

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CAMBIADORES DE VELOCIDAD
PARA EL REGULADOR AUTOMÁTICO DE VELOCIDAD DEL
GRUPO MOTOR - GENERADOR DEL LABORATORIO
FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**CAMBIADOR DE VELOCIDAD PARA MODELO DE TURBINA A
VAPOR IMPLEMENTADO EN EL REGULADOR DE VELOCIDAD
DEL GRUPO MOTOR-GENERADOR**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

KEVIN ALEXANDER PAGUAY CALI

kevin.paguay@epn.edu.ec

DIRECTOR: Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.

jesus.jativa@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, KEVIN ALEXANDER PAGUAY CALI, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

KEVIN ALEXANDER PAGUAY CALI

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por KEVIN ALEXANDER PAGUAY CALI, bajo mi supervisión.

Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

KEVIN ALEXANDER PAGUAY CALI

Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.

DEDICATORIA

A Dios por siempre protegerme y estar a mi lado, en los buenos y en los malos momentos

*A mi querido padre Raúl y a mi madre Consuelo que con su esfuerzo, trabajo, sacrificio y
humildad me enseñaron que todo en la vida es posible*

A mi hermano Santiago que siempre me inspiró a estudiar esta hermosa profesión

AGRADECIMIENTO

A Dios por siempre protegerme y brindarme la sabiduría necesaria para culminar esta carrera, ya que, sin él no hubiera sido posible.

A mi padre y a mi madre que gracias a su apoyo moral y económico me permitieron estudiar esta profesión y además son mi fuente de inspiración para nunca rendirme y siempre salir adelante.

A Santiago que además de ser un hermano, fue un padre para mí, que siempre forma parte de todas las decisiones de mi vida hasta el día de hoy, gracias por los consejos y siempre incentivarne a ser el mejor.

A mi querido amigo Fausto Escobar por su orientación profesional, académica y personal, me ayudaron a demostrarme que soy capaz de conseguir todo lo que me proponga.

A mi cuñada Mayrita gracias por su cariño, confianza, apoyo incondicional y por siempre estar cuando la necesito.

A mi novia Katherine por acompañarme en estos años de vida estudiantil, por su paciencia y sus palabras de aliento que me ayudaron a cumplir todos mis objetivos.

Al Ing. Juan Galarza por compartirme sus conocimientos para desarrollar y culminar de manera exitosa este trabajo.

Y al Dr. Jesús Játiva por brindarme su amistad y sus asesorías para terminar este trabajo en el tiempo establecido, y además por darme la oportunidad de realizar las prácticas preprofesionales y desarrollar este trabajo en el Laboratorio Físico de SEP y así fortalecer mis conocimientos aprendidos durante estos años de estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Generador sincrónico	2
1.4.2 Motor de DC	4
1.4.3 Control de velocidad del motor DC	9
1.4.4 Regulador Automático de Velocidad	11
1.4.5 Medidor de voltaje	13
1.4.6 Medidor de corriente.....	14
1.4.7 Medición de factor de potencia	14
1.4.8 Tipos de Microcontroladores.....	15
2 METODOLOGÍA	17
2.1 Rediseño del Regulador Automático de Velocidad del Laboratorio Físico de SEP.....	17
2.1.1 Condiciones Operativas.....	17
2.1.2 Rediseño de hardware.....	19
2.1.3 Rediseño de Software	25
2.2 Vatímetro.....	40
2.2.1 Medidor de Voltaje.....	40
2.2.2 Medidor de corriente.....	41
2.2.3 Medición del Factor de Potencia.....	42
2.2.4 Cálculo de Potencia Aparente, Activa y Reactiva	44
2.2.5 Transmisión de datos en la Pantalla Nextion	44
2.2.6 Adquisición de Datos	45
3 RESULTADOS	46

3.1	Pruebas para determinar las características estáticas del grupo motor - generador operando el GOV como turbina a vapor	46
3.1.1	Prueba en vacío	47
3.1.2	Desconexión Abrupta de carga.....	47
3.1.3	Prueba de Decaimiento	49
3.1.4	Prueba del Estatismo.....	51
3.1.5	Conexión Abrupta de Carga	53
3.2	Pruebas para determinar las características dinámicas del grupo motor - generador operando el GOV como turbina a vapor	54
3.2.1	Prueba en Vacío.....	55
3.2.2	Prueba de pasos de carga.....	56
3.2.3	Banda muerta.....	62
4	CONCLUSIONES	64
5	RECOMENDACIONES.....	65
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
7	ANEXOS.....	68

RESUMEN

El presente trabajo es el rediseño del hardware y software del regulador automático de velocidad existente en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP).

En el hardware se encuentra la placa de control y potencia, que a través de una fuente trifásica permite conseguir la señal modular ancho de pulso (PWM) y así obtener los disparos de los tiristores SCR del circuito rectificador controlado de 6 pulsos. En la parte del software se cambia la programación de la tarjeta STM32F407G de Simulink – Matlab a un lenguaje de programación en C de libre acceso que es Arduino IDE y así sintonizar un modelo de turbina a vapor en el motor DC con la aplicación PID Tuner.

Además, se construye e implementa un medidor de potencia en el generador sincrónico del grupo motor – generador con el objetivo de calcular la potencia por cada fase, a través de la medición de voltaje, corriente y factor de potencia.

A fin de comprobar el correcto funcionamiento del GOV como modelo de turbina a vapor, se realizan las pruebas de vacío, conexión y desconexión de carga, estatismo y banda muerta.

PALABRAS CLAVE: Regulador automático de velocidad, Modelo de central a vapor, Placa de control y potencia, Arduino IDE, Grupo motor DC-generador sincrónico.

ABSTRACT

The present work is the redesign of the hardware and software of the existing automatic speed regulator in the Physical Laboratory of Electrical Power Systems (SEP).

The hardware contains the control and power board, which through a three-phase source allows the pulse width modular signal (PWM) to be obtained and thus obtain the triggering of the SCR thyristors of the 6-pulse controlled rectifier circuit. In the software part, the programming of the STM32F407G card from Simulink - Matlab is changed to a freely accessible C programming language, which is Arduino IDE, and thus tune a steam turbine model in the DC motor with the PID Tuner application.

In addition, a power meter is built and implemented in the synchronous generator of the engine-generator group with the objective of calculating the power for each phase, through the measurement of voltage, current and power factor.

To verify the correct functioning of the GOV as a steam turbine model, vacuum, load connection and disconnection, static and dead band tests are carried out.

KEYWORDS: Automatic speed regulator, Steam power plant model, Control and power board, Arduino IDE, DC motor-synchronous generator group.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El regulador automático de velocidad del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia fue construido en un trabajo de titulación anterior. Este equipo alimenta al motor con voltaje de campo constante, obtenido de la rectificación en un puente de diodos monofásicos, y controla su velocidad a través de ajustar el voltaje de armadura utilizando un circuito rectificador controlado de 6 pulsos con SCR.

Para generar los disparos hacia los SCR se implementa un controlador PI en la tarjeta microcontroladora STM32F407G. La tarjeta envía una señal a la placa de control y potencia y genera una señal modulada de ancho de pulso para disparar los SCR y tener un control de voltaje de la armadura y así controlar la velocidad del motor DC.

En el presente proyecto se realiza el rediseño del software para un modelo de turbina a vapor cambiando la programación de las bibliotecas Waijung de Matlab a un lenguaje de programación de acceso libre y mayormente utilizado en los microcontroladores como es la programación C – Arduino IDE, además se realiza el rediseño y construcción del hardware, como es la placa de control y potencia que tiene como implementación la medición del encoder con mayor resolución, a fin de controlar la velocidad del motor y mantenerla en 1200 r.p.m.

Por otro lado, se diseña y construye el hardware y software de un medidor de potencia que toma las señales de corriente y voltaje, para luego con dichos valores en el microcontrolador ESP32, calcula el factor de potencia, las potencias activa, reactiva y aparente de cada fase, para luego en una pantalla NEXTION presentar las mediciones en tiempo real. Este medidor de potencia servirá para realizar el control secundario de frecuencia en un proyecto a futuro.

1.1 Objetivo general

Rediseñar el software y hardware del regulador automático de velocidad para operación en modo aislado del modelo de turbina a vapor, utilizando lenguaje C-Arduino, incluyendo la medición de velocidad en la placa de control y potencia, y diseñar un medidor de potencia por fase para el generador sincrónico del grupo motor-generador del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia.

1.2 Objetivos específicos

1. Diseñar y desarrollar el software en lenguaje C-Arduino del regulador automático de velocidad de una turbina a vapor.

2. Diseñar y construir el hardware del regulador automático de velocidad para turbina a vapor, incorporando la medición de velocidad tomada de un nuevo encoder de mayor velocidad de muestreo.
3. Diseñar e implementar el software y hardware de un medidor de voltaje, corriente y factor de potencia para el cálculo de la potencia activa y reactiva y su visualización en tiempo real.
4. Realizar pruebas de funcionamiento del regulador de velocidad y medidor de potencia del grupo motor DC – generador.

1.3 Alcance

El alcance del presente proyecto trata del rediseño del software de un modelo de turbina a vapor utilizando lenguaje C-Arduino, en lugar del anterior código de la biblioteca Waijung de Matlab, así como el rediseño y construcción del hardware del regulador de velocidad para incluir la medición de un nuevo encoder de mayor velocidad de adquisición de muestras en la placa de control y potencia, que permita mayor precisión de las señales de control; así como, el diseño y construcción de un medidor trifásico de potencia activa y reactiva en tiempo real para el generador sincrónico, que permita el desarrollo de un proyecto futuro de control secundario de frecuencia.

El GOV permitirá regular la velocidad del motor DC a su valor nominal de 1200 r.p.m, a través de un controlador tipo PI implementado en la tarjeta microcontroladora STM32F407 utilizando lenguaje C-Arduino. La sintonización del controlador se realizará utilizando el paquete computacional Matlab. Por otro lado, el conjunto de software y hardware del medidor de potencia permitirá visualizar corriente, factor de potencia, potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva y voltaje en tiempo real que entrega el generador sincrónico en la pantalla Nextion NX4832T035 del GOV.

Una vez construido el regulador automático de velocidad y medidor de potencia se implementará en el grupo motor-generador y se realizarán las pruebas en modo aislado.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Generador sincrónico

1.4.1.1 Principio de funcionamiento

Los generadores sincrónicos como se muestra en la Figura 1.1, son máquinas que permiten transformar la potencia mecánica proveniente del motor primario en potencia

eléctrica. Además, el devanado de armadura o inducido se encuentra en el estator y el devanado de excitación o campo en el rotor. [1]

El funcionamiento de un generador sincrónico se basa en alimentar con corriente continua al devanado de excitación, consecuentemente se genera un campo magnético, que al hacer girar el rotor mediante un motor produce un campo magnético variable en el tiempo en los devanados del inducido y que al suponer una distribución del flujo sinusoidal y velocidad constante del rotor induce voltaje trifásico en los devanados del estator cumpliéndose así la Ley de Faraday, además la frecuencia del voltaje en Hz es la misma que la velocidad del rotor. [1]



Figura 1.1. Generador sincrónico del Laboratorio Físico de SEP

1.4.1.2 Parámetros del generador sincrónico

Tabla 1.1 Datos del generador sincrónico del Laboratorio Físico de SEP [2]

Parámetro	Magnitud	Unidad
Voltaje	254,023	V
Corriente de Campo	10,77	A
Corriente de Armadura	6,51	A
Factor de Potencia	0,7536 (-)	-
Potencia Aparente	9,899	kVA
Reactancia de eje directo X_d	18,32	Ω
Reactancia de eje de cuadratura X_q	17,51	Ω
Velocidad	1200	r.p.m
Frecuencia	60	Hz

1.4.2 Motor de DC

Un motor de corriente directa (Direct Current) convierte la energía eléctrica en mecánica. Estos tipos de motores se utilizan en automóviles, camiones y aviones, además son aplicables cuando se requiere tener un control de la velocidad en diversos campos de la industria.

1.4.2.1 Partes constitutivas

A continuación, se describen las partes importantes del motor DC.

- **Estator**

El estator es la parte fija del motor de corriente directa y está constituido por la estructura o carcasa, los polos e interpolos de campo y el devanado de campo.

Carcasa: es el soporte mecánico de la máquina de corriente continua como se muestra en la Figura 1.2, formado por laminaciones delgadas de acero y cuya función es permitir que el flujo magnético de los polos e interpolos tengan una trayectoria sumamente transitable.

[1]



Figura 1.2. Carcasa del estator [2]

Polos e interpolos de campo: los polos se ubican dentro de la estructura y los interpolos entre los polos principales como se muestra en la Figura 1.3 y están hechos de laminaciones delgadas para disminuir las pérdidas magnéticas. [3]

Devanados de campo: estos devanados se montan sobre los polos e interpolos y son los que generan el campo magnético uniforme. Existe dos tipos de devanados, los devanados shunt que se conectan en paralelo con los devanados de la armadura y los devanados serie que se conecta en serie con los devanados de la armadura. [3]



Figura 1.3. Partes constitutivas del estator del motor DC [2]

- **Rotor**

El rotor es la parte móvil y está constituida por las siguientes partes más importantes:

Eje del rotor y devanado de campo: es un soporte formado de una barra de acero como se muestra en la Figura 1.4 y sobre él se construye un núcleo laminado con placas de acero para montar los devanados del campo. [4]



Figura 1.4. Eje del rotor [2]

Devanados de armadura: se conoce también como devanado de inducido que es la parte más esencial del motor, ya que, en este devanado se induce la fuerza electromotriz y se genera el par para hacer girar al motor. Pueden ser de dos tipos el devanado imbricado y el ondulado. [3]

Conmutador o delgas del colector: está ubicado sobre el eje del rotor y está formado por barras de cobre y aislado por láminas de mica como se muestra en la Figura 1.5 cumple la función de transformar el voltaje alterno inducido en un voltaje en una sola dirección. [4]



Figura 1.5. Conmutador [2]

Escobillas: se le ubican de manera fija sobre el conmutador con la ayuda de la portaescobillas como se muestra en la Figura 1.6 y es la que permite conectar eléctricamente con los devanados de armadura y los circuitos externos. [4]



Figura 1.6. Escobillas del motor DC [2]

1.4.2.2 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un motor de corriente directa se basa en conectar una fuente de voltaje DC en los terminales de las bobinas de la armadura como se muestra en la Figura 1.7, por el cual fluirá una corriente que al interactuar con el campo magnético uniforme creado por los devanados de campo provoca una fuerza magnética o también denominada fuerza de Lorentz como se expresa en (1.1), que es la responsable que se produzca un par impulsor haciendo que el motor gire en sentido de las manecillas del reloj. [3]

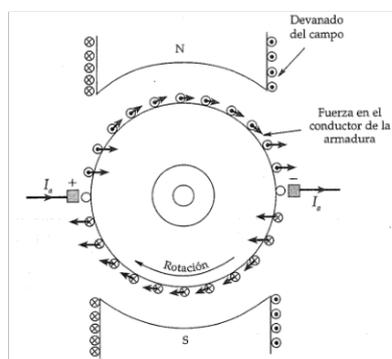


Figura 1.7. Fuerza magnética en los devanados de la armadura de un motor DC [3]

La ecuación de la fuerza de Lorentz es:

$$\vec{F} = \int_C i \, d\vec{l} \times \vec{B} \quad [N] \quad (1.1)$$

Donde:

\vec{B} : la densidad de flujo magnético en $[\frac{Wb}{m^2}]$.

l : es la longitud del conductor en [m].

i : corriente que circula por el conductor en [A].

