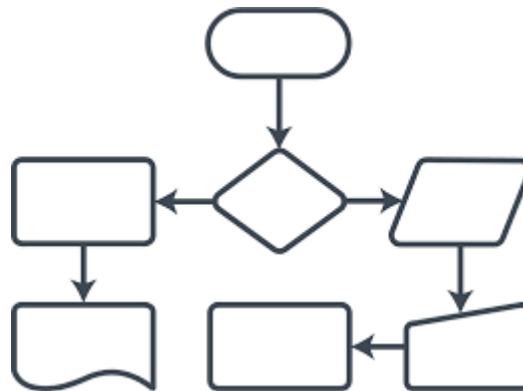


Figura 29 - Diagrama de flujos

Los diagramas de flujo son ampliamente usados para describir procesos y acciones que se deben realizar con la finalidad de que sean fáciles de seguir y de entender.

2.19. Sistemas de control

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos los cuales mediante una entrada de datos usualmente obtenidas de sensores controlan las acciones que realiza el sistema mediante una serie de actuadores, en la Figura 30 podemos apreciar de forma general la estructura de un sistema de control.

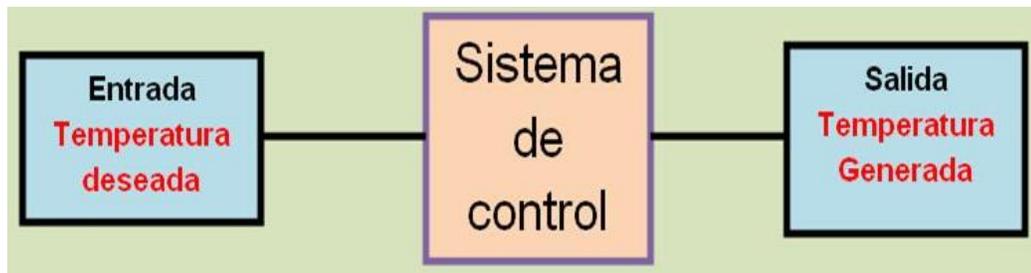


Figura 30 - Esquema básico de un sistema de control

2.20. Control en lazo abierto

Se conoce como sistema de control en lazo abierto al sistema de control el cual manda una señal hacia un actuador, y no supervisa el resultado de esta señal, es decir el sistema no puede estar seguro del resultado de la acción ya que no se dispone de un mecanismo de retroalimentación para leer los datos generados por el actuador.

En la Figura 31 podemos apreciar el diagrama de bloques de un controlador en lazo abierto, se puede apreciar que la salida del sistema nunca es usada como entrada para el sistema, es decir, no existe esa confirmación de las acciones emprendidas por el actuador.

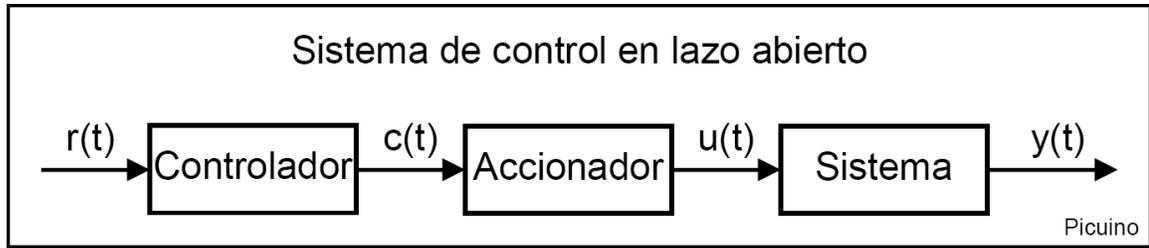


Figura 31 - Sistema de control en lazo abierto

2.21. Control en lazo cerrado

El sistema de control en lazo cerrado a diferencia del sistema de control en lazo abierto si dispone de un mecanismo de retroalimentación el cual permite al sistema poder comprobar el resultado de las acciones emprendidas.

En la Figura 32 podemos apreciar en el diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado como la salida del sistema es recogida mediante un sensor y enviada nuevamente al sistema para que este tenga influencia en la nueva acción tomada por el controlador.

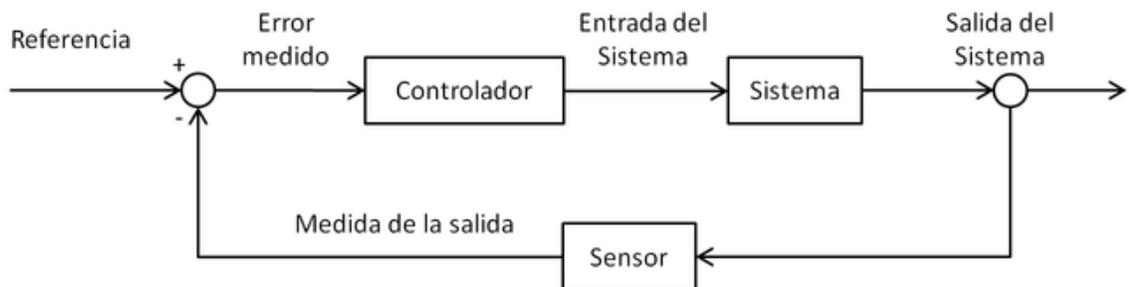


Figura 32 - Sistema de control en lazo cerrado

2.22. PID

El PID es el sistema de control en lazo cerrado más usado dentro de la industria gracias a su robustez y fiabilidad, así como a su facilidad de uso.

El PID es un controlador Proporcional, Integral y Derivativo como se puede apreciar en la Figura 33, es decir el controlador da una respuesta a diferentes tipos de variaciones de la señal medida.

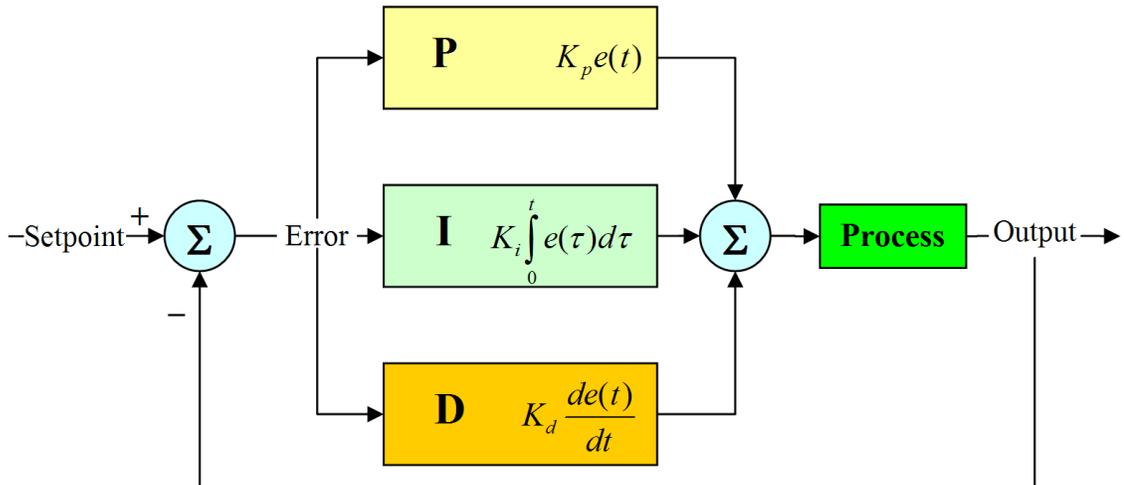


Figura 33 - Estructura del controlador PID

La porción proporcional del controlador responde en función a la cantidad de error, es decir cuando la señal medida tiene poca desviación el proporcional es bajo y cuando la desviación de la señal medida es alta el proporcional emite una señal más grande.

La porción integral es la responsable de corregir el error acumulado, es decir cuando hay un error, pero este es muy pequeño el proporcional da una salida muy pequeña, la cual posiblemente no sea lo suficientemente buena para corregir el error, pero el integral es capaz de acumular este error y mientras más grande sea más fuerte es su señal, eso hace que se reduzcan los pequeños errores que el proporcional no es capaz de corregir.

La porción del derivativo es el responsable de corregir los errores repentinos o espontáneos, es decir cuando se produce una desviación de forma repentina el

proporcional e integral no son capaces de reaccionar con la velocidad necesaria para corregirlo, pero el derivativo responde en función de la velocidad con la que ocurre un evento, es por eso que este es capaz de corregir estos errores.

En la Figura 34 podemos apreciar cómo responde el control derivativo en función de la velocidad con la que ocurre un cambio, se puede apreciar como la respuesta de la integral se acumula de forma continua y la respuesta del proporcional es siempre equivalente a la variación en la variación.

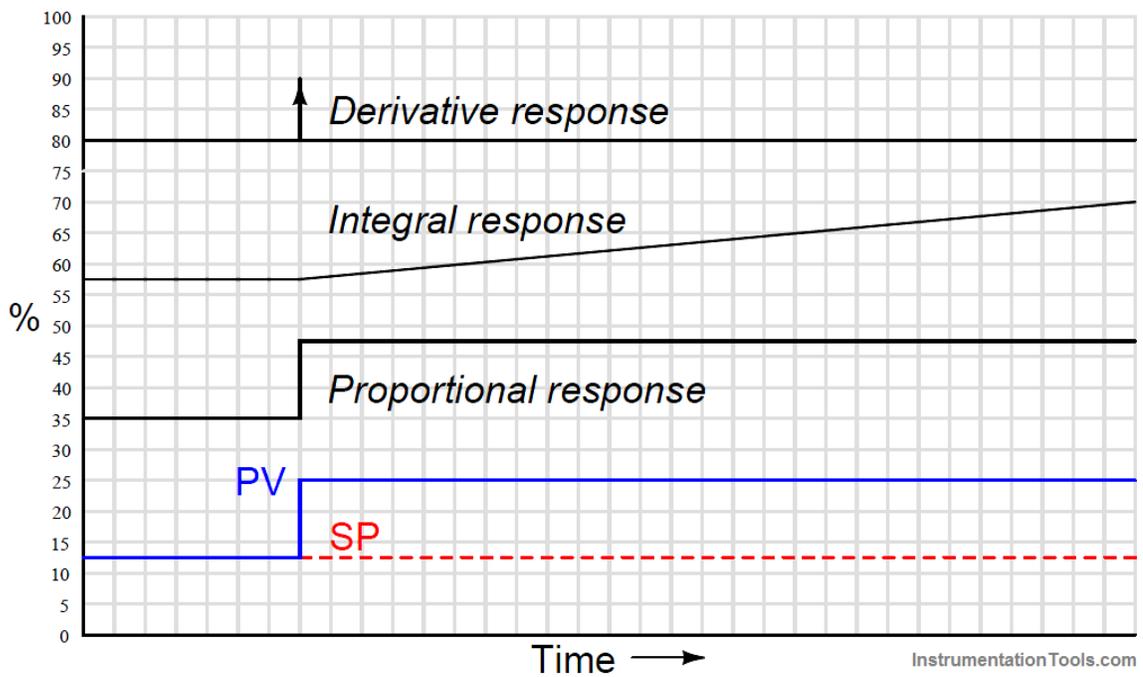


Figura 34 - Respuesta de un controlador PID

2.23. Variador de frecuencia

El variador de frecuencia es un dispositivo capaz de generar señales a una frecuencia determinada.

En la Figura 35 se pueden apreciar 3 señales sinusoidales las cuales tienen la misma amplitud y fase, solo se diferencian porque cada una tiene una frecuencia superior a la anterior.

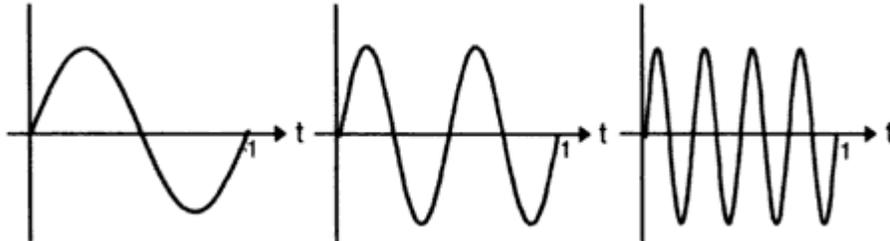


Figura 35 - Varias señales sinusoidales a diferentes frecuencias

El variador de frecuencias es altamente usado en la automatización industrial ya que muchos motores cambian su velocidad en función de la frecuencia que se les aplique.

En la Figura 36 se puede observar un variador de frecuencia.



Figura 36 - Variador de frecuencia

2.24. Voltímetro

El voltímetro es un dispositivo usado para medir la cantidad de voltaje que existen entre dos terminales.

En la Figura 37 podemos apreciar un multímetro digital el cual nos permite medir una serie de valores eléctricos entre ellos el voltaje.



Figura 37 - Multímetro digital

2.25. Amperímetro

Un amperímetro es un dispositivo el cual nos permite medir la cantidad de amperios que circula a través de un cable, existen 2 principales tipos de amperímetros, los alámbricos e inalámbricos.

Los alámbricos necesitan conectarse a la red eléctrica, para que los electrones circulen por su interior y así poder medir la corriente, pero también los hay inalámbricos

los cuales son como un anillo el cual se lo ubica alrededor del cable y este es capaz de medir la corriente sin la necesidad de tocar el cable.

En la Figura 38 podemos apreciar un amperímetro inalámbrico.



Figura 38 - Amperímetro inalámbrico.

3. MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se exponen los aspectos metodológicos relacionados con el desarrollo del proyecto de titulación, así como la propuesta de solución que se plantea para los problemas descritos anteriormente.

3.1. Metodología de la investigación

Para el desarrollo e implementación del presente proyecto de titulación se utilizaron diferentes metodologías las cuales se detallan a continuación.

3.1.1. Método de análisis y síntesis

El método de análisis y síntesis se base en el análisis de un todo complejo mediante la división de ese todo complejo en multiples partes más pequeñas y fáciles de analizar, es decir separar una tarea grande en varias tareas más pequeñas y sencillas.

Una vez se hayan analizado y entendido las tareas pequeñas se podrá tener una mejor visión de la tarea grande de la cual provienen, esto hace que el proceso de analizar y entender algo se vuelva más sencillo y medible al tener pequeñas partes o entregables los cuales se resuelven uno por uno.

3.1.2. Método científico

El método científico es una sucesión de pasos para resolver un problema los cuales se basan en dos principales pilares como lo son la reproductibilidad y refuctabilidad.

La reproductibilidad consiste en que un experimento pueda volverse a ejecutar en cualquier lugar y momento bajo las condiciones citadas en el experimento, es decir permite que se pueda ejecutar el mismo experimento las veces que sea necesario, esto lleva al segundo pilar.

La reproductibilidad consiste en poder comprobar o refutar los resultados de un experimento, es decir que al repetir un experimento bajo las mismas condiciones mencionadas se pueda corroborar que los resultados fueron los esperados o por lo contrario si los resultados fueron diferentes a los que se esperaba.

Los principales pasos del método científico son:

- Recolección de información
- Generación de hipótesis
- Pruebas
- Análisis de los resultados

3.1.3. Método experimental

El método experimental se deriva del método científico ya que para poder refutar los resultados de un experimento es necesario repetirlo.

El método experimental consiste en la realización de pruebas sobre una hipótesis para poder verificarla o desmentirla mediante los resultados de la experimentación.

3.2. Técnicas de investigación

Las técnicas de investigación son procedimientos usados para la implementación de los métodos de investigación anteriormente mencionados.

El punto de partida principal de cualquier investigación es tener la información suficiente para saber donde nos encontramos y hacia donde debemos partir, para esto es necesario una técnica de recolección de información.

3.2.1. La observación

La observación es la técnica de adquisición de datos más antigua y usada que existe, esta nos permite analizar fenómenos y obtener información de los mismos.

Esta técnica se complementa con una mejor obtención de los datos al no realizar una simple observación sino disponer de sofisticados y precisos instrumentos de medición para obtener datos más fiables y seguros.

3.3. Población y muestra

Debido a las características del presente proyecto de titulación no es necesaria una población, ni una muestra, debido a que no es necesario el análisis de datos, en su lugar se busca plantear una solución a una determinada problemática.

3.4. Recolección de información

Para el presente proyecto de titulación se recopiló información de libros y artículos científicos, así como de proyectos investigativos relacionados, todos estos se pueden encontrar en la sección PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN VINCULADOS y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

3.5. Propuesta de solución

Para la problemática planteada en el presente proyecto de titulación se ha escogido usar un PLC S7 1200 para la adquisición de datos (voltaje medido) del generador DC, se uso este PLC debido a su extenso catálogo de funciones que soporta (Contadores, Timers, PIDs, etc).

El PLC controlará el voltaje del generador mediante un controlador PID para buscar que la señal de voltaje siempre se encuentre estable en el voltaje de set point (punto

deseado) y a su vez mediante un variador de frecuencia controlará un motor el cual generará el movimiento que hará funcionar al generador DC con una arquitectura como la que se puede apreciar en la Figura 39.

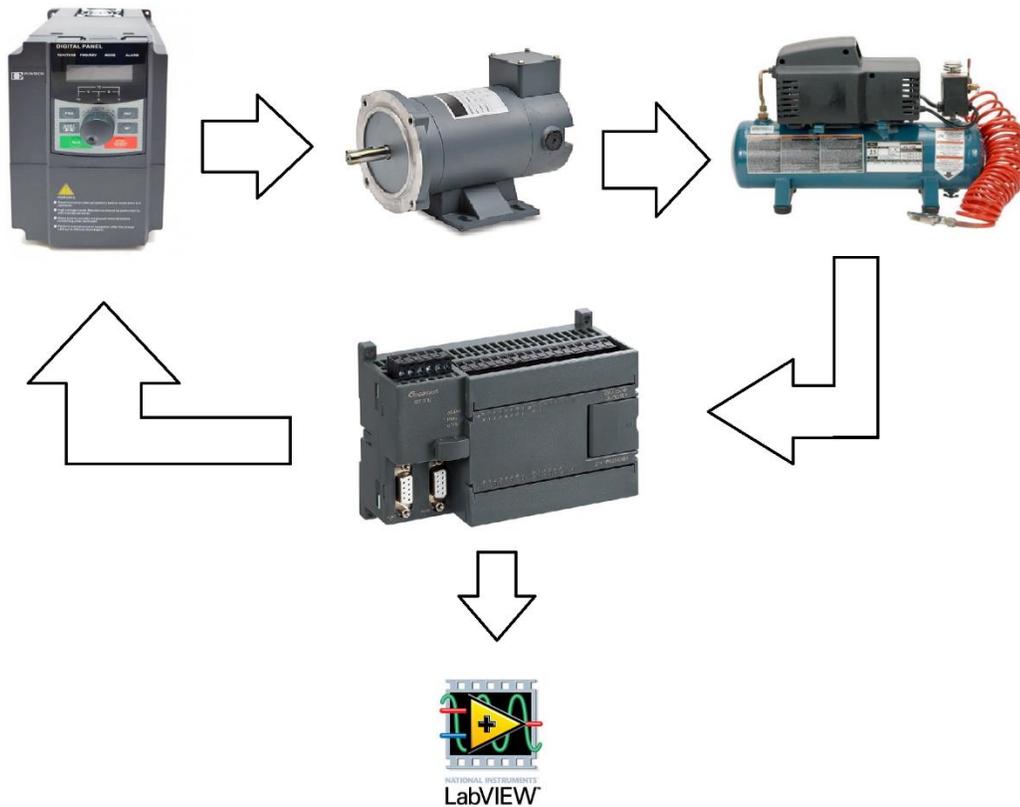


Figura 39 - Arquitectura de la solución

3.5.1. Generador

Los generadores tienen el funcionamiento inverso al de los motores de inducción ya que en lugar de recibir energía eléctrica para generar movimiento, estos reciben movimiento para generar energía eléctrica.

Estos generadores usan el mismo principio electromagnético que los motores es decir mediante un cable conductor cargado de energía un electroimán fijo lo excita

obligando a que este busque repeler los polos iguales y acercarse al polo opuesto como se puede apreciar en la Figura 40.

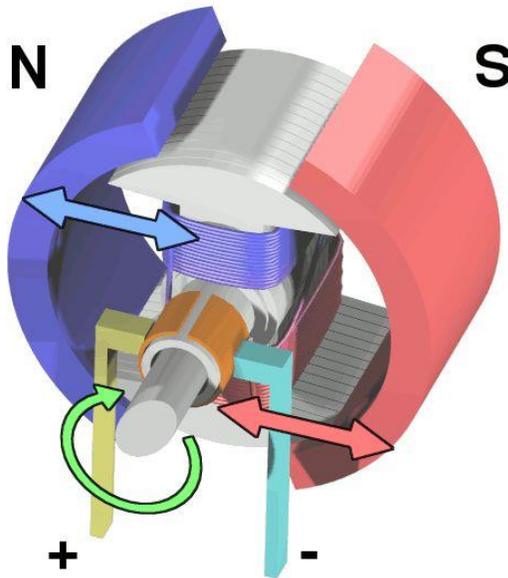


Figura 40 - Componentes internos de un motor

Este principio del electromagnetismo es el que convierte energía eléctrica en movimiento, pero si realizamos el proceso de forma inversa moviendo nosotros el eje del motor notamos que se produce energía eléctrica, ya que al mover el conductor cargado dentro del campo magnético generado por los imanes este altera el campo magnético y un campo magnético variable genera un campo eléctrico constante como se puede apreciar en la Figura 41.

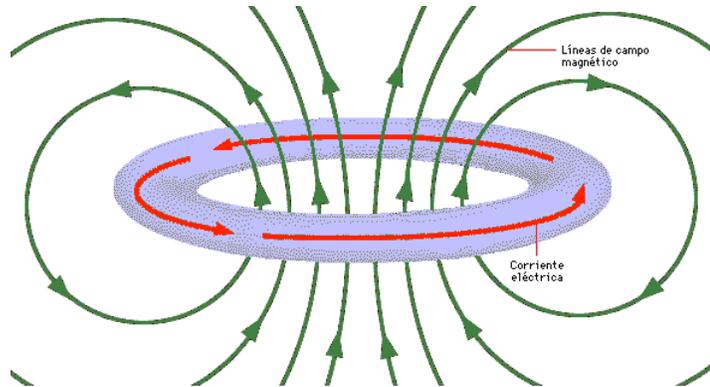


Figura 41 - Campo eléctrico producido por un campo magnético

Para simplificar, mover un conductor cargado entre dos imágenes producirá energía eléctrica y si se energiza un conductor fijo entre dos imágenes este procederá a moverse.

El generador Hampden de modelo DYN-400 cuya palca la podemos apreciar en la Figura 42 es un dispositivo el cual genera un voltaje eléctrico a partir de un movimiento mecánico en su eje.



Figura 42 - Placa de datos del generador DC

El eje del generador puede ser acomplado a el eje de una turbina heólica como la de la Figura 43 y producir energía electrica a partir del aire, pero para nuestro caso las condiciones del aire no son las adecuadas, ya que al depender del movimeinto del eje para generar voltaje la ausencia de viento ocasiona una ausencia de movimiento en el eje, además de que no podemos controlar la velocidad del viento para controlar el voltaje generado.



Figura 43 - Vista aérea de una turbina eólica

De forma similar a lo planteado con la energía eólica se podría tomar cualquier otra fuente de energía de la naturaleza como lo es el caudal de los ríos para producir movimiento, pero nuevamente no tenemos control sobre la cantida de energía producida, por esto resulta indispensable el uso de un motor para asi mover el eje del generador.

El motor que será el encargado de mover el eje del generador deberá ser controlable de alguna forma para regular la cantidad de vueltas y por ende regular el voltaje que generará el generador.

3.5.2. Variador de frecuencia

El variador de frecuencia es un dispositivo el cual es capaz de generar una señal de una frecuencia constante, la energía de la red eléctrica pasa por el variador de frecuencia y este regula la energía y la frecuencia antes de que esta llegue al motor, permitiendo así controlar su velocidad de giro y reduciendo el consumo eléctrico del motor ya que si este gira a la mitad de la velocidad, el consumo de energía será mucho menor, pero de la misma forma el torque que podrá generar será menor.

En la Figura 44 podemos apreciar la placa del variador de frecuencia modelo MICROMASTER 420 de la marca SIEMENS.

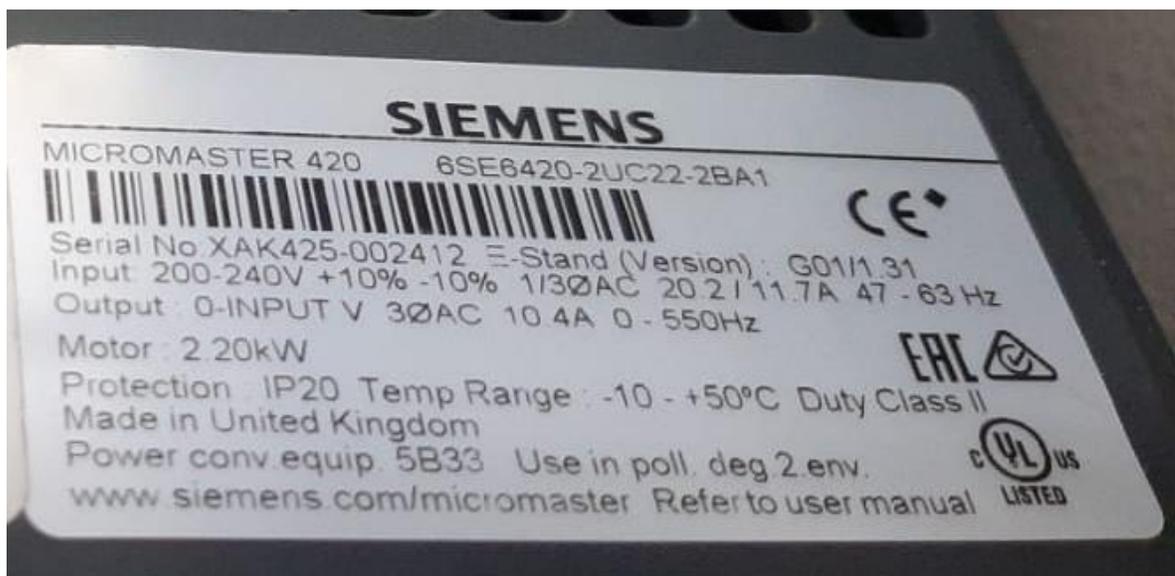


Figura 44 – Placa del variador de frecuencia

Este variador de frecuencia puede entregar 4 kilo wattios de energía a 5 caballos de fuerza, tiene un empaque con certificación IP20.

La certificación IP (Ingress Protection o protección contra el ingreso) significa que el dispositivo tiene un determinado nivel de resistencia a la entra de polvo y líquidos, el nivel de resistencia viene dado por los dígitos que acompañan a la palabra IP.

Esta certificación fue creada por la Comisión Electrónica Internacional (IEC de sus siglas en inglés), esta certificación usa como estatuto oficial la norma IEC 60529.

Como se puede apreciar en la Figura 45 el primer número equivale a la protección contra líquidos y el segundo a la protección contra el ingreso de objetos extraños.



Figura 45 - Valore de la certificación IP

Los valores de protección contra entrada de polvo los podemos apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2 - Clasificación contra el polvo de acuerdo a la certificación IP

Certificación	Descripción
IP0X	Ninguna protección
IP1X	Dispositivos protegidos contra cuerpos sólidos de dimensiones superiores a 50 mm
IP2X	Dispositivos protegidos contra cuerpos sólidos de dimensiones superiores a 12 mm

IP3X	Dispositivos protegidos contra cuerpos sólidos de dimensiones superiores a 2.5 mm
IP4X	Dispositivos protegidos contra cuerpos sólidos de dimensiones superiores a 1 mm

Los valores de protección contra entra de agua los podemos apreciar en la Tabla

3.

Tabla 3 - Tabla de certificación IP para líquidos

Certificación	Descripción
IPX0	Ninguna protección
IPX1	Dispositivos protegidos contra la caída vertical de gotas de agua, por 10 minutos
IPX2	Dispositivos protegidos contra la caída de gotas de agua con inclinación máxima de 15 grados, por 10 minutos
IPX3	Dispositivos protegidos contra agua nebulizada en un ángulo de hasta 60 grados, con promedio de 11 litros por minuto, por 5 minutos
IPX4	Dispositivos protegido contra chorros de agua desde cualquier ángulo, con promedio de 10 litros por minuto, por 5 minutos
IPX5	Dispositivos protegidos contra chorros de agua desde cualquier ángulo, con promedio de 12.5 litros por minuto, por 3 minutos
IPX6	Dispositivos protegidos contra chorros de agua potentes, a razón de 100 litros por minuto desde cualquier ángulo, por 3 minutos
IPX7	Dispositivos protegidos contra los efectos de la inmersión temporal, por 30 minutos hasta 1 metro y medio
IPX8	Dispositivos protegidos contra los efectos de la sumersión

En base a las tablas anteriormente expuestas podemos concluir que el dispositivo no tiene ningún tipode resistencia al agua y puede bloquear el ingreso de cuerpos de más de 12 mm.

En la Figura 46 podemos apreciar el variador de frecuencia en el panel del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana.



Figura 46 - Ubicación del variador de frecuencia

Este panel permite la conexión del variador de frecuencia con diferentes dispositivos de una forma más cómoda y didáctica facilitando así su uso.

Como se puede apreciar en la Figura 47 para la conexión del variador de frecuencia se debe usar cables de par trenzado para las señales de control y para las señales de

potencia se debe usar cable 12AWG, esto hace que las conexiones no sean cómodas, debido a esto el panel nos resulta de gran utilidad.



Figura 47 - Conexión con jumpers del variador de frecuencia

3.5.3. Motor AC

En la Figura 48 podemos apreciar la placa del motor AC de marca Hampden modelo WRM-300, este motor funciona a 60Hz y puede alcanzar las 1800RPM y generar hasta 3 caballos de fuerza.

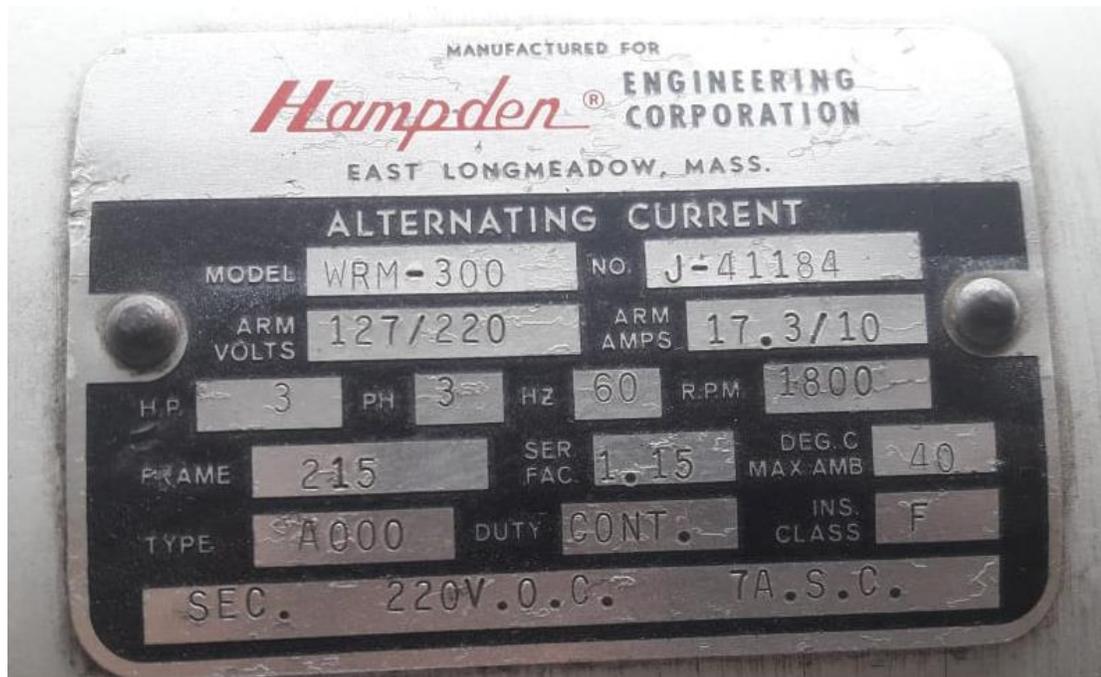


Figura 48 - Placa del motor AC

3.5.4. Banco de pruebas para máquinas asíncronas

En la Universidad Politécnica Salesiana tiene la finalidad de servir de herramienta de aprendizaje para las prácticas de conexión de máquinas eléctricas para los estudiantes que cursan niveles intermedios de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería en Electricidad.

En la Figura 49 podemos apreciar el banco de pruebas para máquinas eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana.



Figura 49 - Banco de prueba de una máquina asíncrona trifásico

3.5.5. PLC

El PLC es el dispositivo programable el cual nos permitirá leer los datos del voltaje del generador mediante su módulo ADC, nos permitirá controlar la velocidad del motor que mueve al generador mediante el control del variador de frecuencias.

El PLC que se va a usar es el S7-1200 de la marca Siemens el cual lo podemos apreciar en la Figura 50.

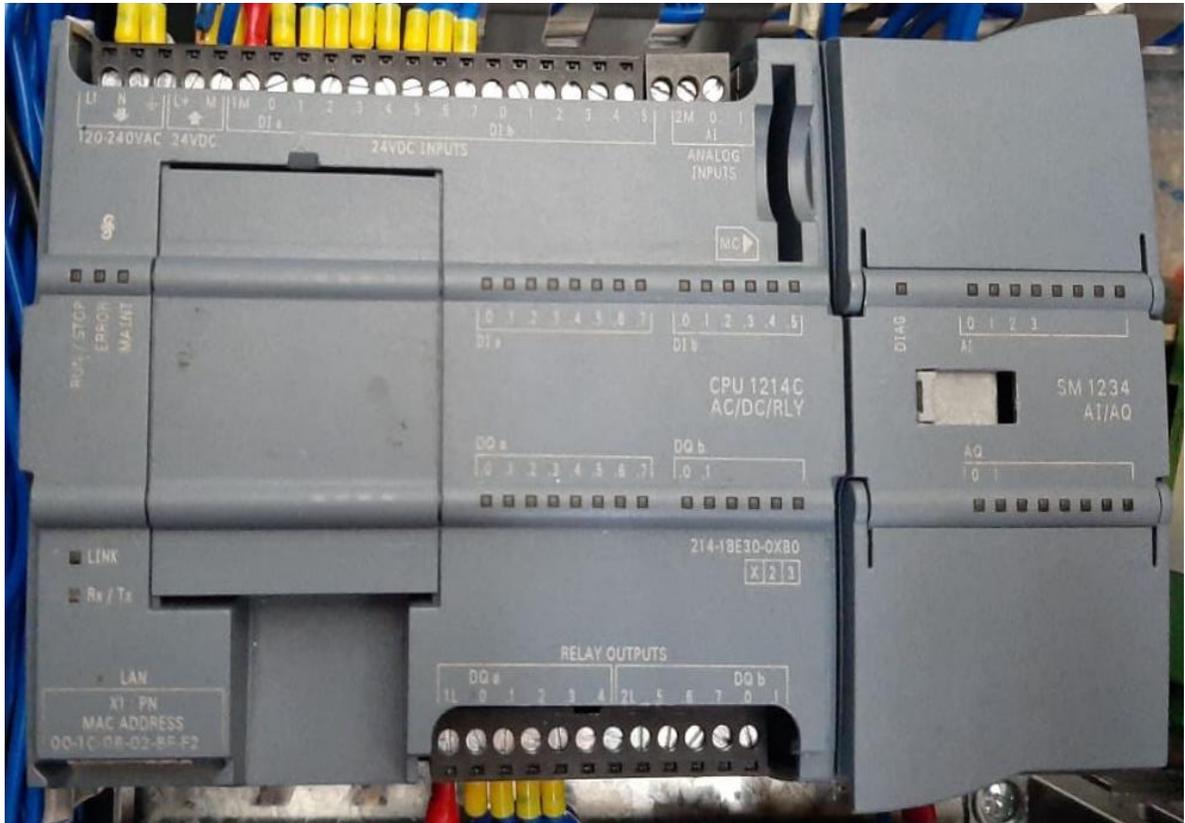


Figura 50 - PLC Siemens S7-1200

Este PLC se destaca por su alta capacidad de procesamiento al tener un microprocesador de 64 bits, además de que integra la interfaz Ethernet y Profinet para su comunicación con otros dispositivos.