1.4.2.3 Conexión de las bobinas del estator y rotor

El conexionado interno de las bobinas del estator y la armadura que se muestra en la Figura 1.8 y 1.9, es del motor DC existente en el Laboratorio Físico de SEP.

Conexión de las bobinas del estator

En la Figura 1.8 se muestra la conexión de las bobinas de campo entre los terminales E-F y la bobina serie entre G-H.

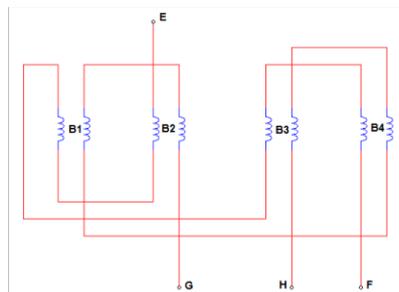


Figura 1.8. Conexión de las bobinas del estator del motor DC [2]

Conexión de las bobinas de armadura

En la Figura 1.9 se muestra la conexión de las bobinas de armadura con las escobillas donde las escobillas w-x se encuentra conectado al terminal A y la escobilla y-z se encuentra conectado al terminal B de la armadura.

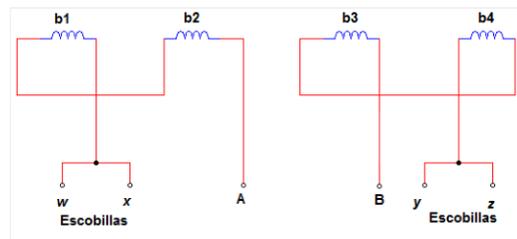


Figura 1.9. Conexión de las bobinas de la armadura del motor DC [2]

Finalmente, el motor de DC del laboratorio Físico de SEP se encuentra conectado de forma compuesta con fuentes de excitación independiente tanto para el devanado de armadura y campo para el control de velocidad de la máquina motriz como se muestra en la Figura 1.10b.

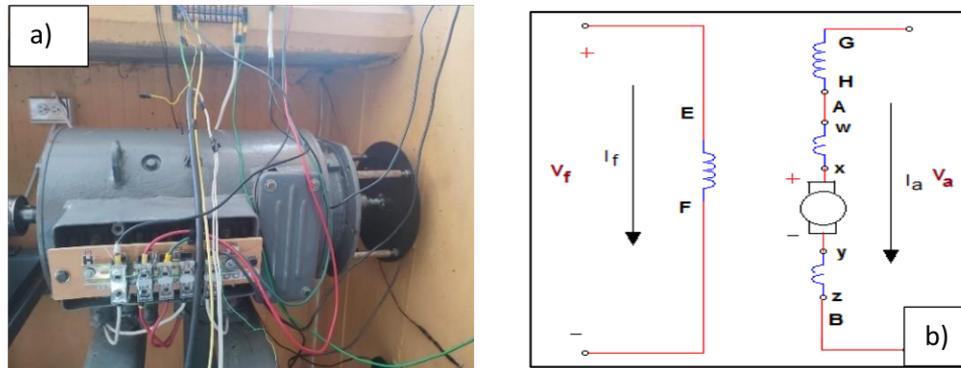


Figura 1.10. Motor DC del Laboratorio Físico de SEP a) máquina física b) circuito eléctrico [2]

1.4.2.4 Parámetros del motor DC

Tabla 1.2. Valores del motor DC para que el generador opere a velocidad sincrónica [2]

Parámetro	Magnitud	Unidad
Potencia	10	Hp
Voltaje de Armadura	133	V_{DC}
Voltaje de Campo	130	V_{DC}
Corriente de Armadura	4,8	A
Corriente de Campo	5,15	A
Velocidad	1200	r.p.m
Tipo de conexión	Compuesto Aditivo	-

Tabla 1.3. Valores de inductancia e impedancia de los devanados [2]

Parámetro	Impedancia [Ω]	Resistencia [Ω]	Inductancia [mH]
Campo	$2630,5 \angle 55.18^\circ$	1502,015	0,00559
Serie	$0,49668 \angle 51.48^\circ$	0,30932	1,0308
Armadura con interpolos	$2,9661 \angle 73.87^\circ$	0,8240	7,5538

1.4.3 Control de velocidad del motor DC

El motor DC que se muestra la Figura 1.10, los devanados de campo y armadura están excitados de manera independiente, para el cual el voltaje de campo obtenido a partir de un rectificador no controlado AC-DC de puente de diodos se mantiene constante. La velocidad se controla desde el voltaje de armadura a través de un rectificador controlado de 6 pulsos.

Rectificador no controlado AC-DC

El rectificador no controlado AC-DC es capaz de convertir el voltaje sinusoidal en un voltaje de corriente continua, a partir de un puente rectificador de diodos. El principio de funcionamiento es polarizar directamente los diodos D_1 y D_2 con el ciclo positivo de la señal sinusoidal de entrada y luego al D_3 y D_4 con el ciclo negativo y así tener un voltaje rectificado de onda completa de ciclo positivo como se muestra en la Figura 1.11b. [5]

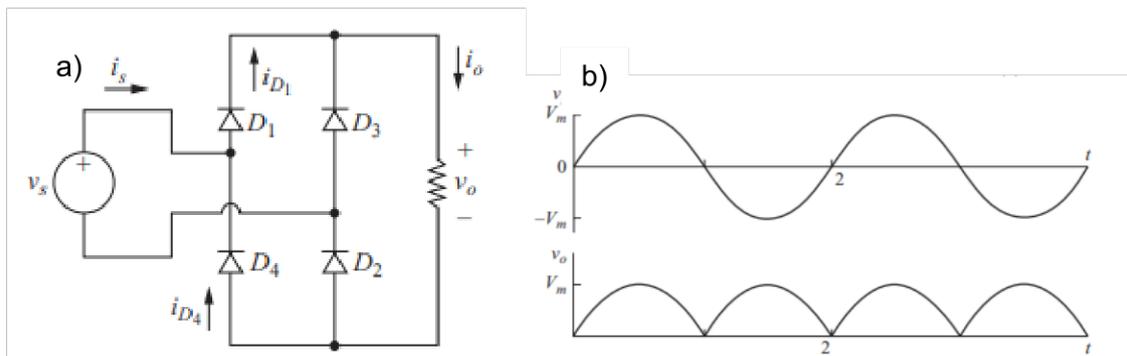


Figura 1.11. Rectificador con puente de diodos a) circuito b) señal de entrada y salida [5]

Rectificador controlado AC-DC

Para regular la velocidad se realiza mediante un control de fase en la armadura del motor, utilizando un rectificador controlado de 6 pulsos como se muestra en la Figura 1.12, en razón de que se reducen las pérdidas en la armadura. [6]

El rectificador controlado de 6 pulsos está compuesto de 6 tiristores, dos para cada fase: uno para polarizar al diodo controlado en el ciclo positivo y el otro para polarizar al diodo en el ciclo negativo; además, se utilizan tiristores SCR para controlar la conducción de la corriente a través de un ángulo de disparo α , que puede ir de 0 a 90° . En cada ciclo, cada SCR puede conducir por un intervalo de 120° , sin importar el ángulo con el que se dispara al SCR. [6]

El principio de funcionamiento de este circuito se puede describir a partir de la Figura 1.13, en el cual el cruce de las fases es la referencia para el ángulo de disparo, es decir a partir

de 30° , entonces cuando el ángulo es $\alpha + 30^\circ$ el tiristor T1 se activa y comienza a conducir por un intervalo de 120° , consecuentemente cuando el ángulo se encuentra entre $30^\circ + \alpha$ y $90^\circ + \alpha$ conduce tanto el T1 y T6 energizando a la carga con un voltaje de línea de V_{ab} , luego en el siguiente intervalo de $90^\circ + \alpha$ y $150^\circ + \alpha$ conduce T1 y T2 energizando a la carga con un voltaje de línea V_{ac} y así consecutivamente con los siguientes diodos controlados, obteniendo como resultado en la carga una corriente continua. [6]

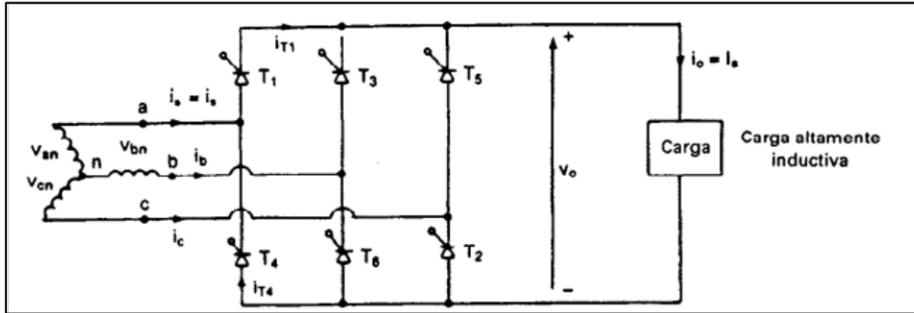


Figura 1.12. Circuito conversor AC-DC de 6 pulsos controlado [6]

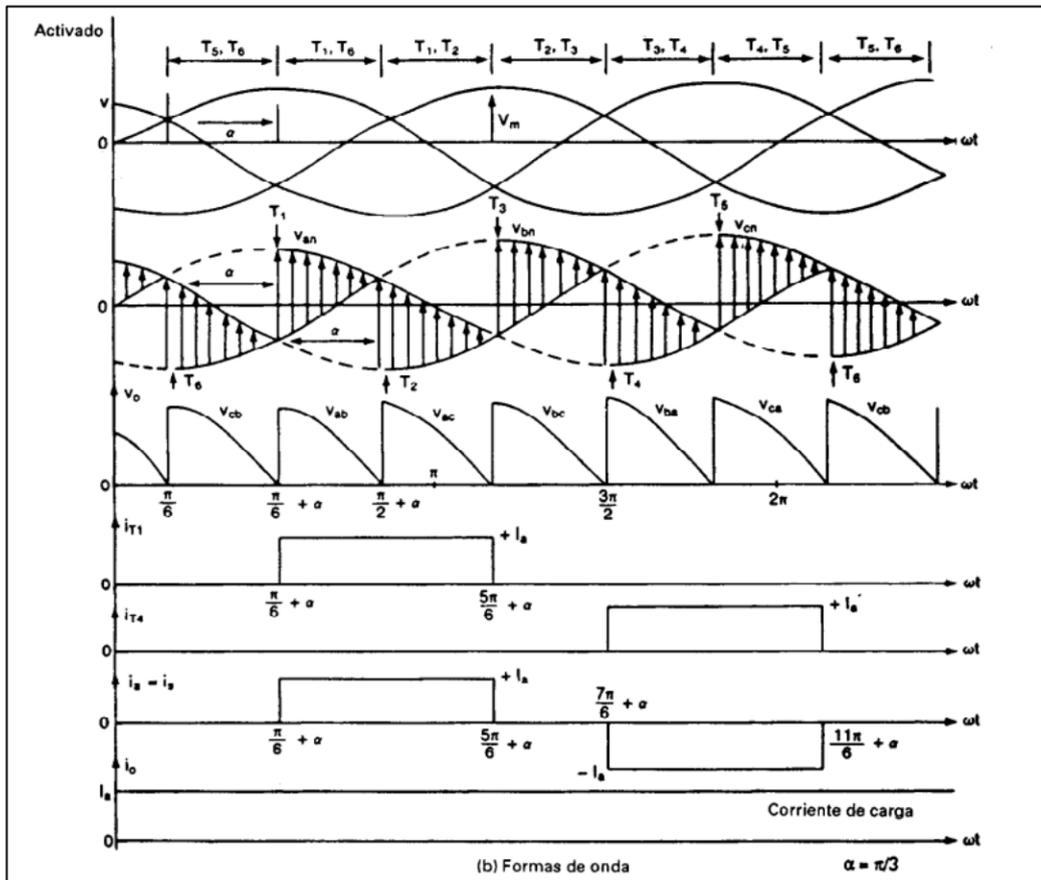


Figura 1.13. Señales del rectificador controlado de 6 pulsos [6]

1.4.4 Regulador Automático de Velocidad

1.4.4.1 Principio de funcionamiento

Para describir el funcionamiento de un regulador de velocidad (GOV) de forma más sencilla se utiliza el modo isócrono que se basa en controlar las válvulas para corregir la desviación de frecuencia. Para ello se necesita un lazo de realimentación negativa que compara el valor de la velocidad de la máquina motriz con el valor de referencia, hasta que la diferencia de las dos señales sea cero. Como se puede observar en la Figura 1.14, el control proporcional-integral se encuentran en el lazo de realimentación controlando la apertura de la válvula, eso implica que cuando el generador necesite entregar potencia eléctrica, las válvulas se abren haciendo que el torque de la turbina aumenta con lo que aumenta la potencia mecánica; en contraste, si el generador siente la pérdida de carga el regulador de velocidad está en la capacidad ordenar que las válvulas se cierren haciendo que el torque de la turbina disminuya. [7]

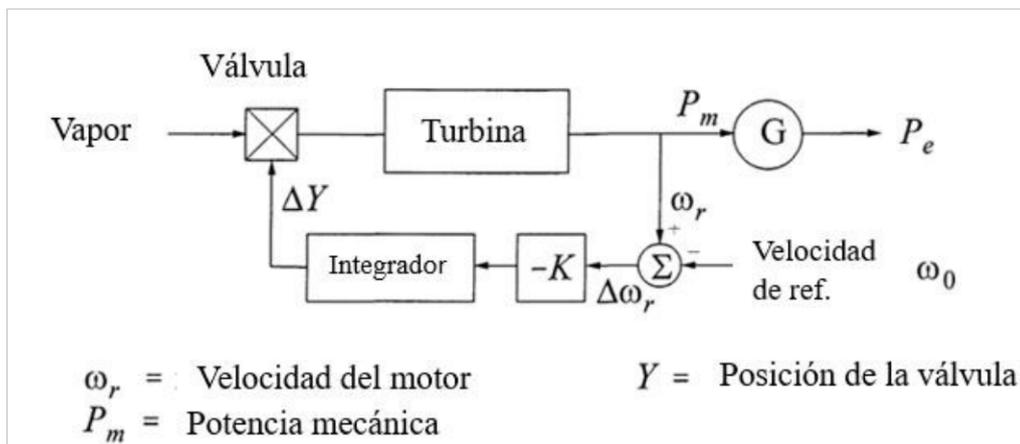


Figura 1.14. Regulador de velocidad en modo isócrono [8]

1.4.4.2 GOV con lazo de realimentación

El GOV con lazo de realimentación se diferencia del GOV en modo isócrono en que permite conectar varios generadores en paralelo. Esto es posible gracias a la conexión de un lazo de realimentación al control PI del GOV isócrono como se muestra en la Figura 1.15. En este modo, cada generador entrega una cierta cantidad de potencia eléctrica en función de su estatismo R y así en conjunto estabiliza la frecuencia, sin tener que competir entre ellos. [8]

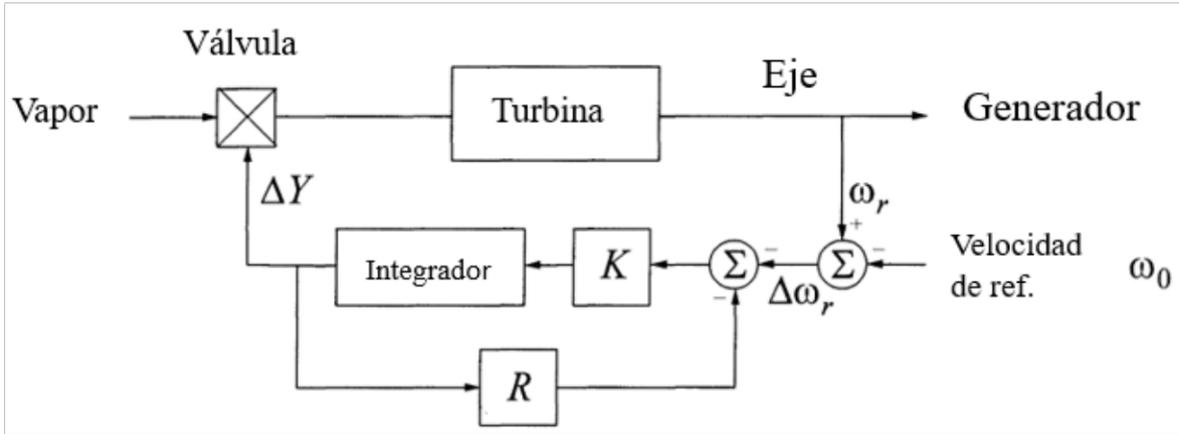


Figura 1.15. GOV con lazo de realimentación R [8]

Estatismo

La característica de regulación de la velocidad en estado estable como se muestra en la Figura 1.16, conocida como estatismo o droop, es una propiedad de cada generador. Esta característica indica la variación de frecuencia ante el aumento o pérdida de carga y puede ser expresada como:

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad [\text{p.u.}] \quad (1.2)$$

Donde:

Δf : desviación de frecuencia en [p.u.].

ΔP : variación de potencia ante el aumento o pérdida de carga en [p.u.].

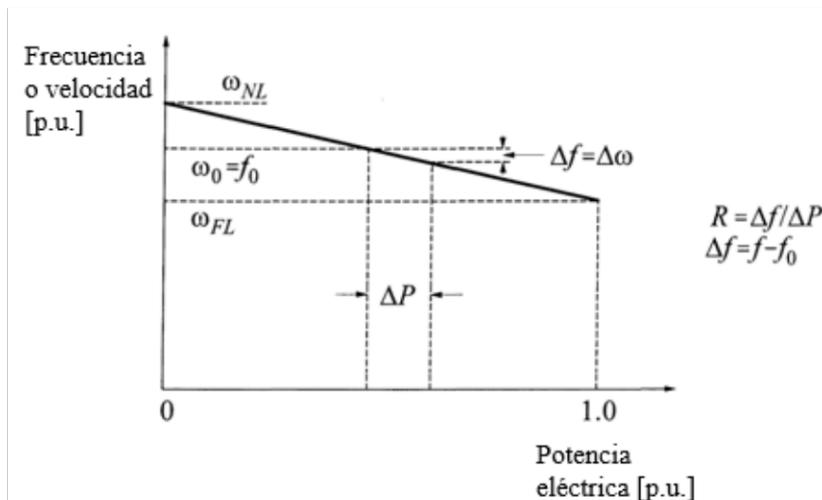


Figura 1.16. Curva de estado estable estatismo [8]

1.4.4.3 Modelo de turbina a vapor sin recalentamiento

Este tipo de turbina es el más básico, en la cual la apertura o cierre de la válvula está relacionada directamente con la potencia mecánica de la turbina. Se toma en cuenta el retraso del vapor en llegar de la válvula a la turbina, debido a la cámara de vapor como se muestra en la Figura. 1.17. [9]

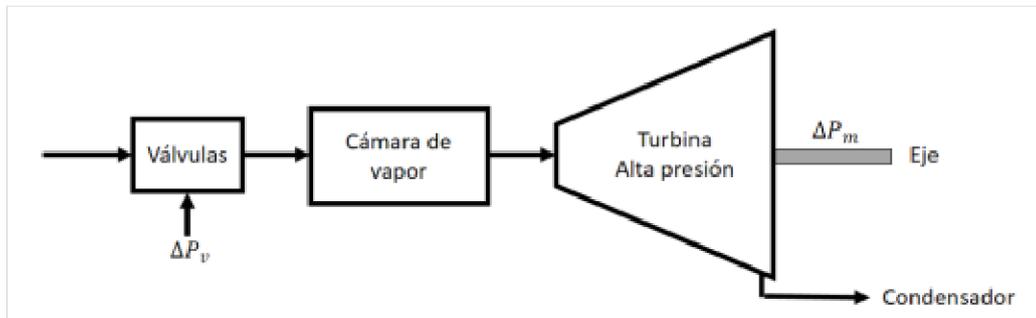


Figura 1.17. Estructura de la turbina a vapor sin recalentamiento [9]

Este tipo de turbina se modela como se muestra el diagrama de bloques de la Figura 1.18, el cual relaciona la posición de la apertura de las válvulas ΔP_v con la variación de potencia mecánica mediante la constante de tiempo T_{ch} de la cámara de vapor. [9]

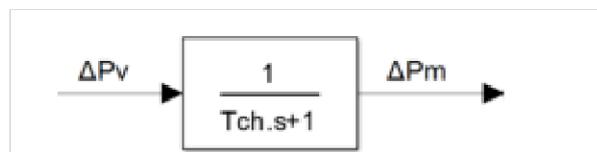


Figura 1.18. Función de transferencia de la turbina a vapor [9]

La constante T_{ch} puede tomar valores entre 0,2 y 0,5 s.

1.4.4.4 Regulación Primaria de Frecuencia

La regulación primaria de frecuencia es la respuesta inmediata del generador ante la pérdida o aumento de carga a través de su inercia, estatismo y amortiguamiento. Con esta respuesta se evita que se produzca una inestabilidad de frecuencia, logrando que la frecuencia se recupere en un nuevo punto, produciéndose una desviación de frecuencia.

La operación del regulador de velocidad es en modo paralelo, en el cual se debe recuperar la frecuencia dentro de los rangos admisibles en un lapso menor o cerca de 10 s.

1.4.5 Medidor de voltaje

El medidor de voltaje o conocido también como voltímetro es un instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos puntos.

Para medir el voltaje a través de un microcontrolador se debe utilizar un transformador de voltaje con el lado primario conectado a la red y el lado secundario al microcontrolador, a un voltaje admisible desde 0 a 3,3/5 V. Una forma de conseguir es acondicionando un circuito con un capacitor en serie y un divisor de voltaje para desplazar a la señal un valor de referencia 1,65 V cuando se alimenta con 3,3 o 2,5 V si se alimenta al microcontrolador con 5 V, a fin de digitalizar las señales a partir de la toma de muestras y así calcular el voltaje V_{RMS} con la ecuación (1.3). [10]

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2} \quad [V] \quad (1.3)$$

Donde:

V_{RMS} : valor eficaz de voltaje en [V].

V: valores de voltaje muestreados durante un ciclo en [V].

N: número de muestras.

1.4.6 Medidor de corriente

Este medidor es un transformador de corriente similar al transformador de voltaje, en el cual el devanado primario es el conductor que se desea medir la corriente y por inducción electromagnética se genera una corriente en el secundario del transformador y además se coloca una resistencia en paralelo porque el microcontrolador solo realiza lecturas de voltaje.

Luego transformar la señal de corriente digitalizada en una señal del voltaje por medio de una resistencia se aplica el mismo proceso del medidor de voltaje para calcular el valor de corriente RMS.

1.4.7 Medición de factor de potencia

La medición de factor de potencia se realiza a partir de conocer el desfase entre la señal voltaje y la corriente, para ello se debe detectar los cruces por cero en franco de subida tanto del voltaje y la corriente, tomado como referencia el voltaje y a partir de ello calcular el ancho de pulso entre las dos señales y aplicar la ecuación (1.4) para encontrar el ángulo en radianes

$$\phi = T_{vi} * \frac{2\pi}{16,66ms} \quad [rad] \quad (1.4)$$

Donde:

T_{vi} : Ancho de pulso entre la señal de voltaje y corriente en [ms].

ϕ : diferencia angular entre el voltaje y la corriente en [rad].

Finalmente, a partir de la ecuación (1.4) se calcula el factor de potencia:

$$fp = \cos(\phi) \quad (1.5)$$

1.4.8 Tipos de Microcontroladores

1.4.8.1 Arduino

Arduino es un software con entorno de desarrollador integrado que permite construir códigos de programación en el cual se puede crear, editar, simular, empaquetar y enviarlos a los demás microcontroladores, a través del puerto serial siempre que se descarguen las bibliotecas apropiadas para cada tarjeta. [11]

Arduino UNO

Esta tarjeta microcontroladora que se muestra en la Figura 1.19 pertenece a la familia UNO y tiene un Microchip ATmega4809, con 14 entradas/salidas digitales y 6 entradas analógicas, además tiene compatibilidad con otros chips de la familia ATmega. Es un dispositivo con doble procesador que permite utilizar WiFi y Bluetooth a la vez. [11]

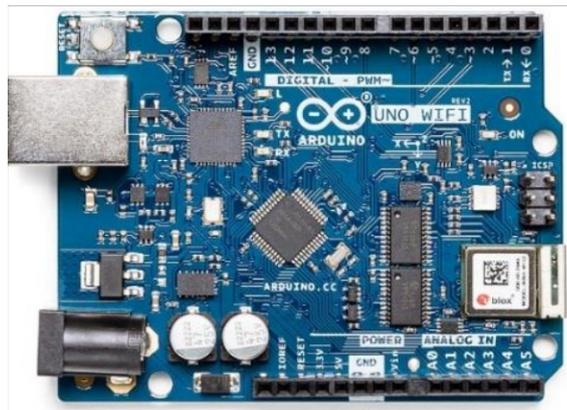


Figura 1.19. Tarjeta de Arduino UNO

1.4.8.2 STM32F407G

La STM32F407G – Discovery que se muestra en la Figura 1.20 es una tarjeta microcontroladora que ofrece un alto rendimiento ya que contiene un núcleo Cortex™ – M4 que trabaja a 168 MHz y es muy utilizado en aplicaciones industriales. [12]

Tiene una gran eficiencia energética, ya que durante la ejecución desde la memoria flash es de 238µA/MHz a 168 MHz, esto es posible gracias al proceso de 90nm de ST, el acelerador ART y un escalado dinámico de energía. [12]

Contiene una amplia conectividad, ya que cuenta con un puerto Ethernet MAC10/100 y la posibilidad conectar un sensor de cámara CMOS. [12]



Figura 1.20. Tarjeta microcontroladora STM32F407G-DISCOVERY [12]

1.4.8.3 ESP32-DevKitC

ESP32-DevKitC que se muestra en la Figura 1.21 forma parte de la familia ESP32, su tamaño es pequeño y de nivel básico, dos núcleos de hasta 240 MHz que se pueden utilizar de manera independiente, no se debe preocupar por el rendimiento, ya que puede realizar diseño y desarrollo de aplicaciones, además proporciona una variedad de funciones, dado que tiene módulos de otros microcontroladores de su propia familia como es ESP32-WROOM, ESP32-WROVER y ESP32-SOLO, etc. Además, las salidas se pueden agrupar y permitir la creación de prototipos de prueba sin problema. [13]

Se puede configurar como máster o esclavo y puede comunicarse con otros sistemas a partir de Wi-Fi, Bluetooth y puerto serial.[13]

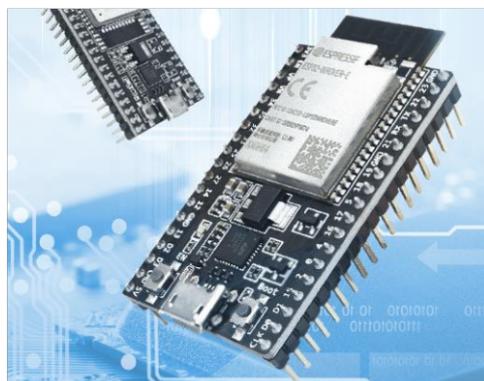


Figura 1.21. Microcontrolador ESP32-DevKitC [13]

2 METODOLOGÍA

2.1 Rediseño del Regulador Automático de Velocidad del Laboratorio Físico de SEP

2.1.1 Condiciones Operativas

EL equipo que se muestra en la Figura 2.1 es el regulador automático de velocidad existente en el Laboratorio Físico del SEP, al cual se le modela como un tipo de turbina a vapor.

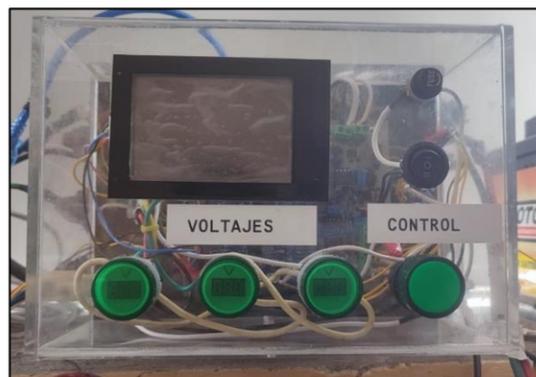


Figura 2.1. Regulador Automático de Velocidad (GOV) del Laboratorio Físico de SEP

Su operación empieza con el encendido del equipo y la selección del modelo de turbina a vapor, el arranque del motor es muy rápido y con la ayuda de un tacómetro se observa que el GOV estabiliza al motor en un valor de velocidad de 1700 r.p.m. Sin embargo, en [14] indica que el GOV para los tres modelos de turbina hidráulica, vapor y gas debe estabilizar al motor en una velocidad de 1200 r.p.m para tener una frecuencia de 60 Hz en los terminales del generador, ya que debe cumplir con la expresión (2.1) de la velocidad sincrónica.

$$N_s = \frac{120 f}{P} \quad [\text{r. p. m}] \quad (2.1)$$

Donde:

f: frecuencia en [Hz].

P: polos del generador sincrónico

De [2] se puede mencionar que el generador sincrónico del Laboratorio Físico de SEP tiene 6 polos.

$$N_s = \frac{120 * 60}{6} = 1200 \quad \text{r. p. m}$$

A partir de este estado se realiza un diagnóstico de hardware y software del regulador automático de velocidad.