Este PLC dispone de 100Kb de memoria y una velocidad de proceso de 85uS lo cual lo convierete en el mejor dispositivo de su clase, este PLC es ideal para aplicaciones que requieran una mayor área de memoria en programa.

Para proteger al PLC de las variaciones de voltaje que puedan producirse en el ambiente se incluyó un sistema de fusibles el cual lo podemos apreciar en la Figura 51.

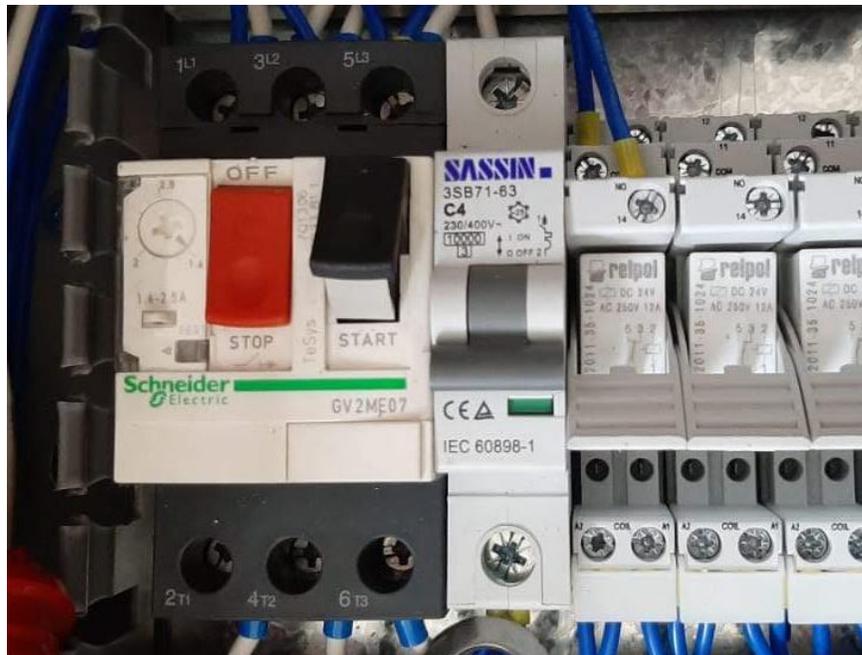


Figura 51 - Sistema de fusibles para controlar los picos de energía

El PLC dispone de un bloque de PID interno el cual nos permitirá realizar el control del varaidor de frecuencia en base al voltaje medido por el generador.

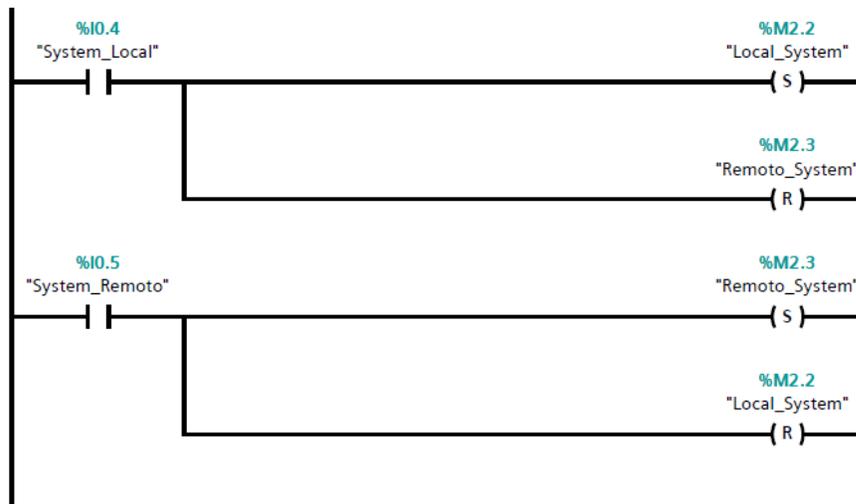


Figura 52 - Marcha y paro del PLC en local y remoto

En la Figura 53 podemos apreciar el diagrama de conexiones del control de marcha local, es decir las condiciones que se deben cumplir para que el PLC de marcha al sistema.

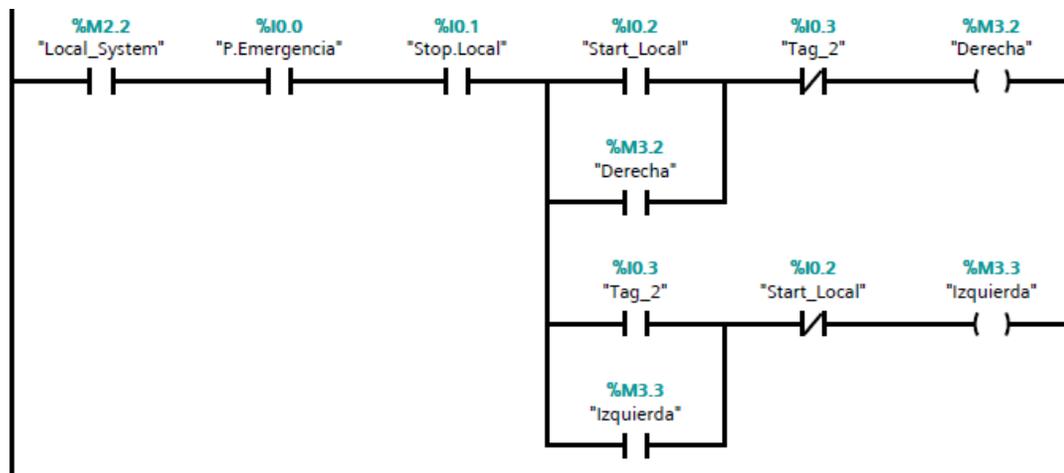


Figura 53 - Sistema de marcha local del PLC

Podemos apreciar que para comenzar deben estar activadas las entradas Local_System, P.Emergencia y Stop.Local, toda señal de alto se debe programar con una entrada abierta, de forma que si el botón de paro falla este se abra y no se pueda dar marcha al sistema si el botón de paro funciona.

Además de los botones de paro y de emergencia hay una entrada Local_System la cual representa al estado del sistema, si está en modo manual esta marca esta activada y por ende ese bloque se ejecuta, mientras que si el sistema está en automático esta marca está desactivada y nada de este bloque se ejecuta.

3.5.6. PID

Siemens TIA Portal dispone de un bloque de PID integrado con su software, es decir no hace falta programar de cero cada una de las partes que compone un PID (Proporcional, Integral, Derivativo), sino que se debe configurar sus parámetros.

Podemos ver en la Figura 54 como el bloque PID_Compact_1 tiene las entradas de SetPoint el cual es el punto de referencia del PID, en input la señal medida de voltaje del generador DC, en la salida tenemos output la cual es la señal que genera el PID, esta señal debe ser mapeada a una señal de salida analógica la cual pueda usar el PLC para enviarla al varaidor de frecuencia, de esto se encarga el bloque Out_Analoga, convierte la señal del PID_OUT en el valor que se envía a la salida analógica del PLC.

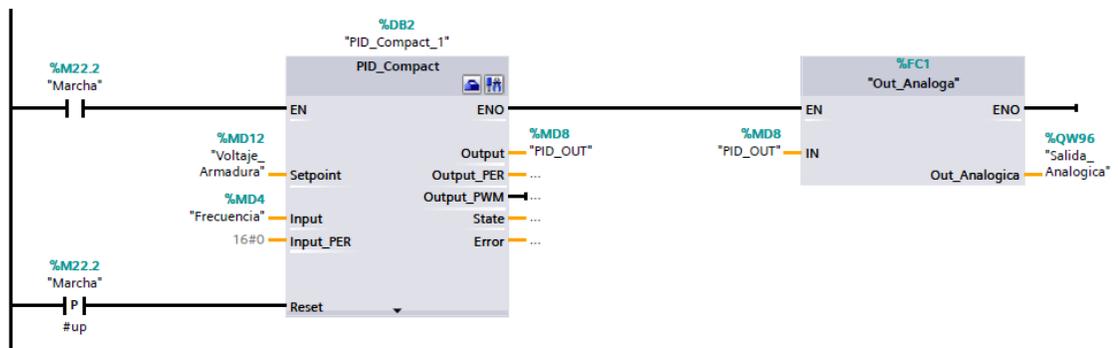


Figura 54 - Control de marcha y paro del control PID

En la Figura 55 se puede apreciar como se calcula el voltaje de la armadura a partir del SetPoint, el bloque NORM_X permite normalizar una señal, es decir convertir un

valor en determinado rango a un rango de 0 a 1, luego este valor se lo escala con el bloque SCALE_X el cual recibe una señal de 0 a 1 y la convierte a un rango diferente.

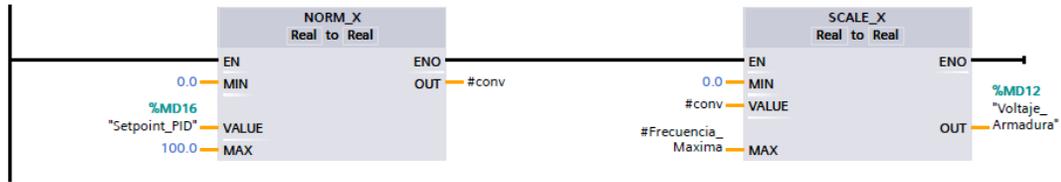


Figura 55 - Cálculo del voltaje de armadura para el controlador PID

3.5.7. Labview

3.5.7.1. Interfaz gráfica en Labview

La interfaz de un programa hecho en Labview se compone principalmente de 4 componentes como lo son:

- Entradas y salidas numéricas
- Entradas y salidas booleana
- Gráficas
- Decoraciones

Las entradas y salidas son elementos los cuales permiten enviar valores a Labview desde el usuario o mostrar valores desde Labview al usuario, estas entradas y salidas pueden ser o booleanas o numéricas.

Las entradas o salidas numéricas son controles los cuales pueden tomar un valor numérico en un determinado rango mientras que las entradas o salidas booleanas son controles los cuales puede tomar un valor de 1 o 0 o cualquier equivalente como por ejemplo true o false.

Las gráficas por otro lado son similares a las salidas numéricas, pero en lugar de desplegar el último valor enviado, conserva un historico de los valores enviados y los

presenta en una gráfica permitiendo de esta forma poder ver el comportamiento a lo largo del tiempo de la señal medida.

En la Tabla 4 podemos apreciar los principales componentes de la interfaz de un programa hecho en Labview.

Tabla 4 - Principales componentes de LabVIEW

Numeric	 Numeric
Boolean	 Boolean
Waveform Graph	 Graph
Decorations	 Decorations

3.5.7.2. Bloques de control

Labview además de los componentes gráficos antes mencionados cuenta con bloques funcionales, es decir bloques que permiten hacer funciones, como por ejemplo condicionales, cliclos, operaciones matemáticas, etc.

En las estructuras de control tenemos las estrcuturas ciclicas como lo son:

- For Loop
- While Loop

Estas estrcuturas permiten la repecición de una tarea en un determinado número de veces en el caso del “For” y la repetición de forma indefinida en el caso del “Loop”.

De la misma forma que con las estructuras cíclicas tenemos las estructuras condicionales o de desición, es decir una estructura que permite la ejecución de una u

otra acción en base a cierta variable de control, las dos principales estructuras de condicionales son:

- Case Structure
- Event Structure

Estas estructuras permiten la ejecución de ciertas parte del programa en determinadas condiciones, mientras que con la estructura “case” hay una acción definida para cada posible valor que puede tomar una variable, el “event” permite que se ejecuta de forma automática sin ningún control cuando ocurre un determinado evento definido dentro el “event structure”.

En la Tabla 5 podemos encontrar las principales estructuras de control de Labview.

Tabla 5 - Estructuras de control básica de LabVIEW

For Loop	 For Loop
While Loop	 While Loop
Event Structure	 Event Structure
Case Structure	 Case Structure

Labview permite además realizar operaciones entre datos, operaciones tan básicas como una suma o resta e incluso un controlador PID, esto mediante su paleta de operaciones, en la Tabla 6 podemos apreciar las operaciones básicas que se pueden realizar con Labview.

Tabla 6 - Operaciones aritméticas básicas de LabVIEW

Add	 Add
Substract	 Subtract
Multiply	 Multiply
Divide	 Divide
Absolute Value	 Absolute Value

3.5.7.3. Interfaz final

Para la interfaz de control desde labview se cuenta con una serie de botones y leds (entradas y salidas booleanas) los cuales permite controlar el funcionamiento del generador de voltaje.

En la Figura 56 podemos apreciar en verde los botones el estado de generador con su respectivo led para verificar el estado actual, de la misma forma tenemos en rojo los botones de salir y stop los cuales permite detener la ejecución del programa así como detener el motor y en azul tenemos botones los cuales nos permiten cambiar entre las opciones de control del motor.



Figura 56 - Botonera de control

En la Figura 57 podemos apreciar la interfaz completa de Labview para el control de voltaje del generador.

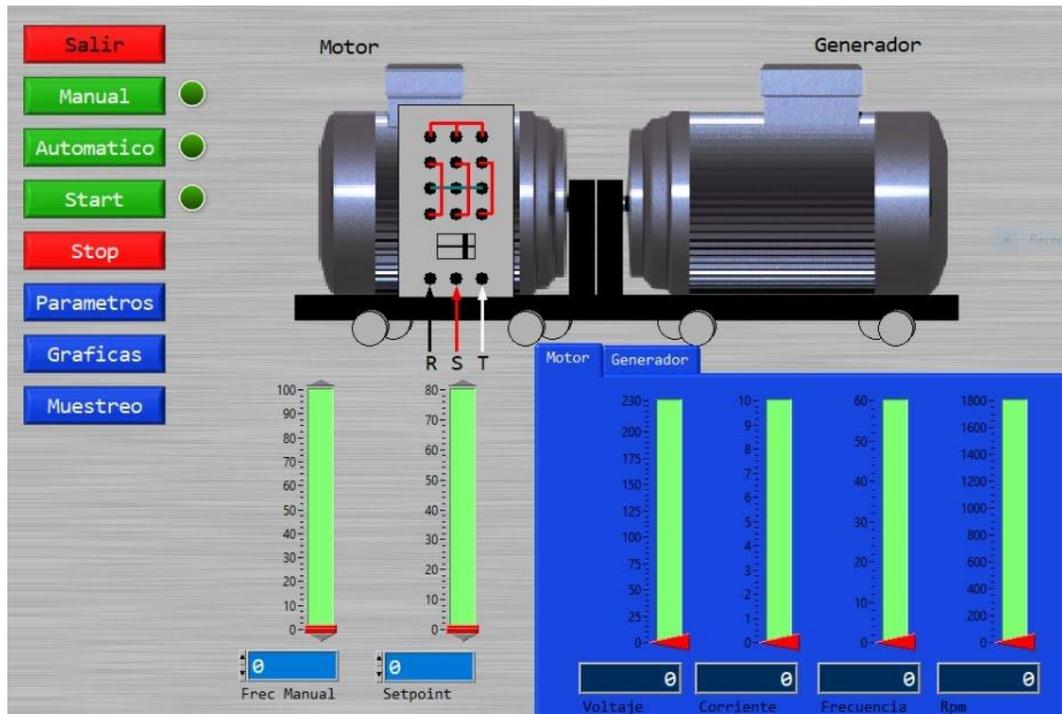


Figura 57 - Interfaz de control de variador de frecuencia

Labview no solo nos ofrece una interfaz gráfica como al vista anteriormente sino que nos permite definir acciones que se van a ejecutar en base a las entradas numéricas y

booleanas, en la Figura 58 podemos apreciar como se puede definir toda una lógica para cada entrada y salida de LabVIEW.

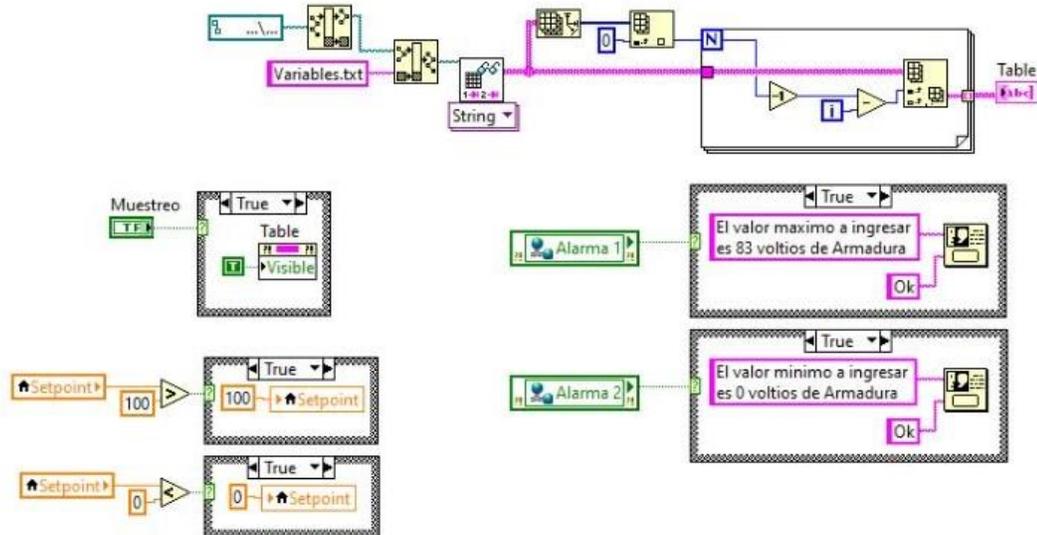


Figura 58 - Programación en LabVIEW

3.5.8. Panel de administración

Además de la interfaz de control en LabVIEW también se creó un panel físico para la administración del sistema de control, en la Figura 59 podemos apreciar un panel el cual cuenta con un selector para elegir el modo manual o automático de funcionamiento.



Figura 59 - Panel de control del sistema

Para el modo manual se cuenta con controles de inversión de giro del motor, así como controles para controlar la frecuencia que emitirá del variador de frecuencias, esto a su vez determina la velocidad del motor que está conectado al generador, lo que al final repercutirá de forma directa en el voltaje que entregue el generador.

En la Figura 60 podemos apreciar los conectores para cada una de las líneas que usará el motor, así como la puesta a tierra y los respectivos breakers.



Figura 60 - Vista lateral del panel de administración

Además del mensaje de riesgo eléctrico para avisar a las personas que van a manipular el equipo de que tomen las debidas precauciones y finalmente en la parte inferior un ventilador para disipar el calor que generaran los equipos en el interior de la caja.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se observará los resultados obtenidos del control automático de voltaje terminal del generador DC, así como el análisis de sus curvas características.

Las pruebas experimentales son realizadas en el laboratorio de Máquinas Eléctricas I&II de la Universidad Politécnica Salesiana.

Para controlar el voltaje terminal del generador DC se ha implementado un módulo de adquisición de datos el cual contiene un variador de frecuencia, un PLC, un transductor de corriente de 0-5 A y un transductor de voltaje de 0-150 VDC, los mismos que ayudaran a mostrar los datos por medio de la interfaz en labview, el control tiene la opción de estar en manual o remoto para la facilidad del los estudiantes o docentes que deseen realizar pruebas.

4.1. Prueba de vacío

4.1.1. Procedimiento

Para poder realizar las pruebas de vacío primero se acopla el motor trifásico WRM-300 al generador de corriente continua modelo DYN-400 esto mediante un matrimonio como se puede apreciar en la Figura 61.

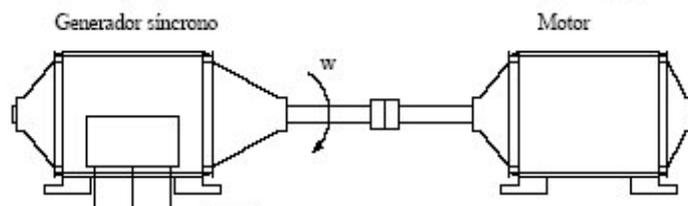


Figura 61 - Acomple de motor y generador

Para energizar el módulo, se toma la alimentación desde una fuente de voltaje trifásico ubicada en un módulo del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana, se conectan las tres líneas de salida del módulo al motor para energizarlo.

Luego se conecta el PLC al ordenador donde se encuentra instalado el software de control Tia Portal y Labview por medio de un cable ethernet como se puede apreciar en la Figura 62.

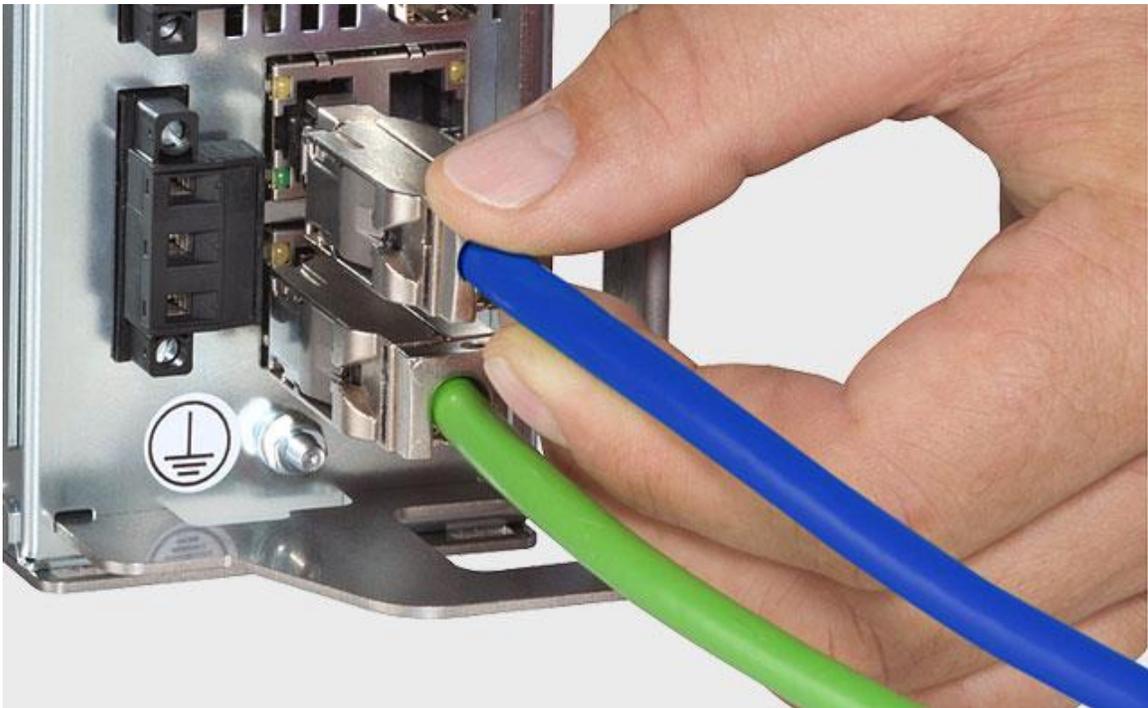


Figura 62 - Conexión de ethernet

Una vez se encuentren conectados los equipos, se conecta el bobinado de campo del generador a una fuente de voltaje que le suministrará 0.5 amperios, una vez esté todo esto listo se procede a subir el disyuntor y se ajusta el selector del programa en modo remoto para que desde la computadora se de la orden de marcha.

Desde la computadora se configura el setpoint en 60Hz y el programa comienza a realizar el control automático del voltaje, durante el funcionamiento del programa podemos observar una serie de curvas las cuales son los parámetros más destacados del motor las cuales vamos a monitorear, además si se desea ver esos mismos parámetros como valores numéricos, el programa realiza un muestreo y almacena dicha información.

Realizando la prueba en vacío se puede conocer la fuerza electromotriz generada en el devanado de armadura del generador midiendo el voltaje en los terminales del bobinado rotórico pues al no haber caída de tensión dicho valor será igual a la FEM generada en la máquina.

4.1.2. Análisis de resultados

En la Figura 63 se puede observar el comportamiento del motor AC luego de haber sido energizado, este se logra estabilizar después de 1.7 seg y su consumo sin carga es de aproximadamente de 6 A.

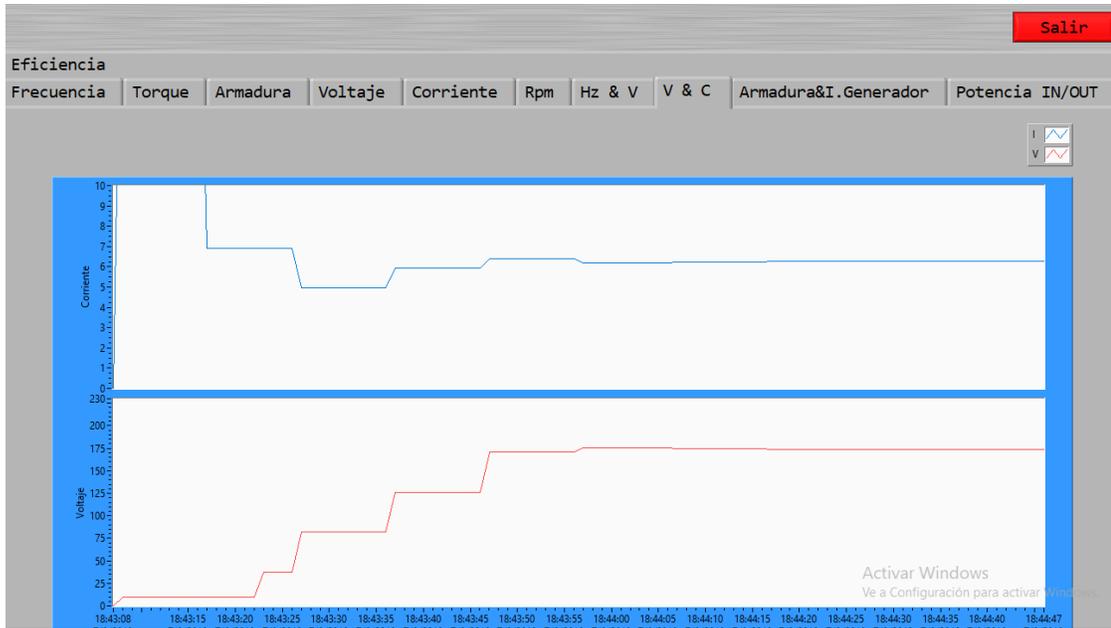


Figura 63 - Gráficas de voltaje y corriente en pruebas de vacío

Es importante destacar como existe un pico en la parte inicial cuando se energiza el motor, este pico de corriente sobrepasa los 10 A, es decir, tiene un pico de 40% la señal original, de la misma forma el voltaje inicia bajo mientras el el motor aumenta su velocidad hasta que logra estabilizarle a partir del segundo 1,7.

En la Figura 64 podemos apreciar como el motor rompe la inercia al recibir las señal y comienza a subir su velocidad hasta llegar a las 1300 revoluciones por minuto al segundo 1.8 aproximadamente.

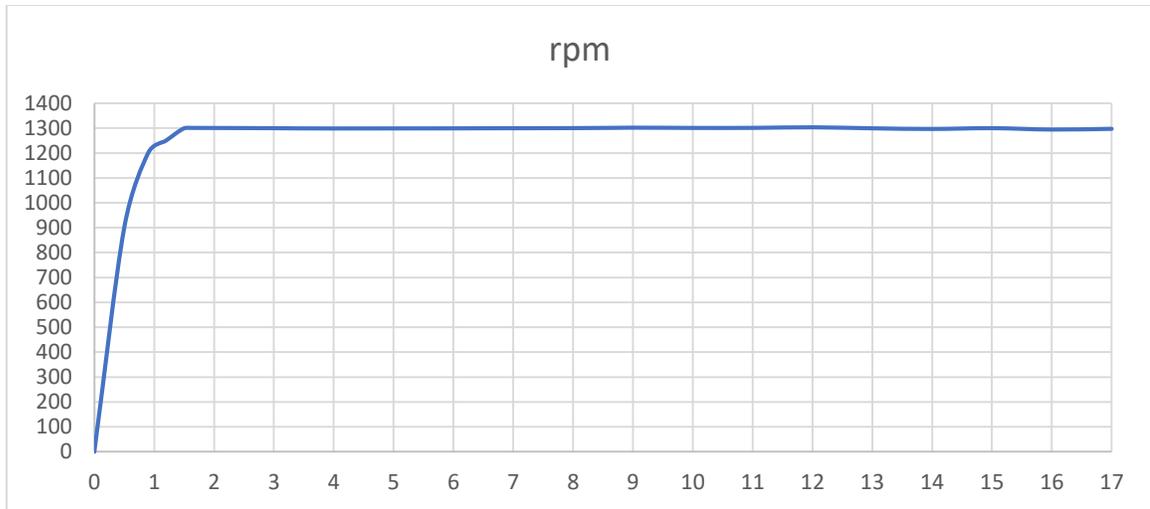


Figura 64 - Gráfica de revoluciones por minuto del motor

Al mirar más detalladamente la gráfica de velocidad del motor en marcha se puede apreciar que las revoluciones del motor no son del todo constantes, es decir, estas sufren ligeras variaciones como se puede apreciar en la Figura 65, estas variaciones hacen que el voltaje creado por el generador también varíe.

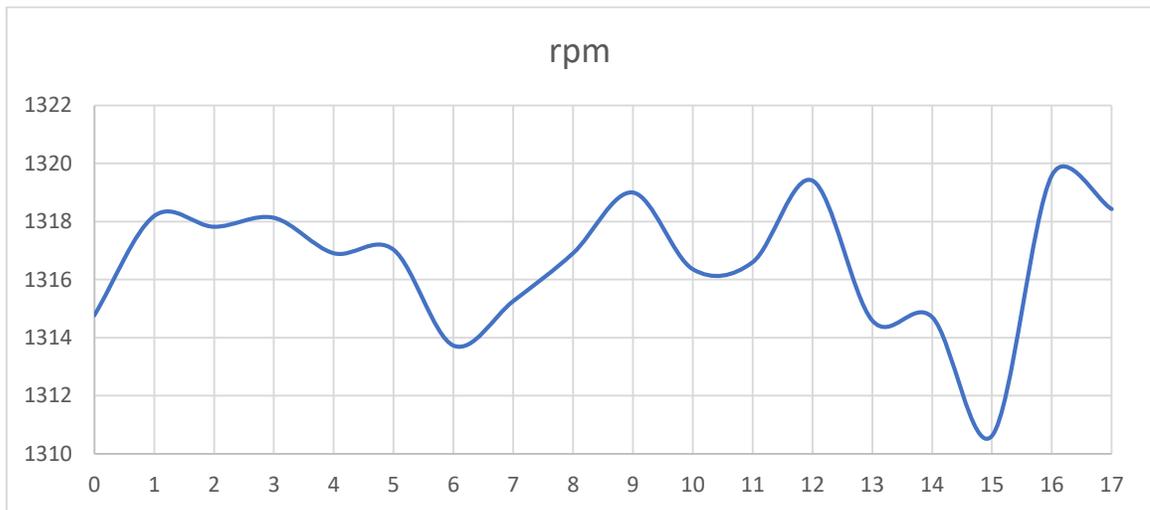


Figura 65 - Gráfica de revoluciones por minuto del motor, vista de cerca

Debido a esto es necesario que el sistema de control sea lo suficientemente robusto para corregir estas fluctuaciones.

4.2. Prueba con carga de 4.5 A

4.2.1. Procedimiento

Para las pruebas con carga, se realizan las mismas conexiones y acoplamientos que en la prueba de vacío, pero ahora se va a añadir una carga a la salida del generador, conectando un banco de resistencias mediante un cable que pasará a través de un transductor de corriente.

Dicha prueba servirá para simular el efecto de las caídas de tensión y observar el funcionamiento del sistema de regulación.

Cuando el PLC detecta una bajada en la tensión terminal del generador DC, este aplicará una compensación mediante el aumento de la frecuencia que llega al motor, esto mediante el variador de frecuencias, esto logra que la velocidad del motor aumente y por tanto la velocidad a la que gira el eje del generador también aumenta, logrando así generar una FEM más elevada la cual compense el voltaje caído y permita mantener estable el voltaje que el generador suministra a la carga.

Hay que tomar en cuenta, que la corriente que suministra el generador no puede pasar de los 4.5 amperios pues el transductor tiene un rango de trabajo de 0 a 5 amperios, por esto el software está programado para detener el proceso y proteger los componentes.

4.2.2. Análisis de resultados

En la Figura 66 podemos observar que al momento de inyectar carga de 4.5 A la tensión en los terminales del generador no varía, esto es debido a que el sistema de control detecta esta variación y mediante un controlador PID realiza el aumento de la

frecuencia del variador, esto deriva un aumento de la velocidad del motor AC y esto a su vez se transforma en un aumento de tensión.

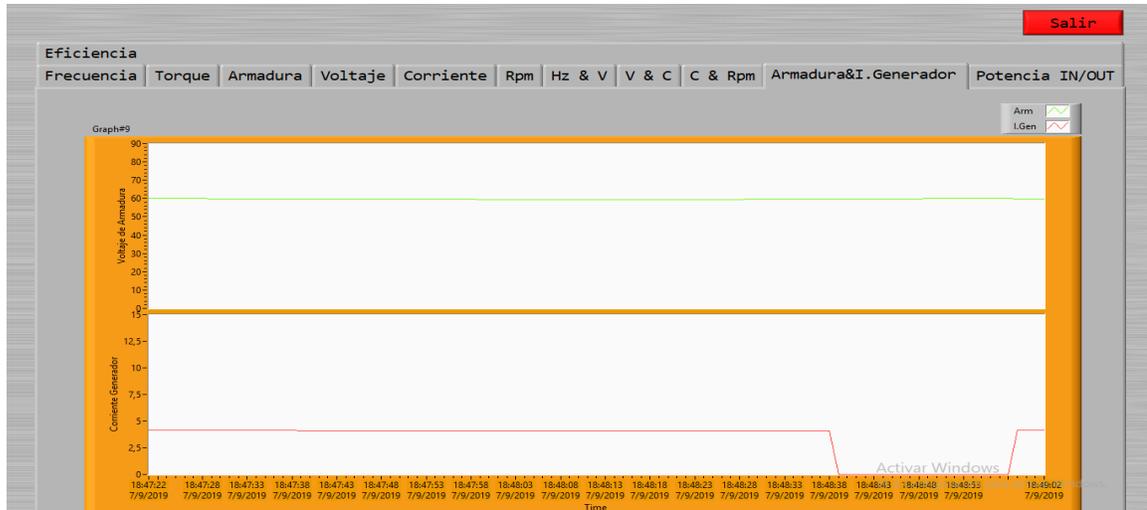


Figura 66 - Gráficas de voltaje y corriente con carga de 4.5 A

En la Tabla 7 podemos observar los resultados de las pruebas con carga, los cuales podemos apreciar como la corriente de campo $I_f(A)$ permanece relativamente constante, mientras que el torque $\tau_{apl}(N.m)$ aumenta con la finalidad de tratar de mantener las revoluciones iguales, este aumento del torque también conlleva un aumento de la corriente de armadura $i_L(A)$.