2.1.1.1 Hardware

- El encoder instalado es de 1000 ppr y para la prueba de funcionamiento al momento que se construyó el equipo se utilizó un encoder de 100 ppr según [14].
- El acoplamiento del eje del motor con el encoder se encuentra roto.
- Existe soldaduras frías en la placa de control y potencia o control de fase, además los optoacopladores se encuentran quemados. Esta placa permite obtener los disparos para activar a los tiristores SCR.
- Se realiza la prueba de disparo de la compuerta de los SCR utilizando focos de 100 W y pruebas de continuidad, dando como resultado que dos de los tres módulos de tiristores se encuentran quemados.
- Los pines de la tarjeta microcontroladora STM32F407G se encuentran averiados.
- La placa de control, donde se ubica la tarjeta del microcontrolador, los pines de la pantalla NEXTION y el generador de la señal del DAC, tiene problemas de limpieza, ya que, la pasta de soldar se encuentra uniendo las pistas y eso puede generar problemas de funcionamiento.
- Los sensores de corriente, voltaje y los relés que detectan si las tres fases de la red están conectadas y estos se encuentran en óptimas condiciones.

2.1.1.2 Software

- El cálculo de la velocidad que realiza el programa considera los pulsos para un encoder incremental 100 ppr, pero el encoder que se encuentra instalado es de 1000 ppr, eso produce un error en el cálculo de la velocidad, evitando que el motor pueda estabilizarse en 1200 r.p.m.
- El software para la programación de la tarjeta STM32F407G está desarrollado en Matlab – Simulink con las bibliotecas de Waijun de acceso libre para la versión de Matlab 2014 y con un sistema operativo de Windows 10 primitivo, es decir sin las últimas actualizaciones, ya que no fue posible volver a cargar el programa y la solución viable es tener una computadora específica para el GOV.

- Las señales de entrada que hacen referencia al encoder, voltaje y corriente están declarados a pines incorrectos de la tarjeta STM32F407G y estos desempeñan otros tipos de funciones, provocando una confusión dentro del programa.
- La señal de salida del DAC se encuentra declarada en otro pin que no era el apropiado, porque como ya se mencionó anteriormente los pines de la tarjeta STM32F407G estaban dañados y físicamente estaba soldado un puente en otro pin para poder habilitar la señal de referencia del DAC.
- No fue posible verificar como fue programada la pantalla NEXTION, ya que, no se dispone de los archivos fuentes.

2.1.2 Rediseño de hardware

2.1.2.1 Tarjeta de control de fase

Esta tarjeta se la denomina placa de control y potencia porque permite acoplar la parte de potencia con la de control y así generar los disparos para las compuertas de los SCR.

Para realizar el control de fase se diseña un rectificador controlado de 6 pulsos que consta de las siguientes etapas:

1. Generación de la señal de modulación por ancho de pulso (PWM) para cada uno de los 6 SCR como se muestra en las Figuras 2.2 a 2.4, este circuito está compuesto por un optoacoplador PCB17, que rectifica el ciclo positivo/negativo dependiendo de cómo polariza la señal sinusoidal al diodo dentro del optoacoplador y a partir de esta señal obtener una señal cuadrada de los cruces por cero. Luego las resistencias, el transistor y el capacitor, convierten la señal cuadrada en una señal diente de sierra e ingresa al comparador LM324 con el valor de referencia del DAC para a la salida tener una señal PWM, como se puede observar en la Figura. 2.5.

El valor del DAC va desde un valor de 3 V a 0 V, cuando el valor es 3 V y se compara con la señal diente de sierra genera una señal PWM, con el ángulo de disparo mayor a 90° y el ángulo de conducción del SCR pequeño, al igual que el voltaje de armadura; por lo tanto, el motor no enciende. Luego al disminuir el voltaje del DAC a través del control PI, el ángulo de disparo comienza a disminuir y el ángulo de conducción aumenta, al igual que el voltaje de armadura. Eso implica que se genera un pequeño torque para que el motor gire levemente y así hasta que el motor alcance las 1200 r.p.m, cuando el voltaje de armadura es de 133 V.

En caso de que no exista un control PI y el valor del DAC siga disminuyendo a un valor de cero, implica que el ángulo de disparo es igual a cero y se tiene el mayor ángulo de conducción, obteniendo así el mayor voltaje de armadura y un valor muy grande de corriente, que puede dañar a la máquina e inclusive quemar los devanados por sobrecorriente, siendo esta la razón para variar el valor del DAC de mayor a menor.

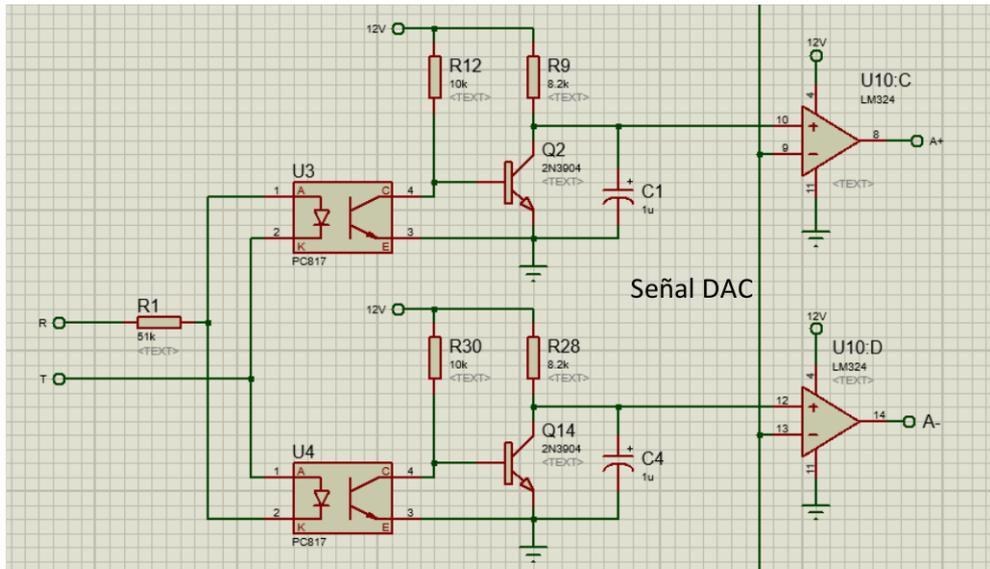


Figura 2.2. Circuito para obtener la señal PWM para A+ y A- a partir del voltaje RT

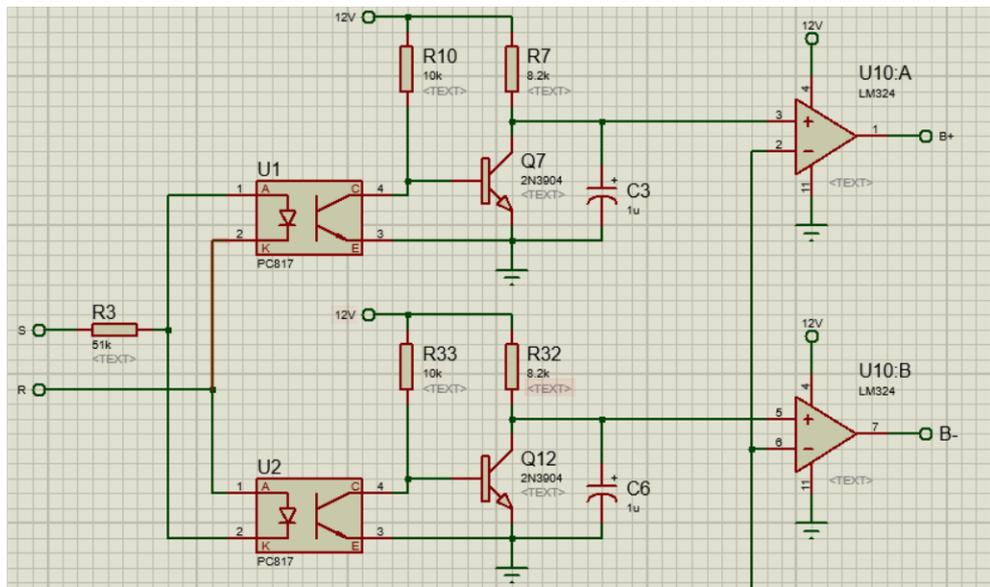


Figura 2.3. Circuito para obtener la señal PWM para B+ y B- a partir del voltaje RS

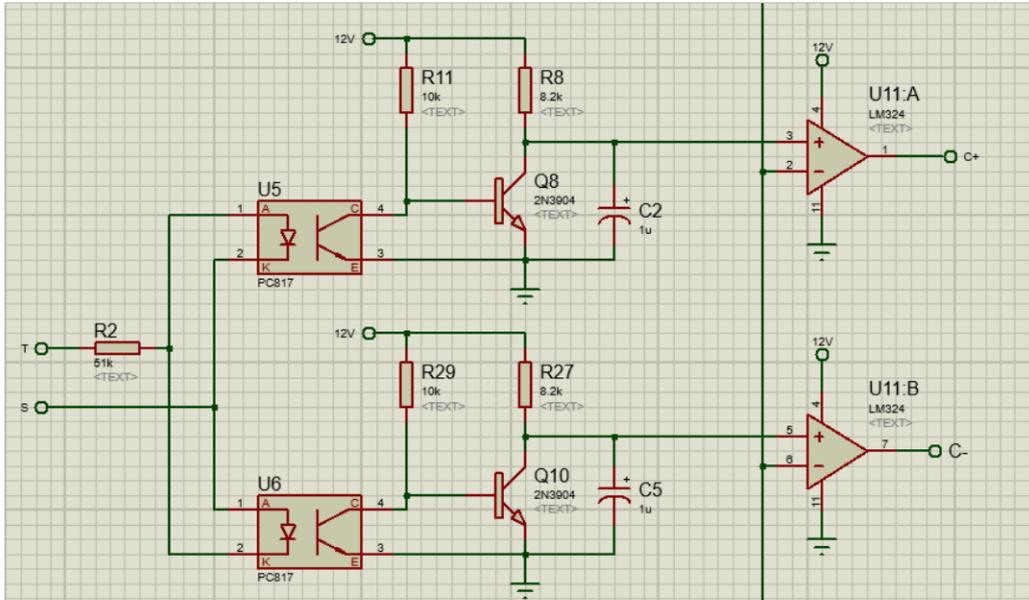


Figura 2.4. Circuito para obtener la señal PWM para C+ y C- a partir del voltaje ST

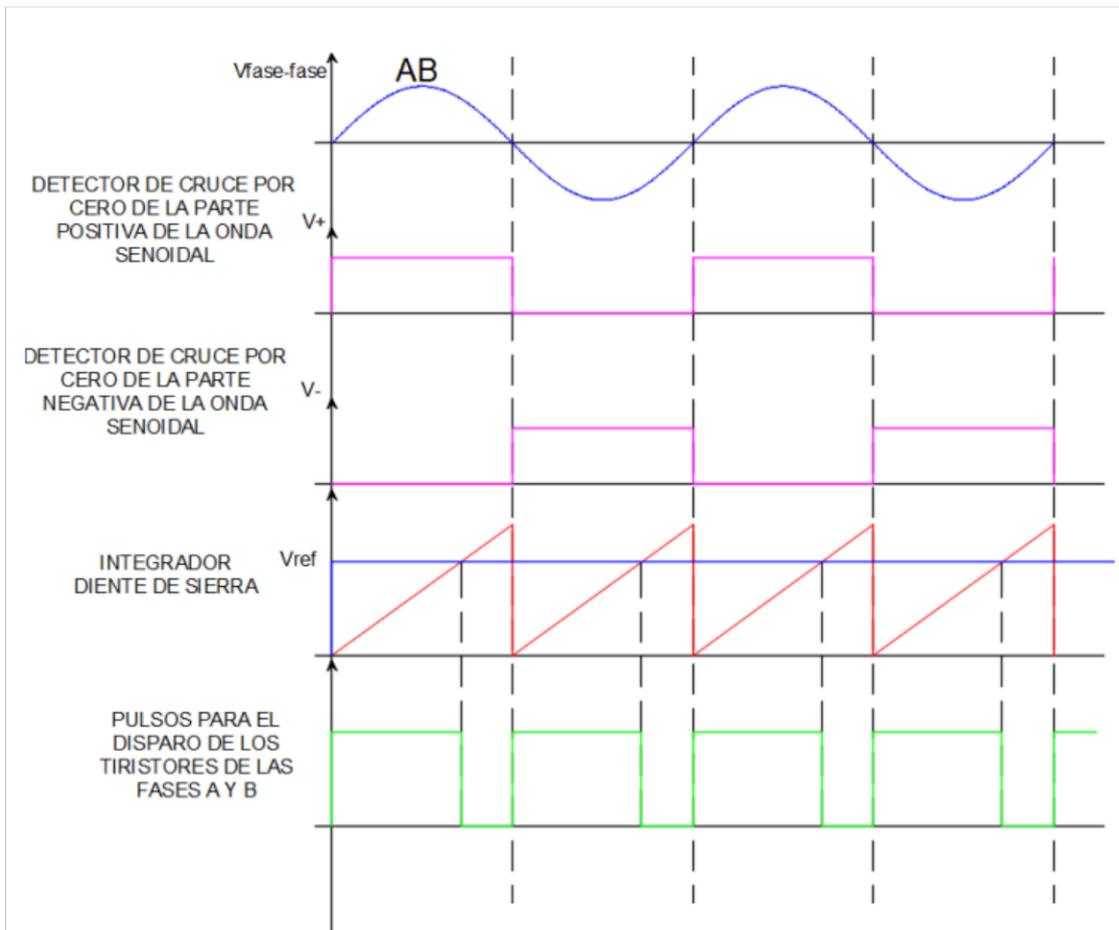


Figura 2.5. Obtención de la señal PWM a partir de una señal sinusoidal

2. En el circuito de la Figura 2.6, se puede observar que en la compuerta de cada SCR existe un optoacoplador, este permite generar los disparos en las compuertas de los SCR a partir de la señal PWM, además sirve como aislamiento de la parte de control y de potencia.
3. Finalmente, con el circuito completo de la Figura 2.6, se puede regular la velocidad del motor, a partir del control del voltaje de armadura.

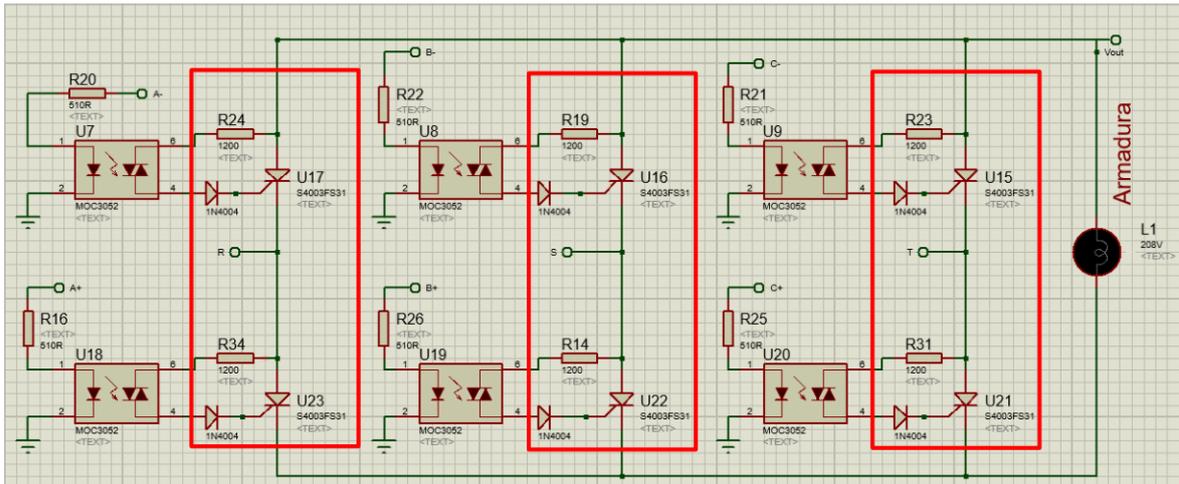


Figura 2.6. Circuito rectificador controlado de 6 pulsos con circuitos de disparo para cada tiristor SCR

Además, a la misma placa de control y potencia, se le incorpora el circuito del encoder incremental y a cada canal A y B se le conecta un Schmitt Trigger, que tiene como objetivo realizar una señal más cuadrada a los pulsos del encoder, ya que, producto del ruido y la vibración de la máquina provoca que los pulsos del encoder no sean señales completamente cuadradas dando como resultado valores erróneos de velocidad y consecuentemente afectando en el control PI.