Tabla 7 - Resultados de las pruebas del generador con carga y una corriente de campo constante

n (rpm)	$i_L (A)$	$\tau_{apl} (N.m)$	$V_t (V)$	$I_f (A)$
1810	1,3	2,3	119,9	0,564
1810	2,0	2,7	117,2	0,561
1795	2,4	3,0	114,5	0,558
1802	2,8	3,4	113,3	0,558
1795	3,2	3,6	111,3	0,557
1803	3,7	4,0	109,8	0,555
1803	4,2	4,3	107,8	0,553
1806	4,9	4,8	105,0	0,552

Podemos apreciar de forma gráfica en la Figura 67 como el aumento de la corriente conlleva un aumento del torque del motor.

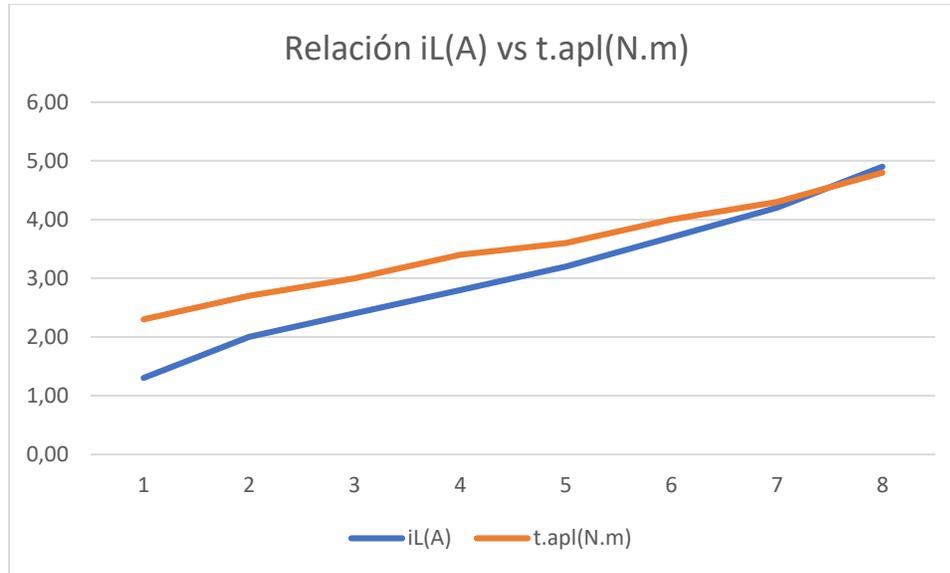


Figura 67 - Relación entre corriente y torque

4.3. Curvas características

Para poder determinar las curvas características se realizó un proceso teórico experimental mediante el cálculo y medición de los parámetros relevantes del motor y el generador.

Se tomaron 8 muestras en diferentes intervalos de tiempo durante el arranque del motor, en la Tabla 8 podemos apreciar el voltaje de la armadura E_a , la corriente de armadura E_D y la Potencia del eje del motor en el instante de tiempo 1 cuando el motor recibe la señal y comienza a moverse.

Tabla 8 - Cálculos de parámetro del motor

E_a	=	$V_t + \Sigma R \cdot I_a$	=	$119,9 + 0,8 \cdot 1,3$	=	120,94	V
ED	=	$ I_{f\text{mag}} - I_{f\text{real}} $	=	$ 0,526 - 0,564 $	=	0,038	Amp
Peje	=	$\tau_{apl} \cdot \omega$	=	$2,3 \cdot 189,54$	=	435,95	W
Pcu	=	$I_a^2 \cdot \Sigma R$	=	$1,3^2 \cdot 0,8$	=	1,35	W
Pa	=	$E_a \cdot I_a$	=	$120,94 \cdot 1,3$	=	157,22	W
Pmec	=	Peje - Pa	=	$435,95 - 157,22$	=	278,73	W
τ_{ind}	=	P_a / ω	=	$P_a / 189,54$	=	0,83	N.m
τ_{roz}	=	$\tau_{apl} - \tau_{ind}$	=	$2,3 - 0,83$	=	1,47	N.m
Psalida	=	$V_t \cdot I_L$	=	$119,9 \cdot 1,3$	=	155,87	W
$\% \eta$	=	$(P_{salida} / P_{eje}) \cdot 100\%$	=	$(155,87 / 435,95) \cdot 100\%$	=	35,75	%

Al no poder realizarse una medición directa al cobre para saber la potencia que se pierde en ellos se realiza el cálculo de las mismas mediante la fórmula $I_a^2 \cdot \Sigma R$.

De la misma forma la potencia de la armadura se puede obtener mediante la multiplicación del voltaje de la armadura E_a y la corriente de la armadura, si sabemos la potencia de entrada de la máquina y la potencia de la armadura, podemos deducir cuanto se pierde en la parte mecánica del motor.

En base a estos cálculos se puede determinar la eficiencia del sistema, como se puede apreciar en la Figura 68, el sistema recibe una potencia de 435.95W, mientras que a la salida se generan 155.87W, es decir, se tiene una eficiencia del 35.75%.

El voltaje que se desaprovecha esta repartido entre perdidas mecánicas y perdidas en el cobre, las perdidas en el cobre suelen ser muy bajas, para nuestro caso es de apenas 1.35W, pero las perdidas mecánicas son de 278.73W, es decir un valor mucho más considerable, esto debido a que el motor se encuentra tratando de romper la inercia.

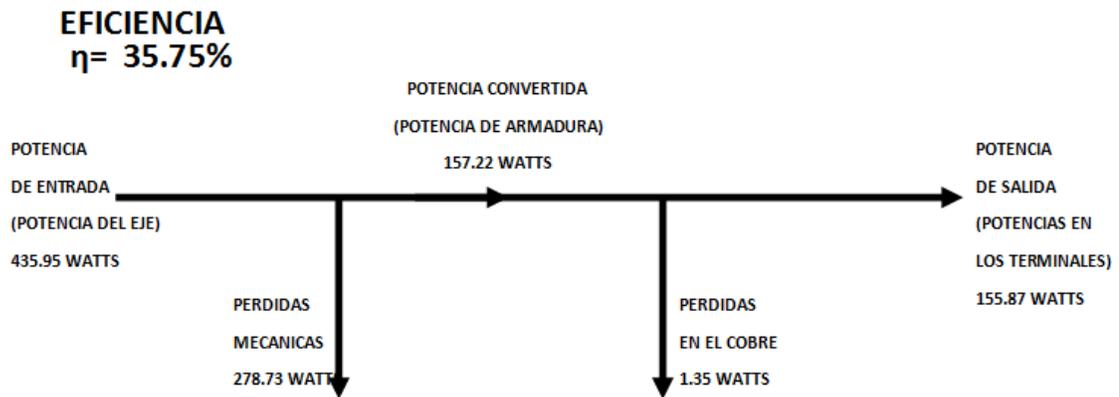


Figura 68 - Cálculo de eficiencia del Sistema

Esta eficiencia es muy baja pero se debe a que el motor se encuentra recién moviéndose, si apreciamos la Tabla 9 podemos destacar de la tabla anterior el hecho de que el voltaje y la corriente de la armadura son superiores, son 118.8V y 0.035^a respectivamente, esto debido a que el motor ya se encuentra girando sobreponiéndose a la inercia mecánica.

Tabla 9 - Cálculos de parámetro del motor

E_a	=	$V_t + \Sigma R \cdot I_a$	=	$117,2 + 0,8 \cdot 2$	=	118,8	V
E_D	=	$ I_{fmag} - I_{freal} $	=	$ 0,526 - 0,561 $	=	0,035	Amp
P_{eje}	=	$\tau \omega$	=	$2,7 \cdot 189,54$	=	511,77	W
P_{cu}	=	$I_a^2 \cdot \Sigma R$	=	$2^2 \cdot 0,8$	=	3,20	W

P_a	=	$E_a \cdot I_a$	=	$118,8 \cdot 2$	=	237,60	W
P_{mec}	=	$P_{eje} - P_a$	=	$511,77 - 237,60$	=	274,17	W
τ_{ind}	=	P_a / ω	=	$237,60 / 189,54$	=	1,25	N.m
τ_{roz}	=	$\tau_{apl} - \tau_{ind}$	=	$2,7 - 1,25$	=	1,45	N.m
P_{salida}	=	$V_t \cdot I_L$	=	$117,2 \cdot 2$	=	234,4	W
$\% \eta$	=	$(P_{salida} / P_{eje}) \cdot 100\%$	=	$(234,4 / 511,77) \cdot 100\%$	=	45,8	%

Este aumento en la potencia de la armadura se traduce en una mejor eficiencia del sistema, como se puede apreciar en la Figura 69 la eficiencia aumenta hasta los 45.80% debido a que existen menos pérdidas mecánicas, más puntualmente existen 274.17W, si bien este valor continúa siendo muy alto, este seguirá disminuyendo conforme el motor alcance su máxima velocidad.

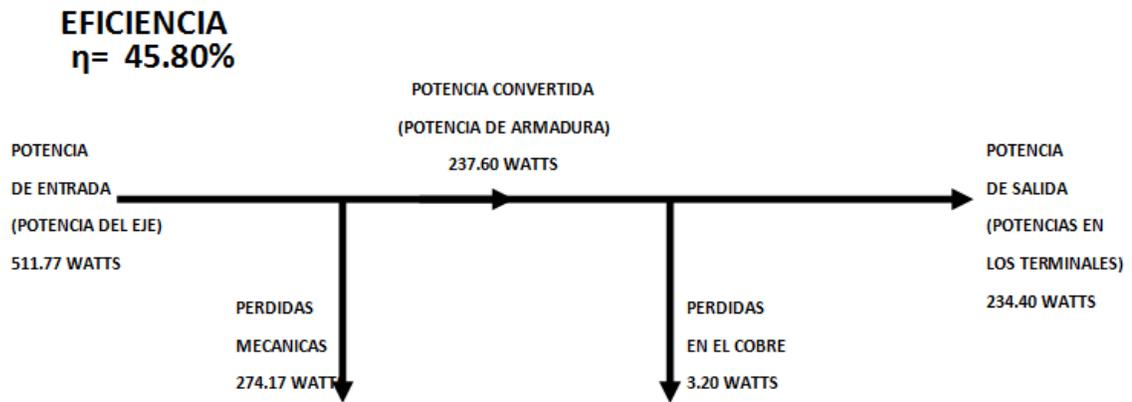


Figura 69 – Cálculo de eficiencia del Sistema

En la

Ea(V)	E.D	ω (rad/seg)	P.eje(W)	P.cu(W)	P.a(W)	P.mec(W)	τ_{ind} (N.m)	τ_{roz} (N.m)	P.salida(W)	$\% \eta$
-------	-----	--------------------	----------	---------	--------	----------	--------------------	--------------------	-------------	-----------

120,94	3,80%	189,54	435,95	1,35	157,22	278,73	0,83	1,47	155,87	35,75%
118,80	3,50%	189,54	511,77	3,20	237,60	274,17	1,25	1,45	234,40	45,80%
116,42	5,70%	187,97	563,92	4,61	279,41	284,51	1,49	1,51	274,80	48,73%
115,54	5,70%	188,70	641,60	6,27	323,51	318,08	1,71	1,69	317,24	49,45%
113,86	8,70%	187,97	676,70	8,19	364,35	312,35	1,94	1,66	356,16	52,63%
112,76	8,50%	188,81	755,24	10,95	417,21	338,03	2,21	1,79	406,26	53,79%
111,16	8,30%	188,81	811,88	14,11	466,87	345,01	2,47	1,83	452,76	55,77%
108,92	9,80%	189,12	907,79	19,21	533,71	374,09	2,82	1,98	514,50	56,68%

Tabla 10 podemos apreciar como la eficiencia del sistema va aumentando al mismo tiempo que la potencia de armadura aumenta.

Ea(V)	E.D	ω (rad/seg)	P.eje(W)	P.cu(W)	P.a(W)	P.mec(W)	τ .ind(N.m)	τ .roz(N.m)	P.salida(W)	% η
120,94	3,80%	189,54	435,95	1,35	157,22	278,73	0,83	1,47	155,87	35,75%
118,80	3,50%	189,54	511,77	3,20	237,60	274,17	1,25	1,45	234,40	45,80%
116,42	5,70%	187,97	563,92	4,61	279,41	284,51	1,49	1,51	274,80	48,73%
115,54	5,70%	188,70	641,60	6,27	323,51	318,08	1,71	1,69	317,24	49,45%
113,86	8,70%	187,97	676,70	8,19	364,35	312,35	1,94	1,66	356,16	52,63%
112,76	8,50%	188,81	755,24	10,95	417,21	338,03	2,21	1,79	406,26	53,79%
111,16	8,30%	188,81	811,88	14,11	466,87	345,01	2,47	1,83	452,76	55,77%
108,92	9,80%	189,12	907,79	19,21	533,71	374,09	2,82	1,98	514,50	56,68%

Tabla 10 - Mediciones del motor

4.3.1. Curvas de operación

En la curva de magnetización que se puede apreciar en la Figura 70 se puede observar como el voltaje terminal aumenta de manera lineal desde los 0 amperios hasta los 0.45 amperios y luego se observa que va poco a poco va tomando valores constantes.

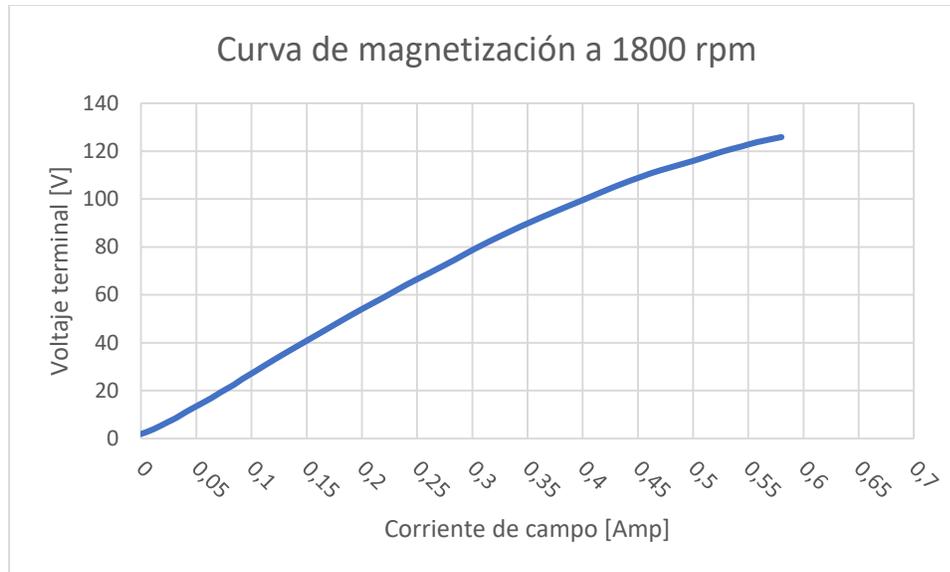


Figura 70 - Curva de operación a 1800RPM

En la curva de la pendiente de operación que se puede apreciar en la Figura 71 se observa el comportamiento de la caída de tensión a diferentes valores de corriente y se puede notar que la pendiente de dicha curva es el valor de resistencia del bobinado.

Es importante destacar que por cada amperio la corriente terminal pierde aproximadamente 2 voltios.

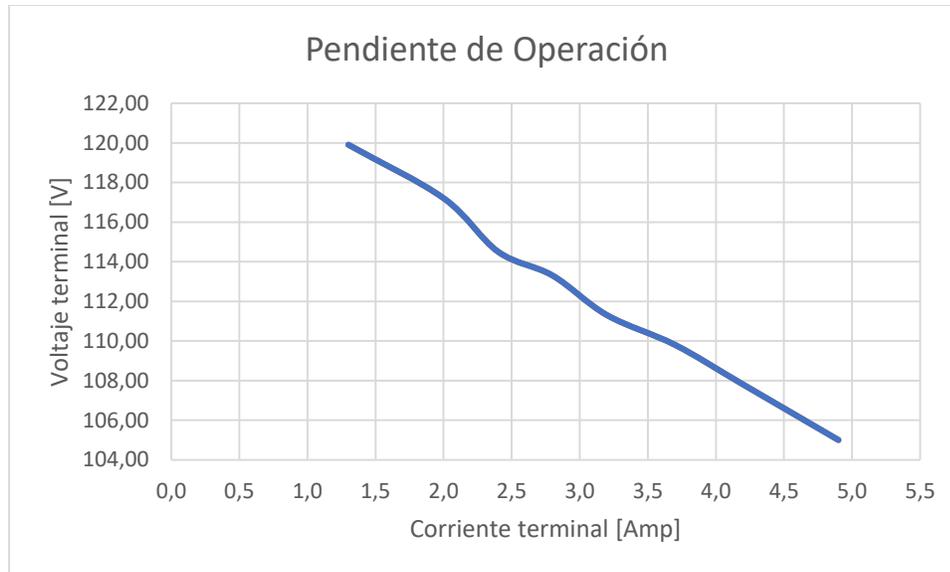


Figura 71 - Pendiente de operación

En la curva del efecto desmagnetizante que se puede apreciar en la Figura 72 podemos apreciar un comportamiento errático, pero al mismo tiempo se observa como este efecto aumenta de forma proporcional a la corriente terminal.

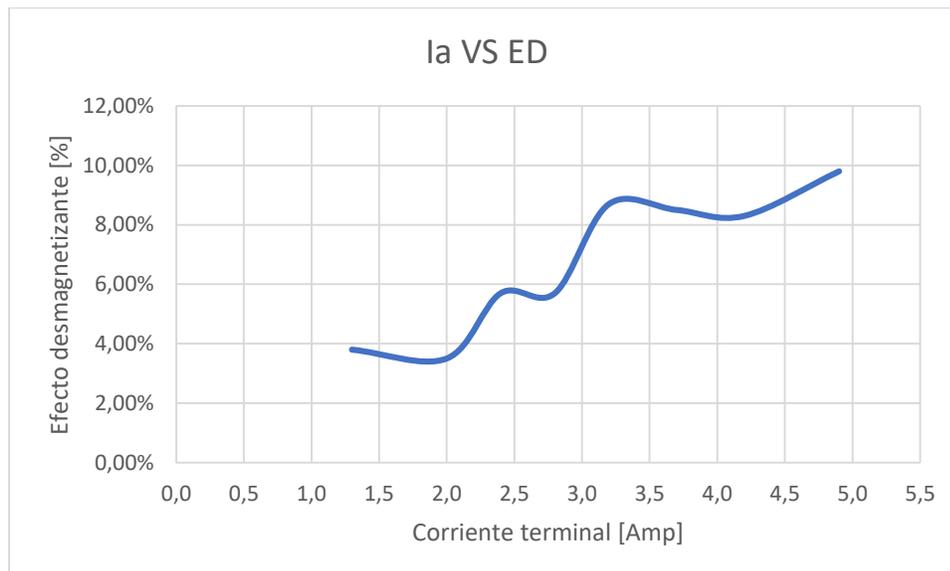


Figura 72 - Gráfica de corriente de terminal vs ED

La grafica de la corriente terminal vs eficiencia que se puede observar en la Figura 73 se muestra que la eficiencia alcanza su valor máximo cuando la corriente terminal sobrepasa los 4.5 amperios, es decir que por debajo de ese valor la maquina estará desperdiciando potencia, ya sea en forma de calor o de flujo disperso. Si la corriente terminal es poca, la maquina será muy poco eficiente.

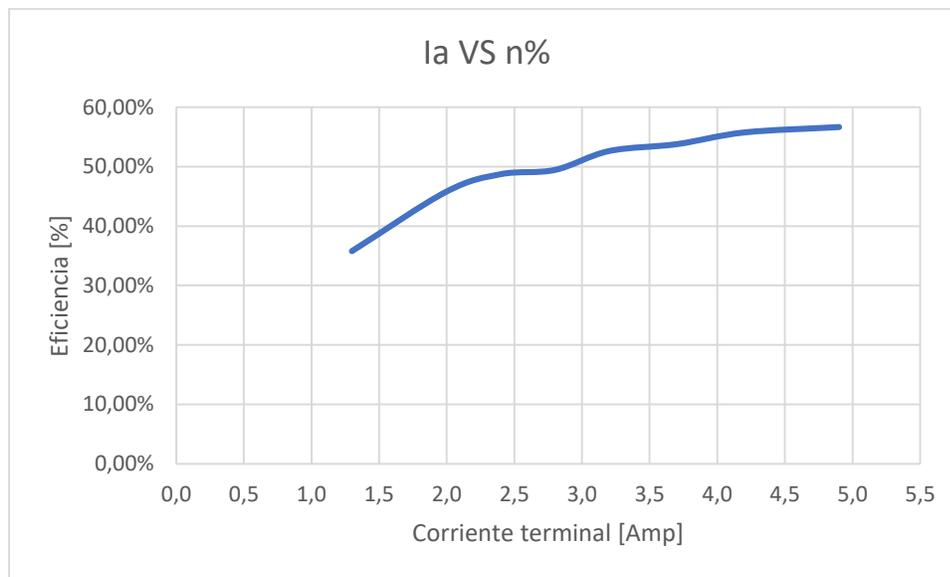


Figura 73 - Gráfica de corriente terminal vs Eficiencia

En la Figura 74 observamos que el torque de rozamiento aumenta proporcionalmente a la corriente terminal, es decir a mayor corriente de armadura mayor toque de rozamiento.

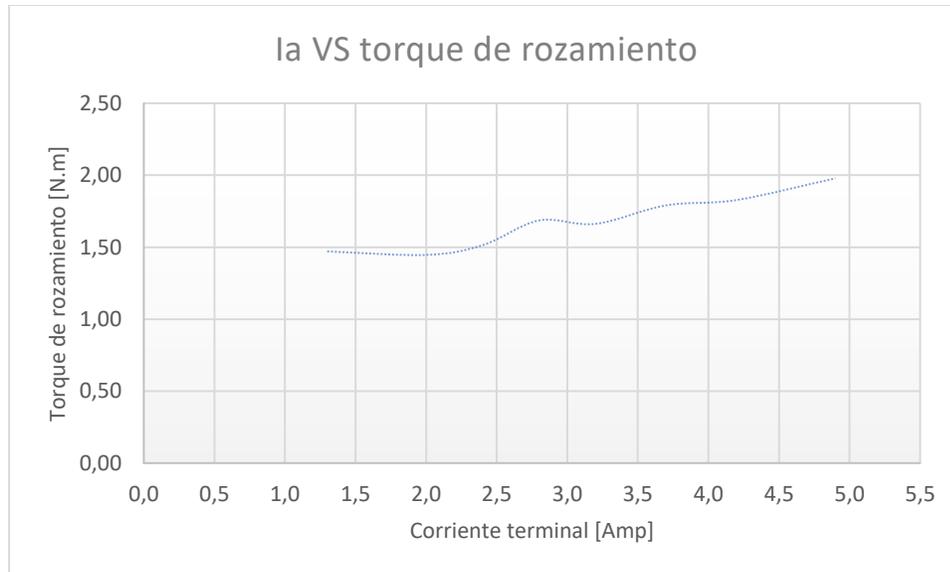


Figura 74 – Corriente de terminal vs torque de rozamiento

En la Figura 75 observamos la corriente terminal vs las pérdidas de potencia mecánica de eje, donde las pérdidas son proporcionales a la corriente terminal debido a la fuerza contra electromotriz que es causada por el campo magnético generador en la armadura al tener un paso de corriente que funciona como un freno.

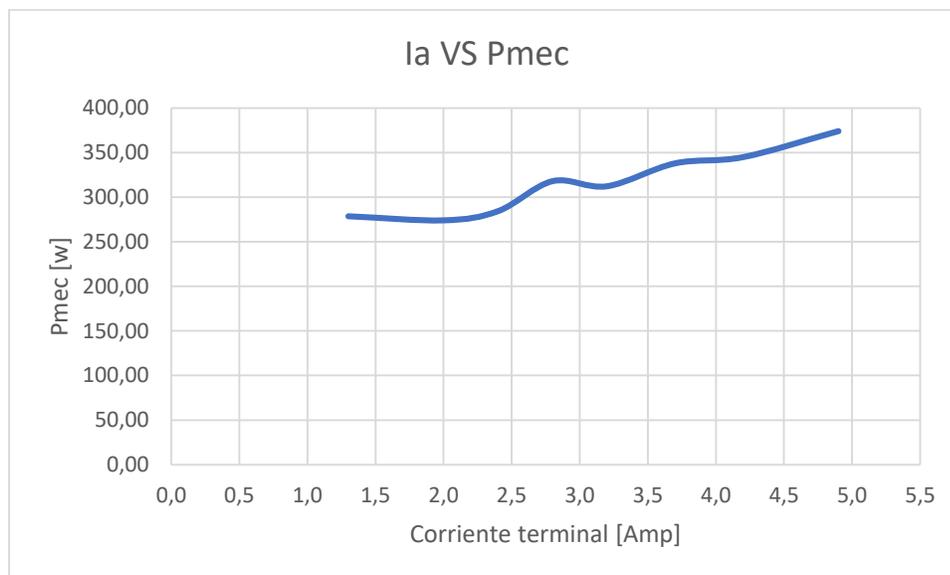


Figura 75 - Gráfica de corriente de terminal vs Perdidas mecánicas

Las pérdidas mecánicas son directamente proporcionales a la corriente de armadura. La mayor parte de las pérdidas de potencia, son perdidas mecánicas.

Hay que notar que esta curva se da con una velocidad constante de 1800 rpm y al variar la velocidad la curva puede presentar un comportamiento diferente.

La corriente de armadura crea una reacción que disminuye el campo y provoca que el voltaje de armadura decaiga haciendo que el voltaje terminal también lo haga.

CONCLUSIONES

Gracias a las gráficas características del motor AC WRM-300 podemos apreciar que es un generador que produce elevados picos al inicio de su funcionamiento, pero que este rápidamente se estabiliza.

Pudimos comprender que el generador Dyn-400 ofrece un voltaje entre sus terminales el cual no es proporcional a la velocidad de rotación del eje, ya que cuando se le coloca una carga se debe aumentar la velocidad del motor de eje para que este pueda mantener el mismo voltaje.

Gracias a LabVIEW pudimos desarrollar una interfaz de control para el proyecto de forma sencilla, gracias a sus bloques de control prediseñados y su excelente sistema de comunicación con los PLC, podemos hacer un control automático del sistema.

Pudimos apreciar como mediante un variador de frecuencia se puede controlar la velocidad de un motor AC y si a este se le acopla un generador DC, podemos generar un voltaje estable siempre y cuando este no tenga cargas, ya que al caer el voltaje debido a la carga es necesario aumentar la velocidad del motor AC.

RECOMENDACIONES

Es importante que todo el sistema esté conectado a fusibles para evitar problemas de cortocircuitos.

Siempre se debe verificar las conexiones antes de dar marcha al sistema para evitar que errores puedan averiar los equipos.

El matrimonio que une el motor AC con el generador DC debe estar perfectamente conectado ya que si existe un desnivel o alguna perturbación debido a la cantidad de vueltas que dará el eje, este puede dañarse fácilmente.

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN VINCULADOS

Diseño y construcción de un banco de prácticas para motores eléctricos, como apoyo a la asignatura de diseño de máquinas II, autores Eybar Farith Contreras Villamizar y Rolando Sánchez Rodríguez.

Diseño e implementación de una demostración práctica en el laboratorio de máquinas eléctricas utilizando el variador de frecuencia como fuente de ahorro de energía, autor José Ángel Jacho Toapanta.

Variadores de frecuencia para el control de velocidad de motores asincrónicos jaula de ardilla, autor Leonardo Xavier Arana Suarez.

Dotación y aplicación de un módulo con variador de velocidad para simulación de control de arranque y velocidad del motor de una grúa para el laboratorio de control industrial, autores Xavier Orlando Gaguancela Vargas Y Geoconda Gabriela Sáez Layedra.

Implementación de un sistema de control y programación de un prototipo de vehículo híbrido comandado a través de un PLC y variadores de frecuencia, autor Álvaro Guillermo Cevallos Viscaíno Y Ernesto Paúl Velasco Cerna.

Implementación de una estación de almacenamiento de probetas de distintos materiales y tamaños controlados por PLC y pantalla táctil para el laboratorio de control y automatización de procesos industriales de la escuela de ingeniería mecánica de la epoch, autores Garces Coca Oscar Leonardo Y Shagñay Pucha Angel Alonso.

Automatización de un sistema de climatización con PLC, autor Roger Valdés Fernandez.

Implementación de un sistema de control mediante PLC para un horno de fábrica de acero, autor Ana Carolina Alarcón Sánchez.

Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica, autores Manuel David Rodríguez Santillán y Michael Javier León Yungaicela.

Diseño e implementación de un prototipo de un generador magnético aprovechando la fcm como energía alternativa, autores Lenin Moises Quispe Arapa Y Rossel Apaza Bruna.

Diseño e implementación de variadores de frecuencia en máquinas extrusoras de plástico para mejorar los procesos y ahorrar energía en la empresa plastinic sa, autores Br. Mario Josué Gutiérrez Martínez y Br. Mario Alberto Ruiz Moreno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anchía, R. C. (s.f.). *Devanados de generadores y motores eléctricos Tomo IX Biblioteca del Electricista Práctico*. Gallach.

Cromer, A. H. (1998). *Física en la ciencia y en la industria*. Editorial Reverté.

El Libro Práctico de los Generadores, Transformadores y Motores Eléctricos. (s.f.). Limusa.

GAJA DÍAZ, E., SANCHO VIVÓ, S., MORENO ESTEVE, J. C., & MARTÍNEZ-CANALES MURCIA, J. F. (2018). *NOCIONES TEÓRICAS, CUESTIONES Y PROBLEMAS DE ELECTROMAGNETISMO*.

Gutiérrez Trashorras, A. J. (2010). *Generadores y Motores Térmicos*.

HAYT. (2012). *TEORIA ELECTROMAGNETICA 8ED*. MCGRAW-HILL.

Hayt, W. H. (2013). *Teoría electromagnética*. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE MEXICO.

Keithley, J. F. (1999). *The story of electrical and magnetic measurements: from 500 B.C. to the 1940s*.

Krawczyk, A. (2008). *Electromagnetic field, health and environment: proceedings of EHE'07*.

Marsden, J. (2018). *Cálculo vectorial*. Pearson.

Maxwell, J. C. (1881). *A treatise on electricity and magnetism, Vol. II, Chapter III, §530, p. 178*. Oxford, UK: Clarendon Press. ISBN 0-486-60637-6.

MENGUAL PITARCH, P. (s.f.). *STEP 7: Una Manera Fácil de Programar PLC de Siemens (MARCOMBO FORMACIÓN)*. Marcombo.

Northrop, R. B. (1997). *Introducción a Instrumentación y las Medidas*. CRC Press.

Parra, A. P. (s.f.). *Electromagnetismo para la ingeniería electrónica*.

Perez Adrover, E. (2014). *Introducción a los PLCs*.

RalkerWiley, H. R. (2015). *FUNDAMENTAL OF PHYSICS 9ed*.

Ramírez Vázquez, J. (s.f.). *Máquinas motrices generadores de energía eléctrica*. 1983:
Grupo Editorial CEAC, S. A.

Ražnjević, K. (1995). *Cantidades físicas y las Unidades del sistema internacional (SI)*.
Begell House Publishers.

Richard, F. M. (2018). *Energetica: Motores, Generadores, y Transformadores*.

ANEXOS

PRESUPUESTO

Tabla 11 - Presupuesto para implemetación

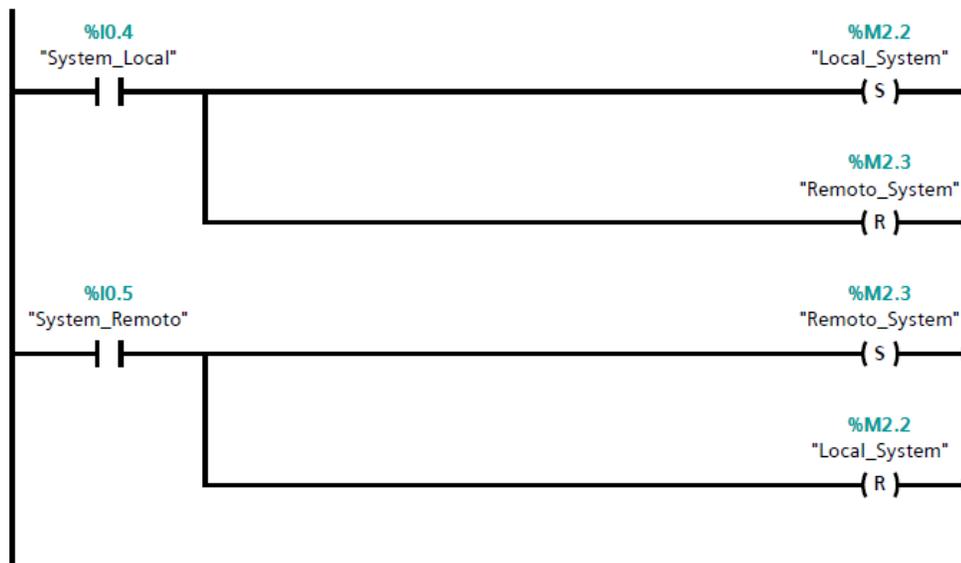
Descripción	Cantidad	Precio	Subtotal
Selector de 3 posiciones	5	\$2.00	\$10.00
Pulsador de hongo	5	\$2.00	\$10.00
Pulsador 22MM Verde	8	\$4.50	\$36.00
Breaker Riel Din 3X16A	6	\$4.00	\$24.00
Luz piloto roja	6	\$5.00	\$30.00
Gabinete doble fondo 60X40X20	2	\$40.00	\$80.00
Riel Din	8	\$5.00	\$40.00
Canaleta Ranurada 40X40	10	\$8.00	\$80.00
Destornilladores variados	1	\$25.00	\$25.00
Cable flexible (100mts)	3	\$13.00	\$39.00
Ciento de terminales	5	\$5.00	\$25.00
Base para mini relays	8	\$8.00	\$64.00
Ventilador 120X120X38	3	\$35.00	\$105.00
Guardamotor	1	\$50.00	\$50.00
Voltímetro	1	\$50.00	\$50.00
Amperíemtro	1	\$45.00	\$45.00
Pantalla LCD	1	\$60.00	\$60.00
Fuente de alimentación variada	1	\$60.00	\$60.00
Total			\$833.00