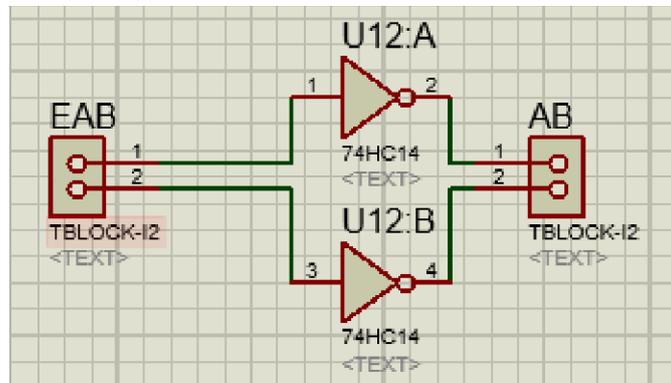


Figura 2.7. Circuito para la filtración de datos del encoder incremental

En la Figura 2.8 se muestra la placa de control y potencia o control de fase, con el circuito de filtración de datos de forma física.

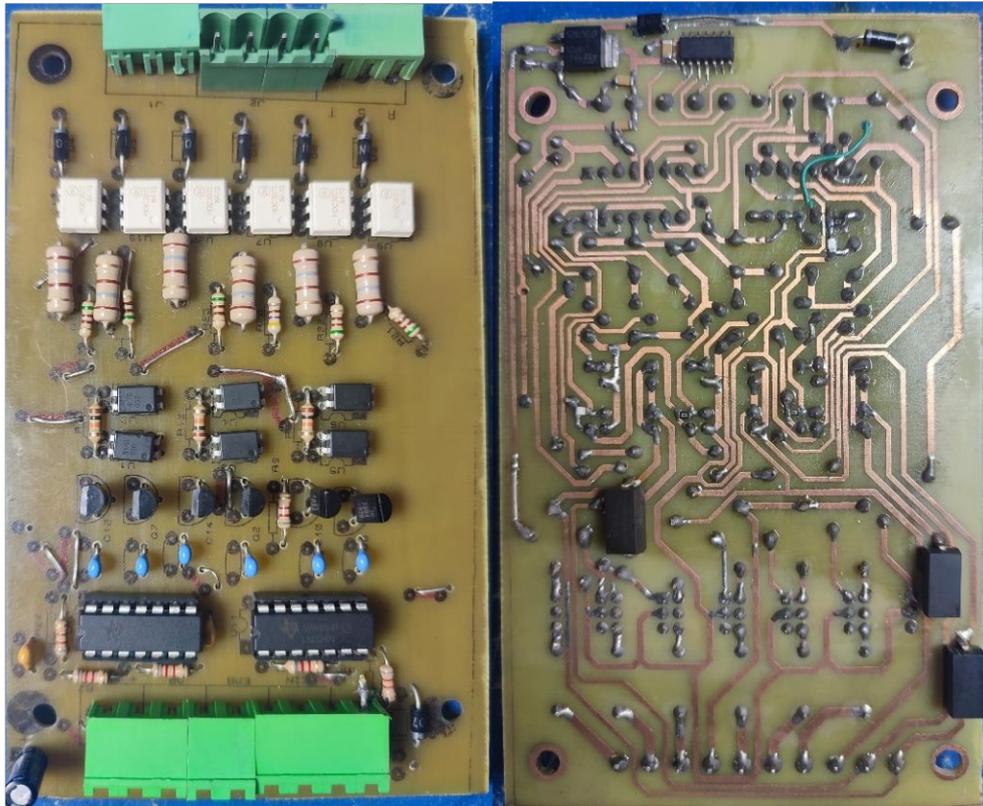


Figura 2.8. Rediseño de la placa de control y potencia

2.1.2.2 Rectificador controlado de 6 pulsos

En la Figura 2.9, se muestra el módulo de tiristores que permite realizar el control de fase, el cual internamente consta de dos SCR conectados en serie. Este módulo se utiliza para reemplazar los módulos que estaban quemados y cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.1.



Figura 2.9. Módulo de tiristores SCR

Tabla 2.1. Datos Técnicos del módulo de tiristores [15]

Especificaciones	Valor	Unidad
Módulo	Serie SCRs – SKKT 106	-
Corriente máxima de disparo	150	mA
Corriente directa	106	A
Corriente transitoria pico	2,25	kA
Corriente máxima de retención	250	mA
Temperatura de operación	130	°C
Voltaje de disparo	3	V

En la Figura 2.10 se muestran los tres módulos de SCR, para formar el circuito controlado de seis pulsos como se muestra en la Figura. 2.6.

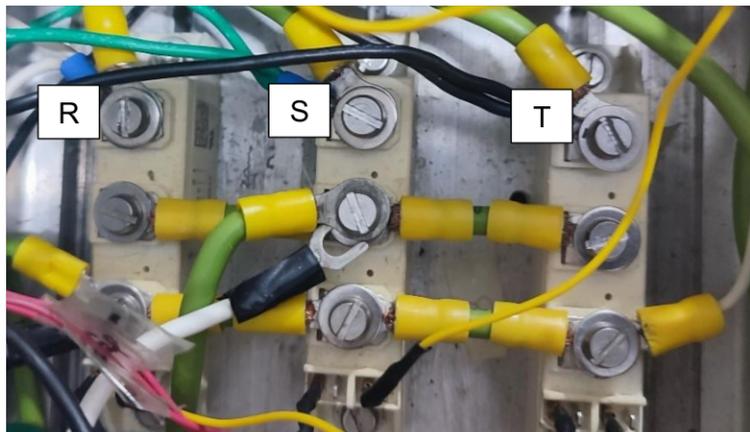


Figura 2.10. Tres módulos de SCRs

2.1.2.3 Encoder rotativo incremental

Al momento de construir el regulador automático de velocidad en [14] se usa un encoder de 100 pulsos por revolución (ppr), por lo que se cambia por uno de 1000 ppr, debido a que permite tener una mayor precisión y resolución de los datos de la velocidad de la máquina motriz, consiguiendo tener un control más fino de la velocidad.

Para el rediseño del GOV se utiliza el encoder que se muestra en la Figura 2.11, que consta de dos señales de salida de los pulsos del encoder A y B para enviar los datos de la señal a la tarjeta de la STM32F407G, además funciona con un voltaje de alimentación de 5 a 12 V. En la Tabla 2.2 se muestra las especificaciones técnicas del encoder.



Figura 2.11. Encoder de 1000 ppr

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del encoder de 1000 ppr [16]

Especificaciones	Valor	Unidad
Fabricante	Omron	-
Modelo	E6B2-CWZ3E	-
Diámetro del eje	6	Mm
Tipo	Incremental	-
Resolución	1000	ppr
Voltaje de Alimentación	5-12	V _{DC}
Canales	A, B	-
Velocidad máxima	6000	r.p.m
Frecuencia máxima	100	kHz
Voltaje de salida	5	V _{DC}

Además, para acoplar el eje del motor con el eje del encoder, se utiliza un acople flexible metálico de 8 X 6 mm, como se muestra en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Acople para el eje del motor con el encoder

2.1.3 Rediseño de Software

Para el rediseño del software, se cambia la programación de Matlab – Simulink con las bibliotecas de Waijung, al lenguaje de programación C – Arduino con las bibliotecas del microcontrolador STM32F407G. Se selecciona este último porque es un software libre y se

puede programar la mayoría de los microcontroladores, por tal razón es utilizado hoy en día por la mayoría de los desarrolladores de programas.

Una ventaja muy importante de programar en Arduino IDE no necesita una versión de actualización específica de Windows, como si se presenta con las bibliotecas de Waijun, y permite enviar la información del computador a la tarjeta de forma muy sencilla.

Para este proyecto se utiliza una nueva tarjeta STM32F407G, que se muestra en la Figura. 2.13, porque la que se encontraba en principio está averiada los pines PA8 y PE11 del encoder y PB11 de la señal del DAC.

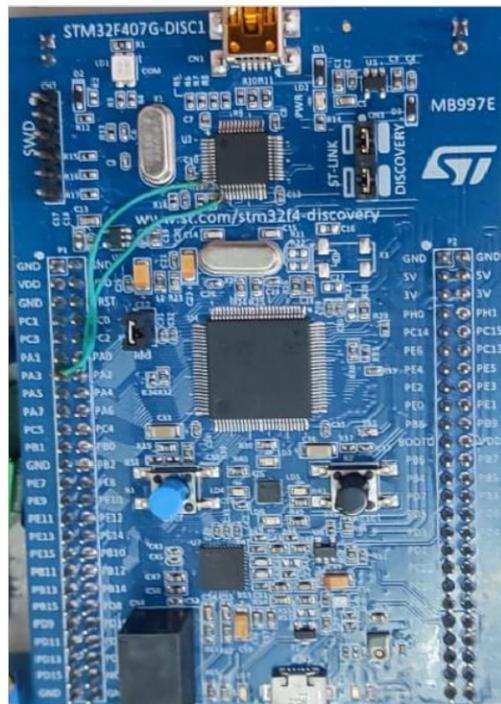


Figura 2.13. Tarjeta STM32F407G

2.1.3.1 Cálculo de la frecuencia y velocidad en Arduino IDE

Para poder calcular la frecuencia y la velocidad en Arduino IDE es necesario obtener la información del canal A del encoder en el pin PA8 de la tarjeta, y los datos que ingresan a dicho pin son los pulsos por revolución, entonces a partir de este dato se puede calcular la frecuencia como (2.2) y la velocidad en r.p.m como (2.3). Estas ecuaciones se ingresan en la programación para comparar con el valor nominal de velocidad de 1200 r.p.m y así realizar un buen control de velocidad.

$$f = P * \frac{20}{2} \quad (2.2)$$

$$\text{rpm} = f * \frac{60}{\text{ppr}} \quad (2.3)$$

Donde:

f: frecuencia en [Hz].

rpm: velocidad del motor en [r.p.m]

P: número de pulsos proporcionado por la señal del encoder

ppr: resolución del encoder en [ppr]

2.1.3.2 Controlador PI

Para que el GOV responda como un modelo de turbina a vapor se utiliza un controlador PI, pero en la programación de Arduino se introduce la ecuación completa del controlador proporcional-integral-derivativo PID, en dominio discreto del tiempo.

Se parte de la función de transferencia del PID (G_{PID}) en el dominio de la frecuencia como se muestra en (2.4).

$$G_{PID}(s) = \frac{K_I}{s} + K_p + K_D s \quad (2.4)$$

$$G_{PID}(s) = \frac{(K_I + K_p s + K_D s^2)}{s} \quad (2.5)$$

Luego, a la ecuación (2.5) se aplica la transformada Z reemplazando $s = \frac{1-Z^{-1}}{T}$, donde T es el período de muestreo y se obtienen las ecuaciones (2.6) a (2.8):

$$G_{PID}(Z) = \frac{(K_I + K_p(\frac{1-Z^{-1}}{T}) + K_D(\frac{1-Z^{-1}}{T})^2)}{\frac{1-Z^{-1}}{T}} \quad (2.6)$$

$$G_{PID}(Z) = \frac{(K_I T + K_p(1-Z^{-1}) + \frac{K_D(1-Z^{-1})^2}{T})}{1-Z^{-1}} \quad (2.7)$$

Resolviendo,

$$G_{PID}(Z) = \frac{V(Z)}{E(Z)} = \frac{(\frac{K_D}{T})Z^{-2} - (K_p + \frac{2K_D}{T})Z^{-1} + (K_p + K_I T + \frac{K_D}{T})}{1-Z^{-1}} \quad (2.8)$$

Finalmente, se calcula la transformada Z inversa para obtener la ecuación del PID en el dominio discreto del tiempo:

$$Z^{-1}\{V(Z)(1 - z^{-1})\} = Z^{-1}\left\{E(Z)\left(\left(\frac{K_D}{T}\right)z^{-2} - \left(K_P + \frac{2K_D}{T}\right)z^{-1} + \left(K_P + K_I T + \frac{K_D}{T}\right)\right)\right\} \quad (2.9)$$

$$v[x] - v[x - 1] = \left(\frac{K_D}{T}\right)e[x - 2] - \left(K_P + \frac{2K_D}{T}\right)e[x - 1] + \left(K_P + K_I T + \frac{K_D}{T}\right)e[x] \quad (2.10)$$

La ecuación del control PID en dominio del tiempo discreto es (2.11):

$$v[x] = v[x - 1] + \left(K_P + K_I T + \frac{K_D}{T}\right)e[x] - \left(K_P + \frac{2K_D}{T}\right)e[x - 1] + \left(\frac{K_D}{T}\right)e[x - 2] \quad (2.11)$$

Donde $v[x]$ es la salida de control que reduce el voltaje de referencia proveniente y consecuentemente aumenta el voltaje de armadura haciendo que el motor comience a moverse, $v[x - 1]$ es la salida de control un período antes. El $e[x]$ es la diferencia entre la velocidad de referencia y la velocidad del motor medido por el encoder, $e[x - 1]$ es la misma diferencia un período antes y $e[x - 2]$ es la diferencia dos períodos antes.

La ecuación (2.11) se escribe en la programación de Arduino IDE considerando K_D igual a cero para realizar un control PI.

2.1.3.3 Modelo dinámico del motor DC

Es necesario obtener un modelo dinámico de la máquina motriz, para calcular las constantes de sintonización del PI y así obtener que el comportamiento del motor sea como turbina a vapor.

En la Figura. 2.14 se puede observar el circuito de un motor DC con excitación independiente y controlado con voltaje de armadura.