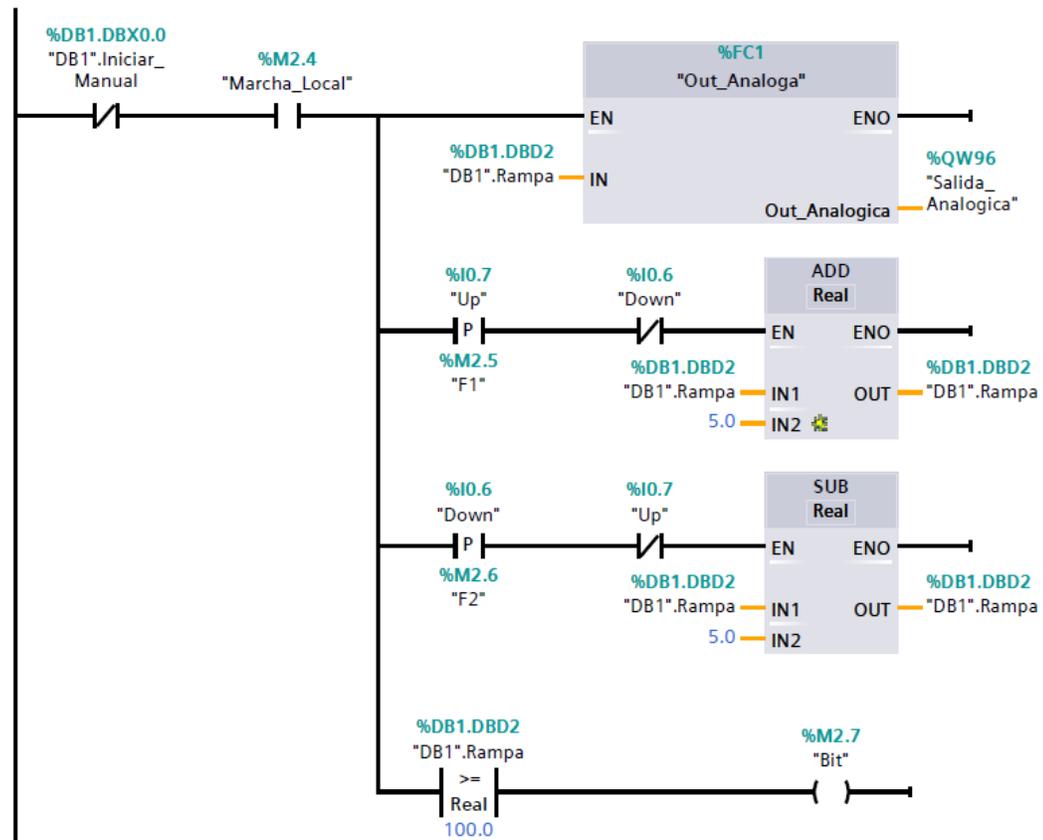
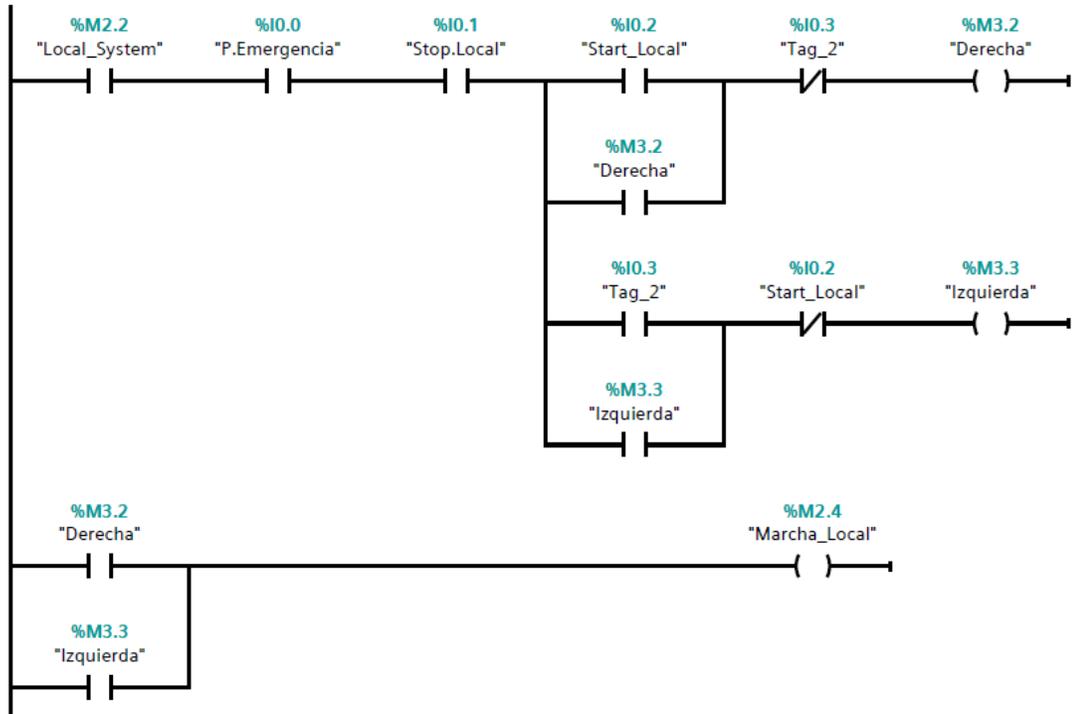
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

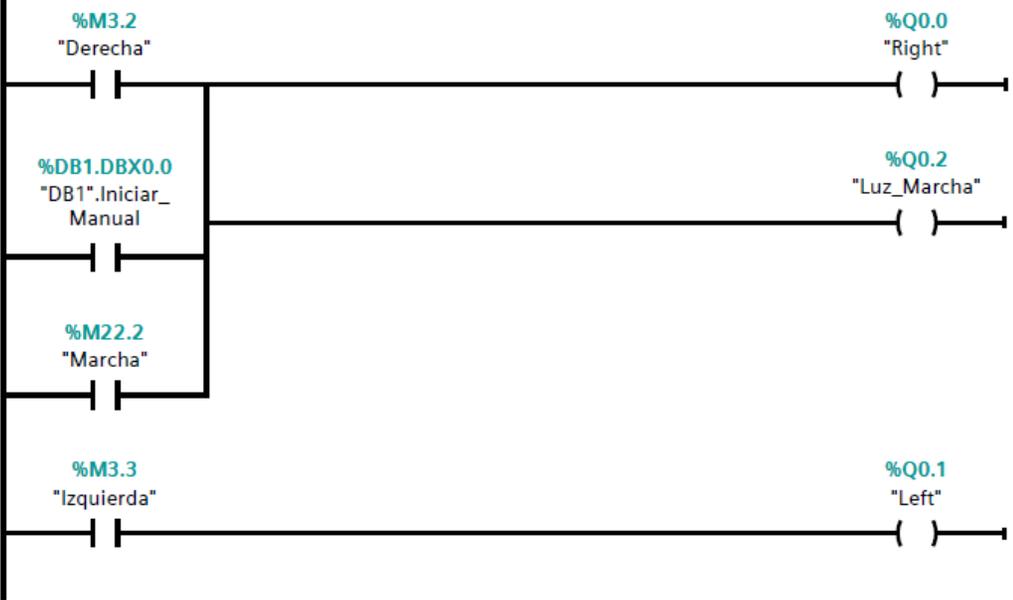
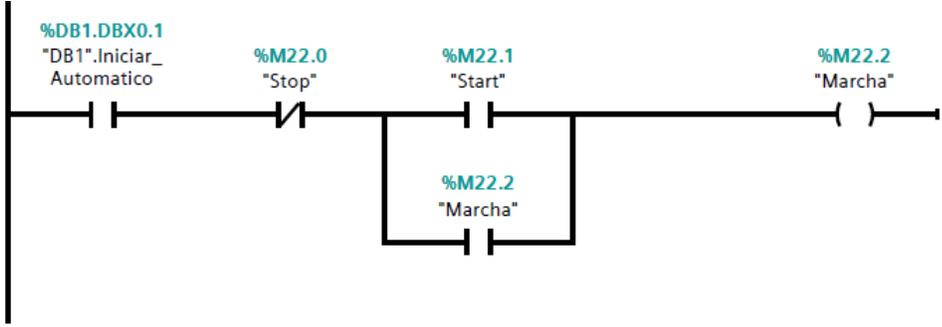
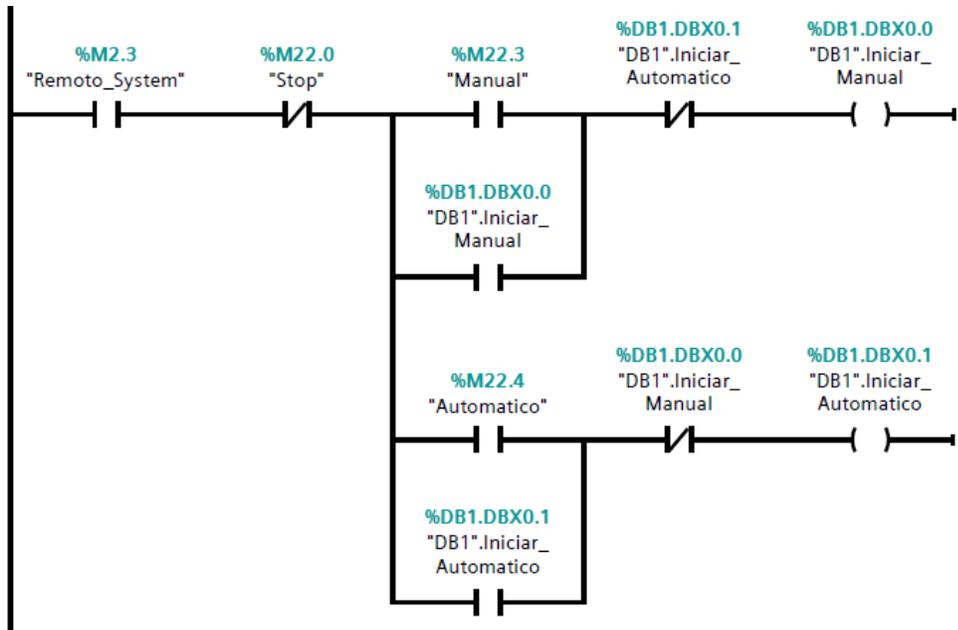
Tabla 12 - Conograma de actividades

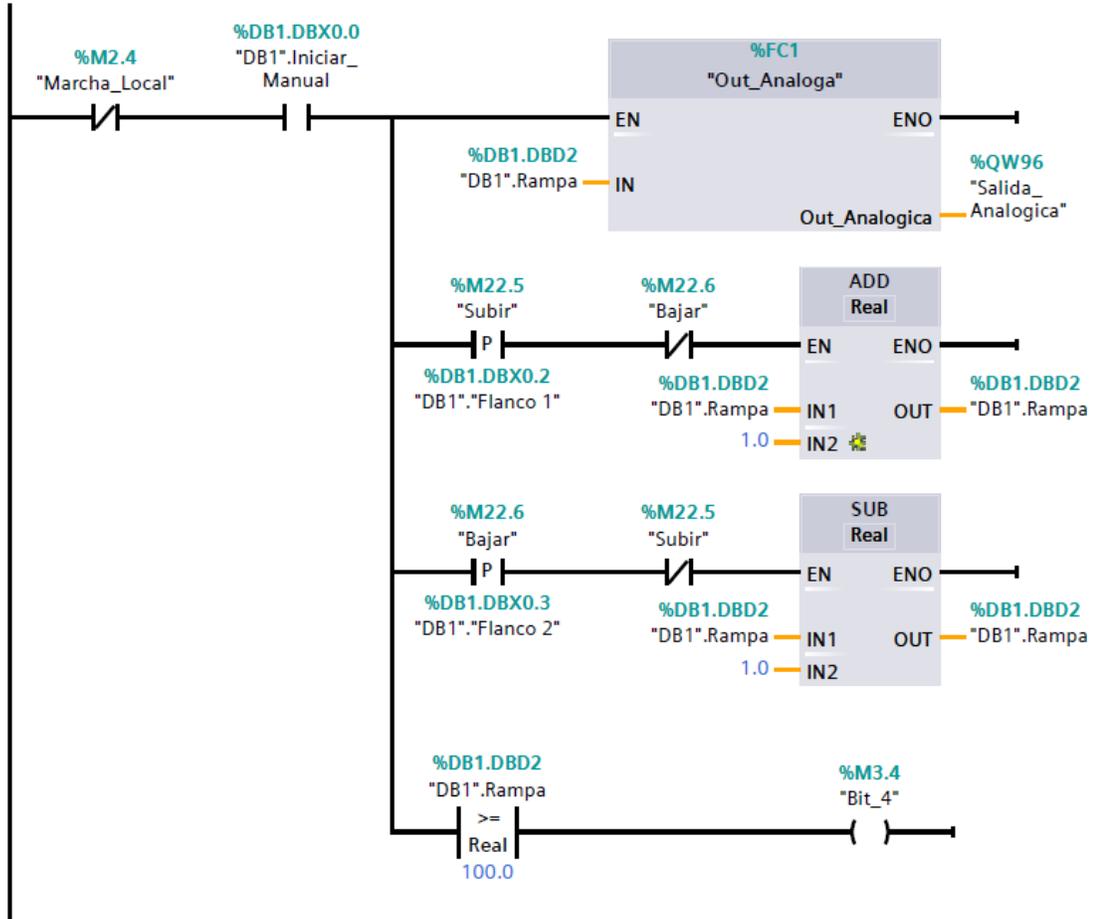
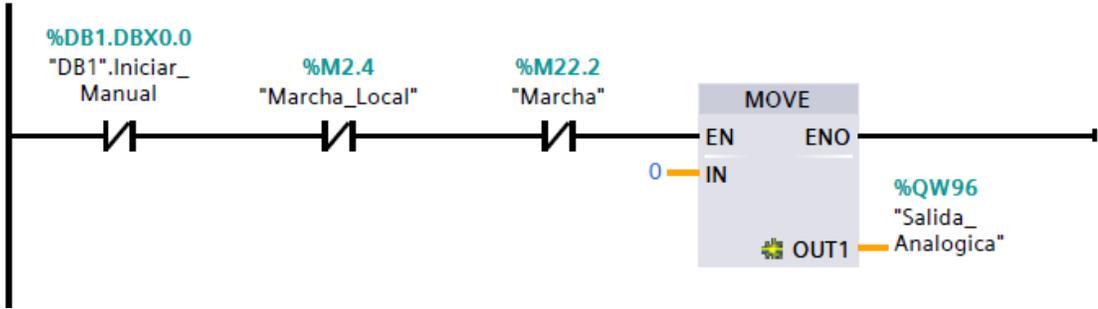
Actividad	MESES																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Selección de los equipos	■	■	■															
Adquisición y llegada de equipos				■	■	■	■	■										
Diseño de los esquemas eléctricos								■	■	■	■							
Diseño de los esquemas entradas y salidas											■	■	■	■				
Diseño del controlador PID											■	■	■	■				
Creación de interfaz de control en LabView											■	■	■	■				
Fase de pruebas														■	■	■	■	
Desarrollo del prototipo final																	■	■