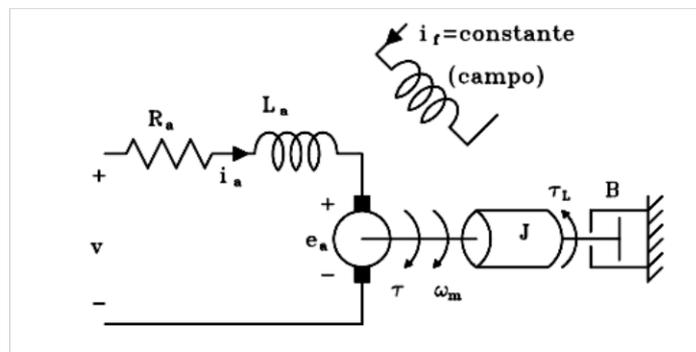


Figura 2.14. Circuito eléctrico de la máquina DC controlando el voltaje de armadura y el voltaje de campo constante [17]

Resolviendo el circuito de la Figura 2.14 se tiene que el voltaje del inducido en la armadura es:

$$e_a(t) = v_a(t) + R_a i_a(t) + L_a \left(\frac{di_a(t)}{dt} \right) \quad (2.12)$$

Donde:

V_a : voltaje en terminales de la armadura

i_a : corriente de la armadura

R_a : resistencia de la armadura

L_a : inductancia de la armadura

Además,

$$e_a(t) = K_a \omega_m(t) \quad (2.13)$$

Donde:

K_a : constante de la fuerza electromotriz

ω_m : velocidad del motor de la máquina

El torque electromagnético generado por el motor es:

$$T_m = K_m i_a(t) \quad (2.14)$$

Donde:

K_m : constante del torque electromagnético.

En (2.15) se representa la parte mecánica del motor, donde se consideran las pérdidas por fricción y la energía cinética del motor DC.

$$T_m(t) = J \left(\frac{d\omega(t)}{dt} \right) + B\omega(t) \quad (2.15)$$

Donde:

B : constante de fricción

J : momento de inercia de la máquina

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones (2.12) a (2.15):

$$e_a(s) = v_a(s) + R_a i_a(s) + L_a i_a(s)s \quad (2.16)$$

$$e_a(s) = K_a \omega_m(s) = K_a \frac{\theta(s)}{s} \quad (2.17)$$

$$T_m(s) = K_m i_a(s) \quad (2.18)$$

$$T_m(s) = J\omega(s)s + B\omega(s) = \omega(s)(Js + B) \quad (2.19)$$

De las ecuaciones (2.16) a (2.19) se puede obtener la función de transferencia que relaciona el voltaje de armadura como entrada y a la velocidad de la máquina en radianes como salida:

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(K_a K_m + R_a B) + (R_a J + L_a B)s + L_a J s^2} \quad (2.20)$$

Además, la función de transferencia que relaciona la posición angular con respecto al voltaje se obtiene a partir de (2.21).

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(K_a K_m + R_a B)s + (R_a J + L_a B)s^2 + L_a J s^3} \quad (2.21)$$

Además, la función de transferencia que relaciona la corriente de armadura con respecto al voltaje se obtiene a partir de reemplazar las ecuaciones (2.18) y (2.19) en (2.20).

$$\frac{I_a(s)}{V_a(s)} = \frac{Js + B}{(K_a K_m + R_a B) + (R_a J + L_a B)s + L_a J s^2} \quad (2.22)$$

Reemplazando la ecuación (2.17) en (2.20) se obtiene la función de transferencia que relaciona la velocidad del motor y el voltaje de armadura.

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(K_a K_m + R_a B) + (R_a J + L_a B)s + L_a J s^2} \quad (2.23)$$

Cálculo de constantes, parámetros eléctricos y mecánicos

Para calcular los parámetros dinámicos del motor DC, es necesario calcular la resistencia e inductancia de armadura, del circuito de la Figura 2.15.

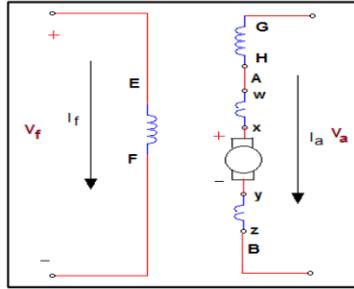


Figura 2.15. Circuito eléctrico del motor DC

A partir de la Tabla 1.3, se puede determinar la impedancia de armadura y es igual a:

$$Z_a = Z_{serie} + Z_{ab} = 0,49668\angle 51.48^\circ + 2,9661\angle 73.87^\circ = 1,1333 + j3,2379 \Omega \quad (2.24)$$

Entonces la resistencia y la inductancia de armadura es:

$$R_a = 1,1333 \Omega$$

$$L_a = \frac{3.2379}{2\pi * 60} = 0,00859 \text{ H}$$

Para el cálculo de la constante electromotriz (2.25) se calcula el voltaje y la corriente de armadura cuando la máquina gira a 1200 r.p.m, entonces se toma los valores la Tabla 1.2.

$$K_a = \frac{V_a - i_a R}{\omega} = 1,02106 \text{ V} \cdot \text{s/rad} \quad (2.25)$$

Además, la constante electromotriz es igual a la constante de torque electromecánico.

$$K_m = K_a = 1,021 \text{ N} \cdot \text{m/A}$$

Para calcular el momento de inercia de la máquina se utiliza la ecuación (2.26) con una constante de tiempo t_m de 1 s.

$$J = \frac{t_m K_a K_m}{R_a} = 0,9192 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.26)$$

El torque mecánico se calcula a partir de la multiplicación de la constante de torque mecánico y la corriente de armadura en condiciones nominales como se muestra en (2.27).

$$T_m = K_m i_a = 35,72308 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.27)$$

La constante de fricción o pérdidas mecánicas se calcula a partir de (2.28):

$$B = \frac{T_m}{\omega} = 35,72308 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \quad (2.28)$$

Tabla 2.3. Constantes y parámetros eléctricos y mecánicos del modelo dinámico del motor DC

Parámetros	Valor	Unidad
Momento de inercia [J]	0,919214585	Kg m ²
Constante de fricción [B]	0,284274604	N m s
Constante electromotriz [Ka]	1,020659537	V s/rad
Constante de torque electromecánico [Km]	1,020659537	N·m/A
Resistencia de armadura [Ra]	1,1333	Ω
Inductancia de armadura [L]	0,0085846	H
Torque mecánico [Tm]	35,72308378	N m

2.1.3.4 Modelo dinámico del motor DC en Simulink – Matlab

Con el desarrollo matemático realizado en el apartado anterior se implementa en el software Simulink – Matlab, en diagrama de bloques, el modelo dinámico del motor DC considerando los parámetros eléctricos y mecánicos de la Tabla 2.3.

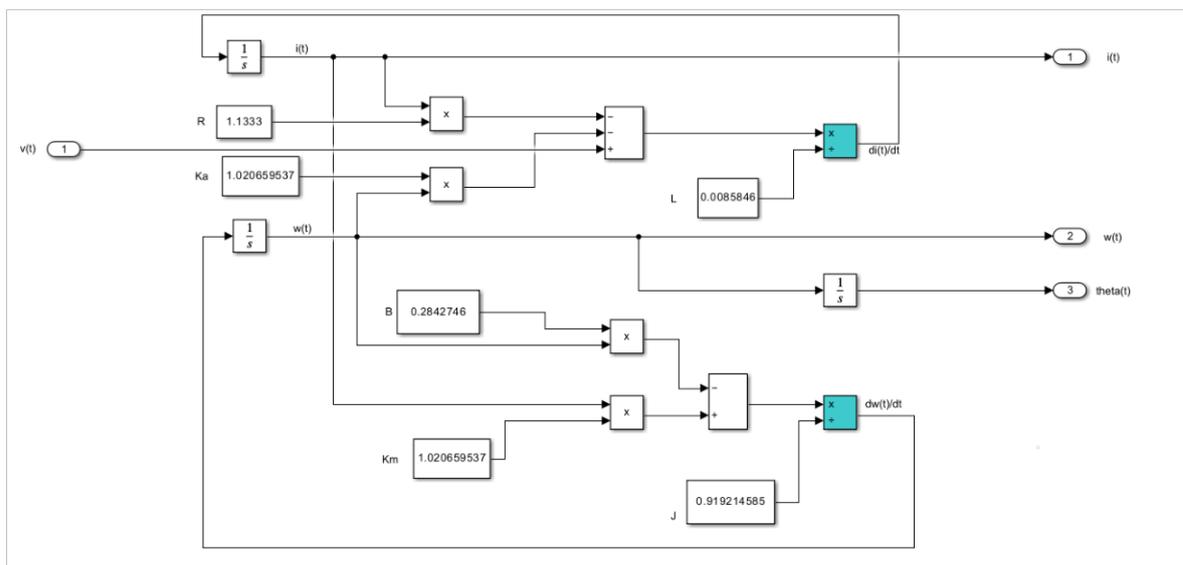


Figura 2.16. Modelo dinámico del motor DC en diagrama de bloques

Del modelo dinámico del motor DC implementado es posible obtener la corriente, la velocidad y la posición del eje del motor.

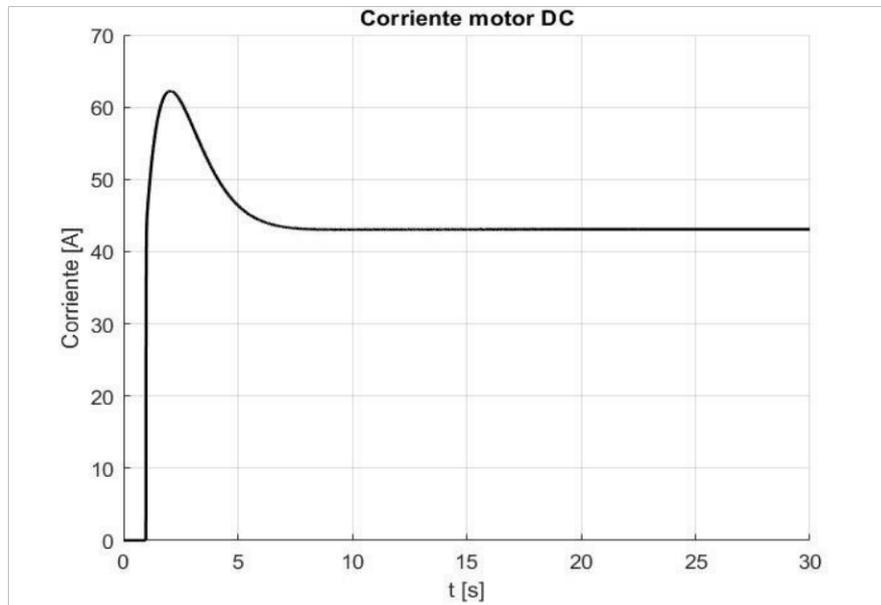


Figura 2.17. Corriente de la armadura del motor DC

En la Figura 2.17 se muestra el comportamiento de la corriente de armadura del motor DC ante una entrada paso, en el cuál en los primeros segundos se presenta un pico muy elevado de corriente, ya que en ese instante arranca el motor y necesita un gran torque para llegar a una velocidad deseada, pero luego la corriente se estabiliza en su valor nominal.

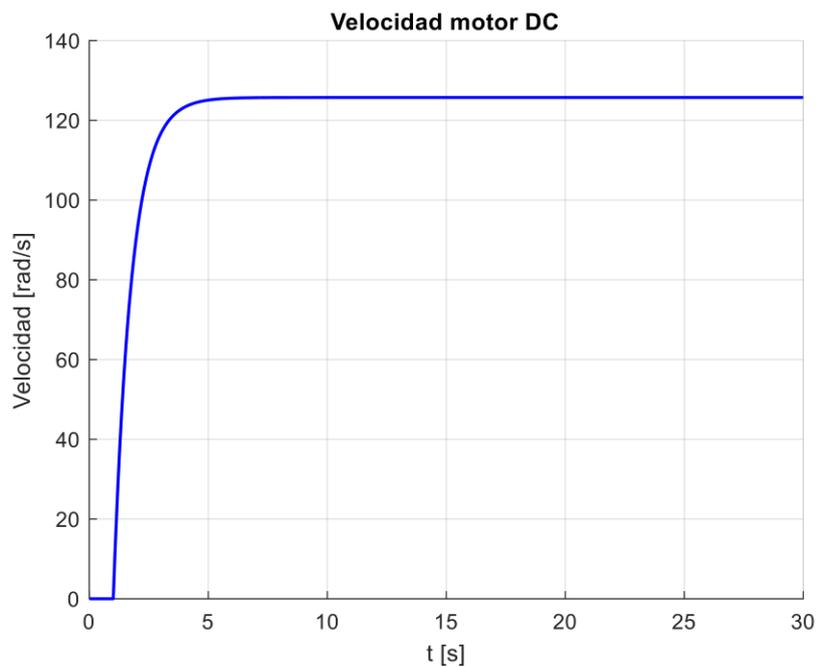


Figura 2.18. Velocidad del motor

En la Figura 2.18 se muestra el comportamiento de la velocidad del motor en rad/s ante una entrada paso y se puede observar que la velocidad se estabiliza en un valor 125,6 rad/s que es equivalente a 1200 r.p.m.

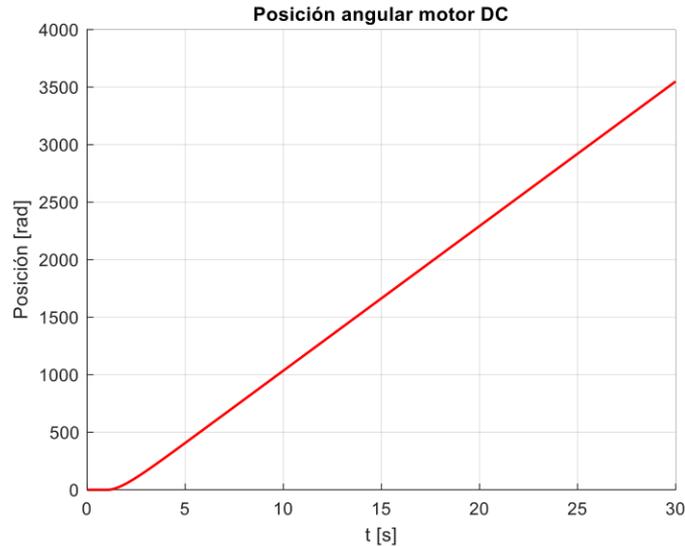


Figura 2.19. Posición angular del motor

En la Figura 2.19 se muestra la posición angular del eje del rotor y tiene una pendiente creciente debido al cambio de posición y si se divide para 2π se puede obtener el número de vueltas que realiza el motor DC.

2.1.3.5 Modelación de Turbina a Vapor

Para el modelamiento de la turbina a vapor se considera una turbina a vapor sin recalentamiento, cuya función de transferencia se muestra en (2.29).

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta CV} = \frac{1}{T_{ch}s + 1} \quad (2.29)$$

Donde:

ΔP_m : variación de la potencia mecánica.

ΔCV : variación de la compuerta de la válvula.

T_{ch} : constante de tiempo de retardo de llegar el vapor de la válvula a la turbina.

Según [18] indica que la constante de tiempo T_{ch} puede variar entre 0,2 y 0,5 s.

Para la modelación de la central de turbina a vapor sin recalentamiento se considera una constante de T_{ch} de 0,2 s. Además, a la función de transferencia se aplica una entrada paso y se obtiene la respuesta de la variación de la potencia mecánica a medida que la compuerta de la válvula se abre como se muestra en la Figura 2.20.

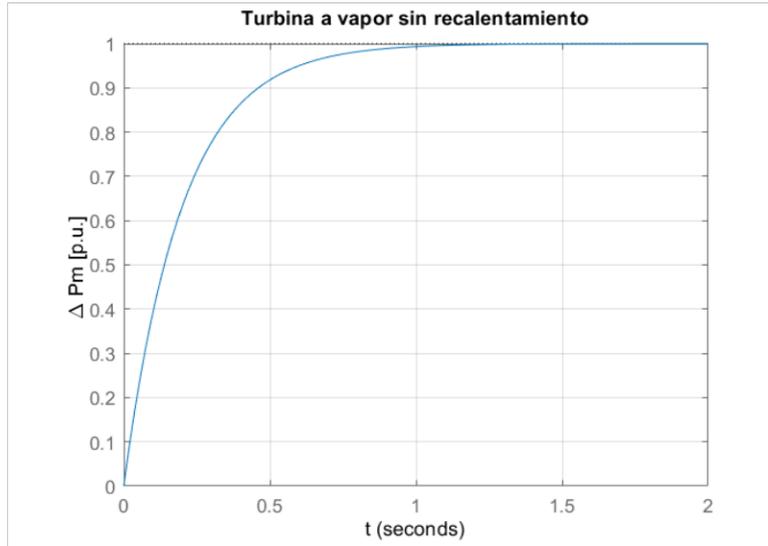


Figura 2.20. Turbina a vapor sin recalentamiento

2.1.3.6 Modelación de una Central con una Turbina a Vapor

Para el modelamiento de la central a vapor es necesario considerar al regulador de velocidad con una función de transferencia de una válvula como se muestra en (2.30). Esta función permite controlar la cantidad de vapor que se entrega a la turbina y así regular la velocidad de la turbina y mantener una velocidad constante.

$$G_{GOV} = \frac{1}{1 + T_F s} \quad (2.30)$$

Donde T_F es una constante de tiempo del sistema de combustible, es el retardo de tiempo que se demora en generar el vapor y según [19] estos valores pueden estar entre 0,04 y 0,8 s. Para el presente trabajo se considera 0,04 s.

Como se muestra en la Figura 2.21 en el recuadro de color azul, se muestra el modelo de la central de turbina a vapor que consta del regulador automático de velocidad, la turbina a vapor sin recalentamiento y el estatismo. Este último es una característica propia de la máquina que según [20] varía de 3% a 8%, y en este trabajo se asume un valor de 5%.

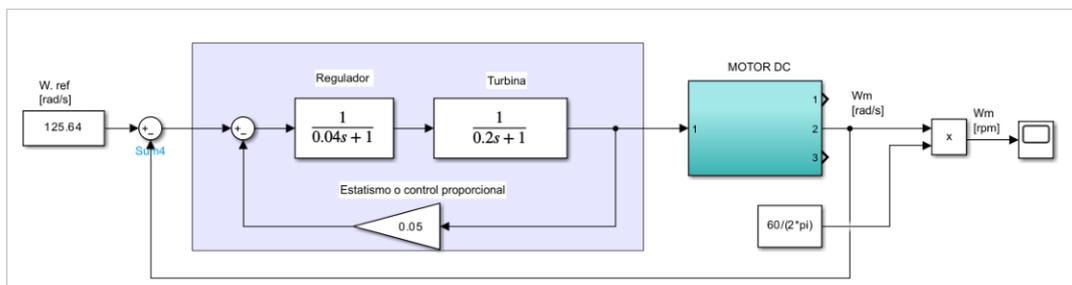


Figura 2.21. Modelo de central de turbina a vapor sin control integral

Del modelo de la Figura 2.21, al considerar el estatismo como lazo de realimentación negativa no será suficiente para que el motor alcance la velocidad de 1200 r.p.m y así el generador no alcanza la frecuencia de referencia de 60 Hz. Para lograr que el motor alcance la velocidad 1200 r.p.m, se inserta un control integral en el modelo de central de turbina a vapor como se muestra en la Figura 2.22.

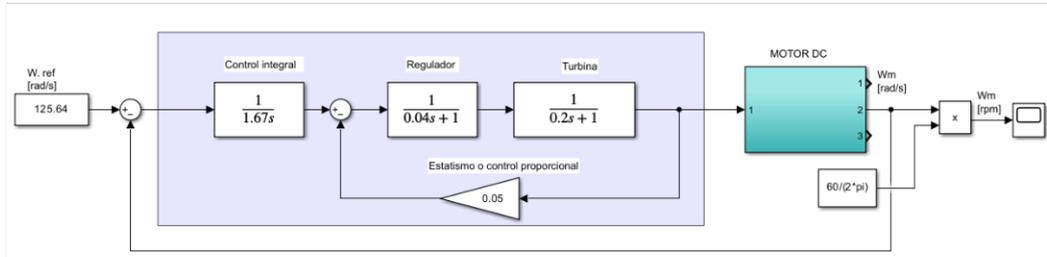


Figura 2.22. Modelo de central de turbina a vapor con control integral

En la Figura 2.23 se muestran las curvas comparativas de velocidad de un modelo de central de turbina a vapor, respuestas de las Figuras 2.21 y 2.22, en la cual se muestra como el control integral ayuda al motor a alcanzar la velocidad de 1200 r.p.m.

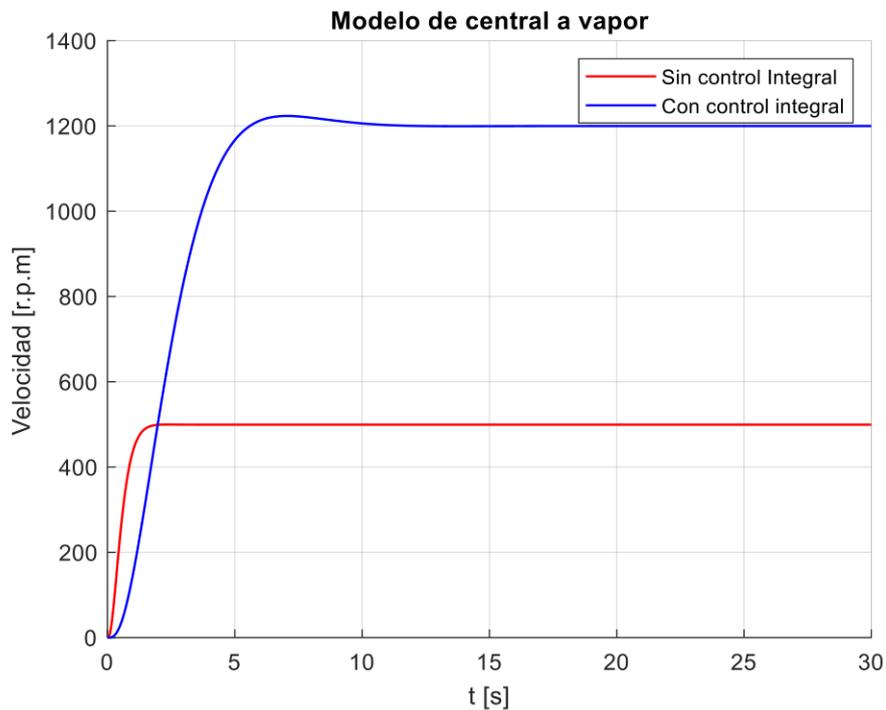


Figura 2.23. Gráfica comparativa de un modelo de turbina a vapor sin y con control integral

2.1.3.7 Sintonización del motor DC como modelo de turbina a vapor

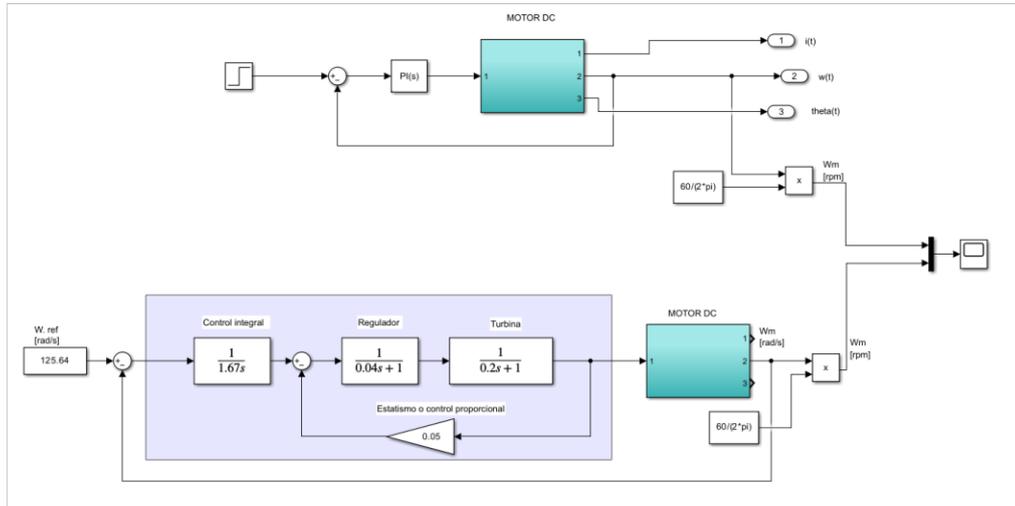


Figura 2.24. Sintonización del motor DC

El modelo de central de turbina a vapor con control integral que se muestra en la Figura 2.22 que para una mejor terminología se lo denomina modelo de turbina a vapor es el modelo que se utiliza para sintonizar al motor DC.

Para sintonizar primero se compara la salida del motor con el control PI y con la salida del modelo de turbina a vapor como se muestra en la Figura 2.24, es decir el comportamiento de la velocidad, luego con la aplicación PID Tuner de Matlab como se muestra en la Figura 2.25, se comienza a cambiar las constantes del controlador PI para que el comportamiento de la velocidad del motor sea lo más parecido a la curva de la salida del modelo de turbina vapor.

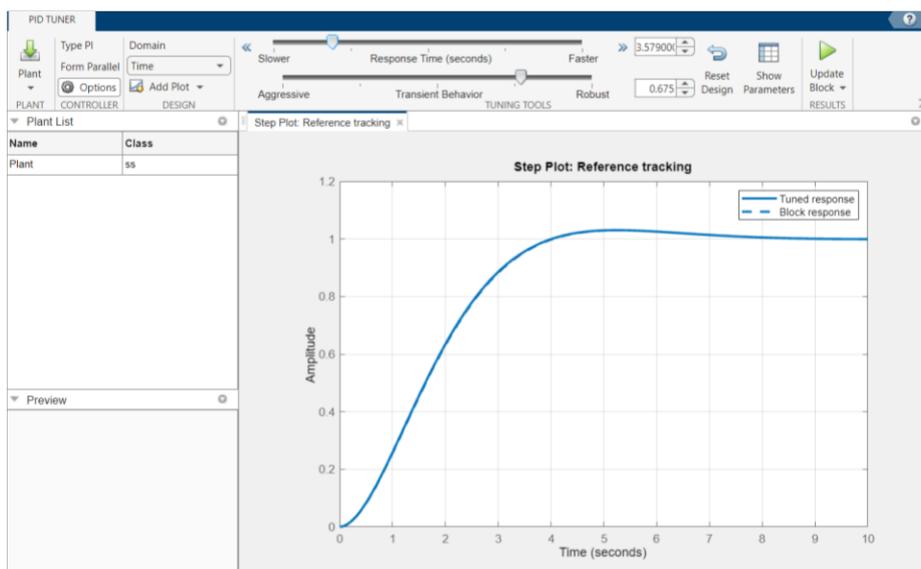


Figura 2.25. Sintonización del motor DC con la aplicación PID Tuner de Matlab

Al modificar las constantes del controlador PI para que el motor opere como un modelo de turbina a vapor se obtiene las siguientes constantes que se muestra en la Figura. 2.26.

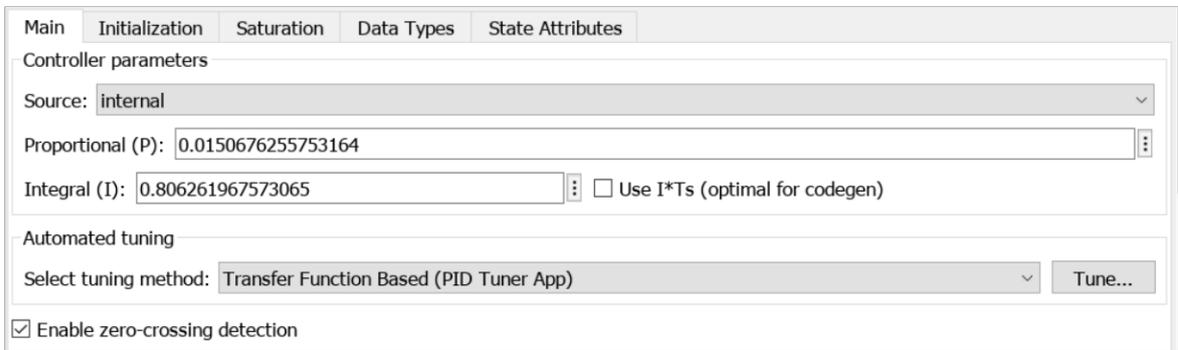


Figura 2.26. Constantes del control PI para sintonizar al motor como un modelo de turbina a vapor

En la Figura 2.27 se puede demostrar que las constantes de proporción e integral son las más adecuadas para emular el comportamiento de un modelo de turbina a vapor utilizando el regulador automático de velocidad. Además, se puede observar que el motor se estabiliza aproximadamente a los 13 s.

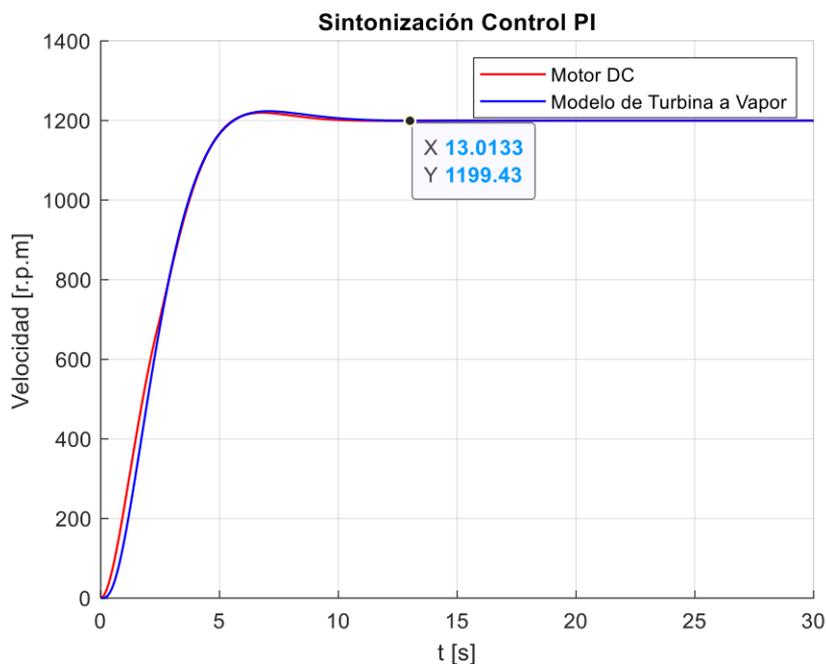


Figura 2.27. Gráfica de la sintonización del PI para que el motor opere como una central a vapor

A diferencia de solo simular la turbina a vapor sin recalentamiento como se muestra en la Figura 2.20, la curva de la velocidad del modelo de turbina a vapor como se muestra en la Figura 2.27, ya presenta un sobreimpulso y demora más tiempo en estabilizarse.