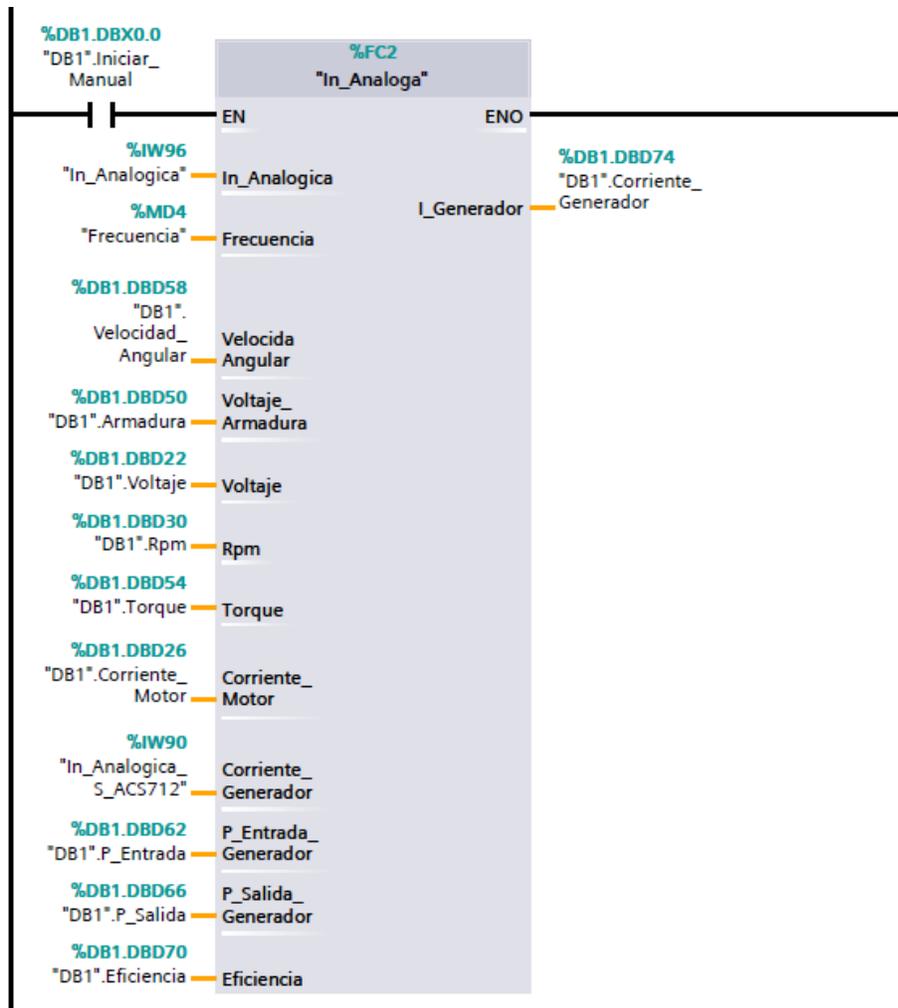
PROGRAMACIÓN DEL PLC EN LENGUAJE LADDER

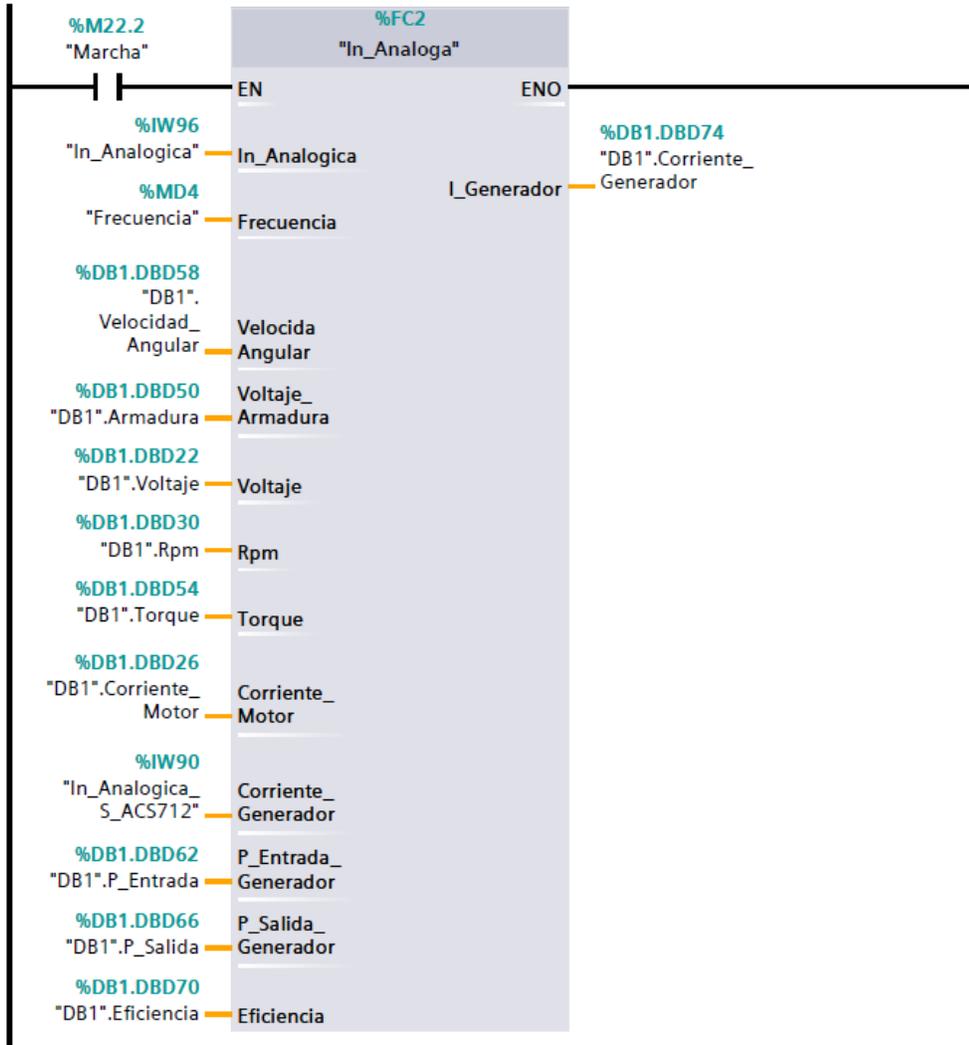


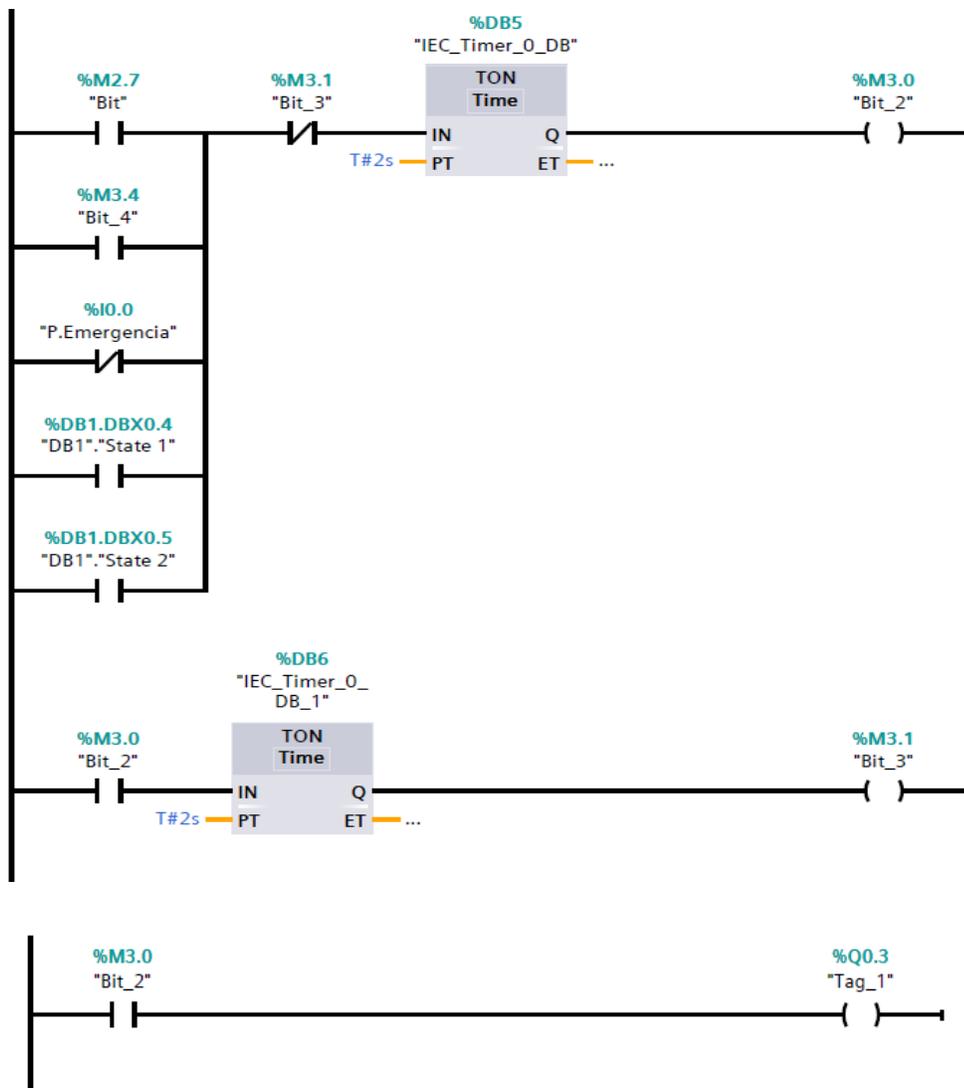












TABLAS DE CÁLCULO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS

Punto 1				
Ea	$V_t + \Sigma R \cdot I_a$	$119,9 + 0,8 * 1,3$	120,94	V
ED	$ I_{fmag} - I_{freal} $	$ 0,526 - 0,564 $	0,038	Amp
Peje	$\tau_{apl} \cdot \omega$	$2,3 * 189,54$	435,95	W
Pcu	$I_a^2 \cdot \Sigma R$	$1,3^2 * 0,8$	1,35	W
Pa	$E_a \cdot I_a$	$120,94 * 1,3$	157,22	W
Pmec	$Peje - Pa$	$435,95 - 157,22$	278,73	W
τ_{ind}	Pa / ω	$Pa / 189,54$	0,83	N.m
τ_{roz}	$\tau_{apl} - \tau_{ind}$	$2,3 - 0,83$	1,47	N.m
Psalida	$V_t \cdot I_L$	$119,9 * 1,3$	155,87	W
%η	$(P_{salida} / Peje) \cdot 100\%$	$(155,87 / 435,95) * 100\%$	35,75	%

Punto 2				
Ea	$Vt+\Sigma R.la$	$117,2+0,8*2$	118,8	V
ED	$ Ifmag-Ifreal $	$ 0,526-0,561 $	0,035	Amp
Peje	$\tau_{apl}.\omega$	$2,7*189,54$	511,77	W
Pcu	$la^2.\Sigma R$	$2^2*0,8$	3,20	W
Pa	$Ea.la$	$118,8*2$	237,60	W
Pmec	$Peje-Pa$	$511,77-237,60$	274,17	W
$\tau.ind$	Pa/ω	$237,60/189,54$	1,25	N.m
$\tau.roz$	$\tau_{apl}-\tau.ind$	$2,7-1,25$	1,45	N.m
Psalida	$Vt.IL$	$117,2*2$	234,4	W
$\% \eta$	$(Psalida/Peje).100\%$	$(234,4/511,77)*100\%$	45,8	%

Punto 3				
Ea	$Vt+\Sigma R.la$	$114,5+0,8*2,4$	116,42	V
ED	$ Ifmag-Ifreal $	$ 0,501-0,558 $	0,057	Amp
Peje	$\tau_{apl}.\omega$	$3*187,97$	563,92	W
Pcu	$la^2.\Sigma R$	$2,4^2*0,8$	4,61	W
Pa	$Ea.la$	$116,42*2,4$	279,41	W
Pmec	$Peje-Pa$	$563,92-279,41$	284,51	W
$\tau.ind$	Pa/ω	$279,41/187,97$	1,49	N.m
$\tau.roz$	$\tau_{apl}-\tau.ind$	$3-1,49$	1,51	N.m
Psalida	$Vt.IL$	$114,5*2,4$	274,8	W
$\% \eta$	$(Psalida/Peje).100\%$	$(274,8/563,92)*100\%$	48,73	%

Punto 4				
Ea	$Vt+\Sigma R.la$	$113,3+0,8*2,8$	115,54	V
ED	$ Ifmag-lfreal $	$ 0,501-0,558 $	0,057	Amp
Peje	$\tau_{apl}.\omega$	$3,4*188,70$	641,60	W
Pcu	$la^2.\Sigma R$	$2,8^2*0,8$	6,27	W
Pa	$Ea.la$	$115,54*2,8$	323,51	W
Pmec	$Peje-Pa$	$641,60-323,51$	318,08	W
$\tau.ind$	Pa/ω	$323,51/188,70$	1,71	N.m
$\tau.roz$	$\tau_{apl}-\tau_{ind}$	$3,4-1,71$	1,69	N.m
Psalida	$Vt.IL$	$113,3*2,8$	317,24	W
%η	$(Psalida/Peje).100\%$	$(317,24/641,60)*100\%$	49,45	%

Punto 5				
Ea	$Vt+\Sigma R.la$	$111,3+0,8*3,2$	113,86	V
ED	$ Ifmag-lfreal $	$ 0,47-0,557 $	0,087	Amp
Peje	$\tau_{apl}.\omega$	$3,6*187,97$	676,70	W
Pcu	$la^2.\Sigma R$	$3,2^2*0,8$	8,19	W
Pa	$Ea.la$	$113,86*3,2$	364,35	W
Pmec	$Peje-Pa$	$676,70-364,35$	312,35	W
$\tau.ind$	Pa/ω	$364,35/187,97$	1,94	N.m
$\tau.roz$	$\tau_{apl}-\tau_{ind}$	$3,6-1,94$	1,66	N.m
Psalida	$Vt.IL$	$111,3*3,2$	356,16	W
%η	$(Psalida/Peje).100\%$	$(356,16/676,70)*100\%$	52,63	%

Punto 6				
Ea	$Vt+\Sigma R.la$	$109,8+0,8*3,7$	112,76	V
ED	$ Ifmag-lfreal $	$ 0,47-0,555 $	0,085	Amp
Peje	$\tau_{apl}.\omega$	$4*188,81$	755,24	W
Pcu	$la^2.\Sigma R$	$3,7^2*0,8$	10,95	W
Pa	$Ea.la$	$112,76*3,7$	417,21	W
Pmec	$Peje-Pa$	$755,24-417,21$	338,03	W
$\tau.ind$	Pa/ω	$417,21/188,81$	2,21	N.m
$\tau.roz$	$\tau_{apl}-\tau_{ind}$	$4-2,21$	1,79	N.m
Psalida	$Vt.IL$	$109,8*3,7$	406,26	W
%η	$(Psalida/Peje).100\%$	$(406,26/755,24)*100\%$	53,79	%

Punto 7				
Ea	$V_t + \Sigma R \cdot I_a$	$107,8 + 0,8 \cdot 4,2$	111,16	V
ED	$ I_{f\text{mag}} - I_{f\text{real}} $	$ 0,47 - 0,553 $	0,083	Amp
Peje	$\tau_{\text{apl}} \cdot \omega$	$4,3 \cdot 188,81$	811,88	W
Pcu	$I_a^2 \cdot \Sigma R$	$4,2^2 \cdot 0,8$	14,11	W
Pa	$E_a \cdot I_a$	$111,16 \cdot 4,2$	466,87	W
Pmec	$\text{Peje} - P_a$	$811,88 - 466,87$	345,01	W
τ_{ind}	P_a / ω	$466,87 / 188,81$	2,47	N.m
τ_{roz}	$\tau_{\text{apl}} - \tau_{\text{ind}}$	$4,3 - 2,47$	1,83	N.m
Psalida	$V_t \cdot I_L$	$107,8 \cdot 4,2$	452,76	W
$\% \eta$	$(P_{\text{salida}} / P_{\text{jeje}}) \cdot 100\%$	$(452,76 / 811,88) \cdot 100\%$	55,77	%

Punto 8				
Ea	$V_t + \Sigma R \cdot I_a$	$105 + 0,8 \cdot 4,9$	108,92	V
ED	$ I_{f\text{mag}} - I_{f\text{real}} $	$ 0,454 - 0,552 $	0,098	Amp
Peje	$\tau_{\text{apl}} \cdot \omega$	$4,8 \cdot 189,12$	907,79	W
Pcu	$I_a^2 \cdot \Sigma R$	$4,9^2 \cdot 0,8$	19,21	W
Pa	$E_a \cdot I_a$	$108,92 \cdot 4,9$	533,71	W
Pmec	$\text{Peje} - P_a$	$907,79 - 533,71$	374,09	W
τ_{ind}	P_a / ω	$533,71 / 189,12$	2,82	N.m
τ_{roz}	$\tau_{\text{apl}} - \tau_{\text{ind}}$	$4,8 - 2,82$	1,98	N.m
Psalida	$V_t \cdot I_L$	$105 \cdot 4,9$	514,5	W
$\% \eta$	$(P_{\text{salida}} / P_{\text{jeje}}) \cdot 100\%$	$(514,5 / 907,79) \cdot 100\%$	56,68	%

TABLAS DE MEDICIONES

t(mseg)	V_motor	I_motor	Frec	RPM	V_arm	I_arm	T_arm	P_in	P_out	W
0	173.79	6.27	43.83	1314.77	60.75	3.59	0.83	137.68	218.04	114.05
1	174.24	6.25	43.94	1318.19	60.92	3.59	0.83	138.04	218.85	114.05
2	174.19	6.25	43.91	1317.82	60.9	3.59	0.83	138	218.58	114.05
3	174.24	6.25	43.92	1318.13	60.91	3.59	0.83	138.03	218.52	114.01
4	174.07	6.26	43.91	1316.91	60.87	3.59	0.83	137.94	218.41	114.05
5	174.09	6.26	43.9	1317.03	60.86	3.59	0.83	137.92	218.56	114
6	173.65	6.27	43.77	1313.73	60.7	3.59	0.83	137.57	218.07	114.05
7	173.86	6.26	43.85	1315.26	60.77	3.598	0.83	137.73	218.13	114.08
8	174.07	6.26	43.9	1316.91	60.85	3.59	0.83	137.91	218.52	114.02
9	174.44	6.24	44	1319	60.99	3.59	0.83	138.19	218.9	114.08
10	174	6.26	43.91	1316.36	60.83	3.59	0.83	137.85	218.43	114.14
11	174.03	6.26	43.88	1316.6	60.84	3.59	0.83	137.87	218.47	114.02
12	174.4	6.24	43.98	1319.41	60.98	3.59	0.83	138.17	218.96	114.05
13	173.77	6.27	43.82	1314.59	60.74	3.59	0.83	137.66	218.11	114.06
14	173.78	6.27	43.82	1314.71	60.75	3.59	0.83	137.68	218.14	114.05
15	173.24	6.29	43.73	1310.62	60.61	3.59	0.83	137.38	217.52	114.05
16	174.43	6.24	43.98	1319.59	60.98	3.59	0.83	138.17	219.1	114.05
17	174.28	6.25	43.99	1318.43	60.99	3.59	0.83	138.19	218.68	114.12

t(mseg)	V_motor	I_motor	Frec	RPM	V_arm	I_arm	T_arm	P_in	P_out	W
0	171.96	6.33	43.32	1300.91	60.07	0	0.84	136.23	0	113.94
1	171.61	6.35	43.28	1298.28	59.94	0	0.84	135.96	0	113.94
2	171.64	6.35	43.28	1298.53	59.96	0	0.84	135.98	0	113.94
3	172.09	6.33	43.35	1301.89	60.12	0	0.84	136.33	0	113.93
4	171.73	6.34	43.3	1299.14	59.99	0	0.84	136.05	0	114.05
5	171.91	6.34	43.31	1300.54	59.99	0	0.84	136.05	0	114.05
6	171.77	6.34	43.27	1299.51	59.94	0	0.84	135.95	0	114.05
7	171.62	6.35	43.28	1298.35	59.95	0	0.84	135.96	0	114.05
8	171.81	6.34	43.33	1299.81	60.02	0	0.84	136.12	0	113.93
9	172.06	6.33	43.34	1301.64	60.03	0	0.84	136.15	0	114.05
10	171.91	6.34	43.3	1300.54	59.97	0	0.84	136.02	0	114.05
11	171.95	6.33	43.31	1300.85	59.99	0	0.84	136.06	0	114.05
12	172.24	6.32	43.39	1303.05	60.1	0	0.84	136.3	0	114.05
13	171.71	6.34	43.25	1299.02	59.91	0	0.84	135.88	0	114.05

14	171.37	6.36	43.17	1296.45	59.85	0	0.84	135.76	0	113.93
15	171.79	6.34	43.27	1299.63	60.01	0	0.84	136.1	0	113.91
16	171.06	6.37	43.09	1294.07	59.67	0	0.84	135.37	0	114.05
17	171.43	6.35	43.18	1296.94	59.81	0	0.84	135.66	0	114.05