2.1.3.8 Pantalla NEXTION

La pantalla NEXTION es una pantalla táctil, que permite encender al motor, siempre que se haya elegido una función ya sea para que opere como una central hidráulica, vapor o gas. Además, permite visualizar al usuario la velocidad de la máquina motriz en tiempo real, el tiempo de envío de los datos de la tarjeta STM32F407G a la pantalla Nextion es de cada 100 ms y además se puede transmitir los datos de la tarjeta a la computadora, a través del puerto serial.

El software Nextion Editor es el que permite diseñar el fondo de pantalla y programar los botones y los datos que se desean visualizar como se muestra en la Figura 2.28.



Figura 2.28. Diseño de la pantalla NEXTION

El modelo de la pantalla NEXTION que está montado en el GOV, tienes las siguientes especificaciones que se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones de la pantalla NEXTION

Especificaciones	Valor
Modelo	NX4832T035
Dimensión	480x320
Tipo	Táctil
Interfaz	4 pines TTL
Área Visual	73,44 x 48,96
Consumo	5V y 145 mA

2.2 Vatímetro

El objetivo de la construcción del vatímetro es medir el voltaje, la corriente, el factor de potencia, la potencia y la frecuencia del generador, ya que será de mucha utilidad para el diseño del control secundario de frecuencia o cambiadores de velocidad para una turbina a vapor.

El vatímetro construido se muestra en la Figura 2.29, el mismo que mide la potencia por cada fase, por tal razón existe tres puertos para la corriente, y en la parte superior se encuentra 4 puertos, tres para las fases y uno para el neutro. A continuación, se detalla como el vatímetro mide el voltaje, la corriente y como calcula el factor de potencia, la potencia aparente, activa y reactiva.



Figura 2.29. Vatímetro

2.2.1 Medidor de Voltaje

Para medir el voltaje de cada fase se necesita un transformador de voltaje que reduce el voltaje de fase a un voltaje de 3 V y se cambia la referencia utilizando un capacitor, ya que el microcontrolador ESP32-DevKitC (ESP32) trabaja como un voltaje máximo de 3.3 V y no trabaja con valores negativos y además se utiliza un divisor de voltaje para tener un voltaje máximo de 1.5 V como se muestra la Figura 2.30.

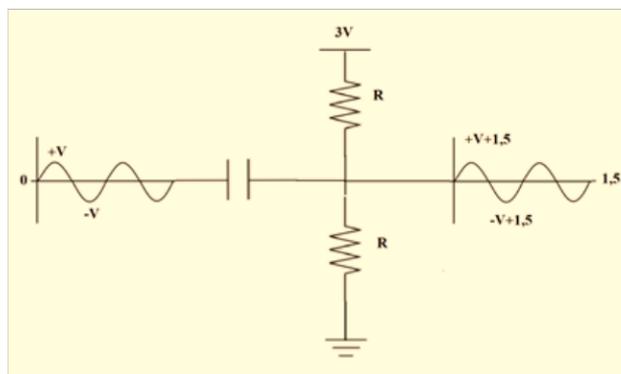


Figura 2.30. Cambio de referencia de la señal de voltaje

El módulo que permite calcular el voltaje de esta manera es el módulo PZEM004T-D-P TTL, por lo tanto, se utilizó tres de estos módulos para calcular el voltaje de cada fase como se muestra en la Figura 2.31.

Para calcular el voltaje RMS, se lo realiza a partir de la toma de muestras donde la cantidad y rapidez con la que se toma estas muestras va a depender del microcontrolador, para este caso se utilizó el microcontrolador ESP32, que permite tomar un millón quinientas mil muestras en un segundo, entonces durante un ciclo de una frecuencia 60 Hz que son 16,66 ms se toma 25.000 muestras por cada ciclo.



Figura 2.31. Módulos para medición de voltaje.

2.2.2 Medidor de corriente

La medición de corriente es similar a la de voltaje con la diferencia que se necesita un transformador de corriente, el transformador que se utilizó es el de la Figura. 2.32 que es una pinza amperimétrica SCT-013 que tiene una relación de transformación de 100 a 50 mA, a la cual se le debe añadir una resistencia para medir el voltaje, ya que el microcontrolador mide corrientes muy bajas y podría quemar al microcontrolador por sobrecorriente.



Figura 2.32. Medidor de corriente

La medición de corriente se la realiza a partir de una señal de voltaje por las razones antes mencionados, por tal motivo, la toma de muestras que realiza el microcontrolador ESP32 es como la medición de voltaje, es decir en un ciclo tomará 25.000 muestras.

2.2.3 Medición del Factor de Potencia

Para medir el factor de potencia es necesario primero calcular el desfase angular que existe entre la señal de corriente y voltaje. A continuación, en la Figura 2.33 se presenta el circuito que permite calcular el desfase angular.

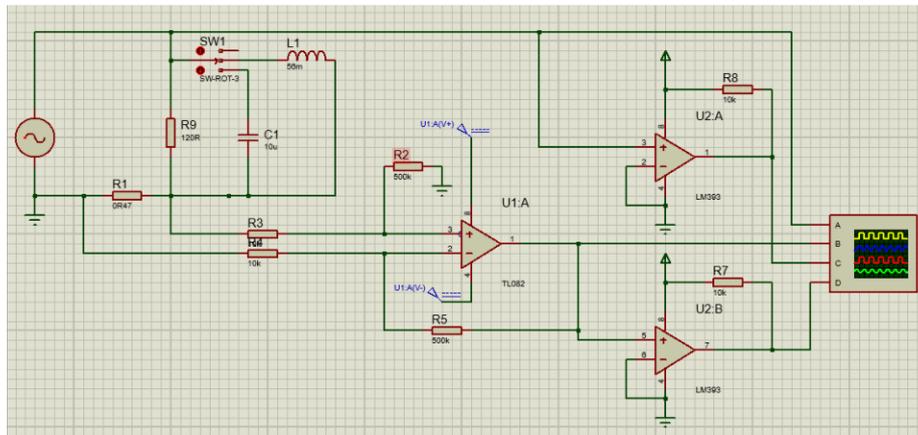


Figura 2.33. Circuito para medir el ángulo de desfase

El circuito de la Figura 2.33 tiene como señales de entrada el voltaje sinusoidal que es la salida del módulo de medidor de voltaje, a la cual ingresa al LM393 y compara con la referencia para tener a la salida del comparador los cruces por cero de la señal. Por otro lado, la otra señal de entrada es la del sensor de corriente 0R47 que es una señal de voltaje que pasa a través de dos resistencias y transforma la señal de voltaje en una señal de corriente para luego amplificar la señal y comparar con la referencia para determinar los cruces por cero de la señal.

Una vez se tenga los cruces por cero de cada señal puede tener tres posibilidades:

1. Corriente en fase con el voltaje

Se puede determinar que la corriente está en fase con el voltaje cual el flanco de subida del cruce por cero de voltaje coincide con el flanco de subida de la corriente como se muestra en la Figura 2.34.

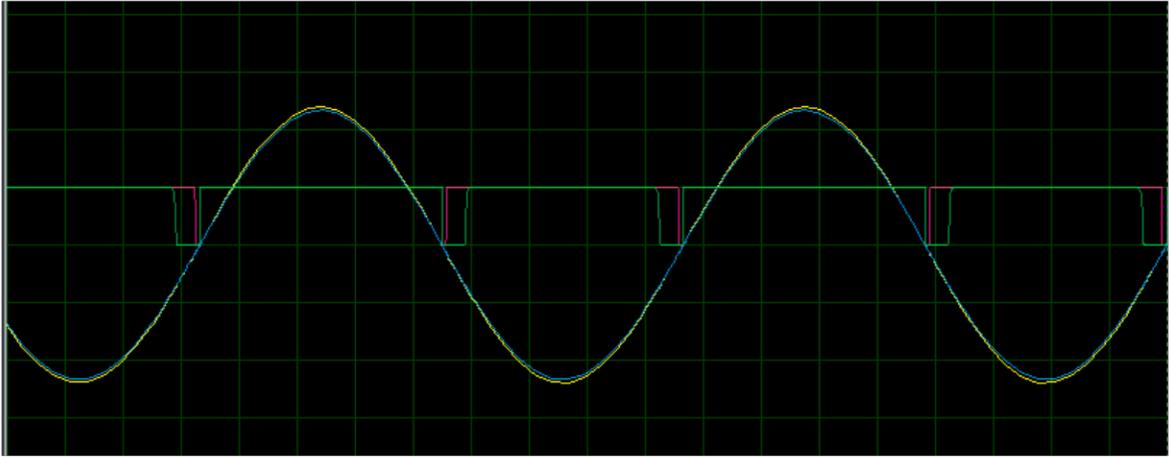


Figura 2.34. Voltaje en fase con la corriente

2. Corriente en atraso con respecto al voltaje

La corriente está en atraso con respecto al voltaje cuando el flanco de subida de voltaje y corriente es menor a 90° como se muestra en la Figura 2.35. Tomando como referencia el voltaje.

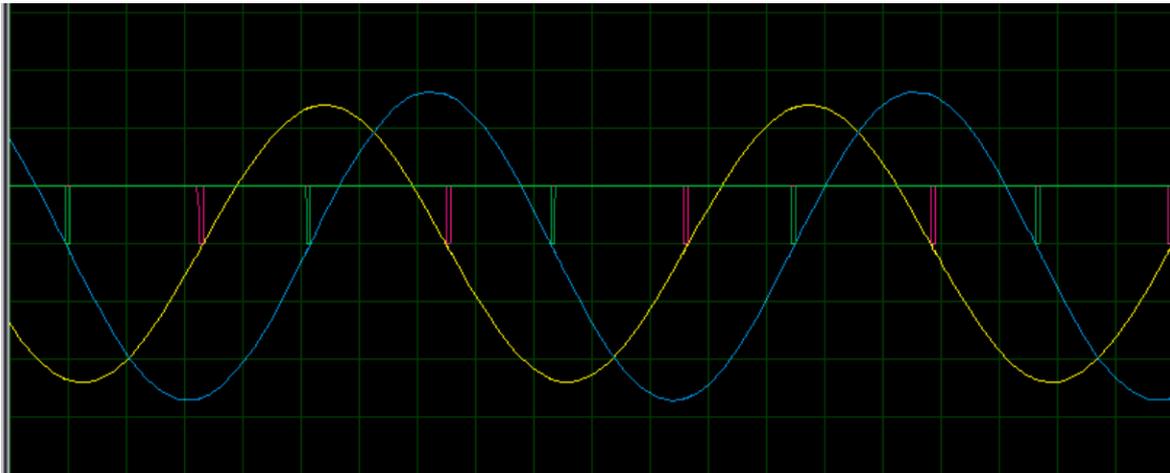


Figura 2.35. Corriente en atraso con respecto al voltaje

3. Corriente en adelanto con respecto al voltaje

La corriente está en adelanto con respecto al voltaje cuando la diferencia entre el flanco de subida de voltaje y corriente es mayor a 90° como se muestra en la Figura 2.36. Tomando como referencia el voltaje.

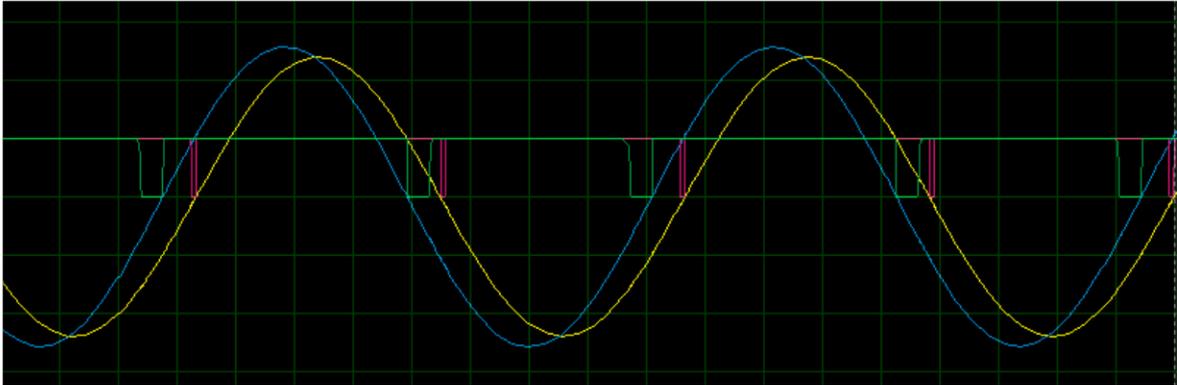


Figura 2.36. Corriente en adelanto con respecto al voltaje

Finalmente, las señales de cruce por cero tanto de voltaje y corriente ingresan al microcontrolador, el cual en la programación con la función pulse in, se puede determinar el ancho de pulso entre los flancos de subida de voltaje y corriente, para luego transformarlos en radianes, aplicar el coseno del ángulo y determinar el factor de potencia (fp).

2.2.4 Cálculo de Potencia Aparente, Activa y Reactiva

Una vez conocido los valores de voltaje, corriente y factor de potencia por fase se puede determinar las respectivas potencias en el programa del microcontrolador ESP32, a partir de las ecuaciones.

La potencia activa con (2.31).

$$P = V_{RMS} * I_{RMS} * fp \quad [W] \quad (2.31)$$

La potencia aparente con (2.32).

$$S = V_{RMS} * I_{RMS} \quad [VA] \quad (2.32)$$

La potencia reactiva con (2.33).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad [VAr] \quad (2.33)$$

2.2.5 Transmisión de datos en la Pantalla Nextion

El tiempo de transmisión de los datos del microcontrolador ESP32 a la pantalla NEXTION es de 100 ms, en la pantalla se muestra los valores de potencia aparente, reactiva, activa, voltaje, corriente y factor de potencia de cada fase. Además, se puede visualizar la frecuencia del generador.

Para el diseño de la pantalla que se muestra en la Figura 2.37 y los valores que se desean visualizar se realiza en el programa NEXTION editor.

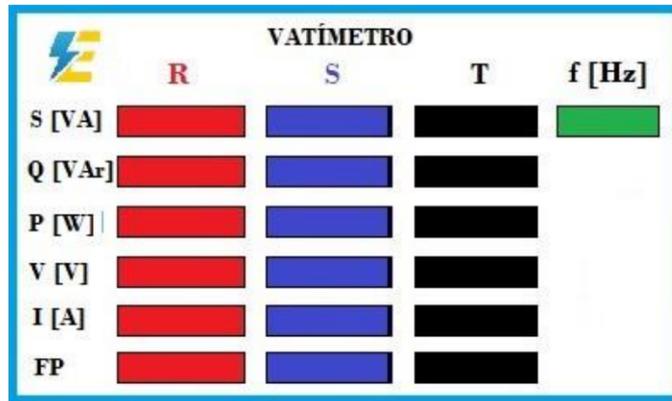


Figura 2.37. Fondo de la pantalla NEXTION del Vatímetro

Las especificaciones de la pantalla se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Especificaciones de la pantalla NEXTION

Especificaciones	Valor
Modelo	NX4832T035
Dimensión	240x400
Tipo	No Táctil
Interfaz	4 pines TTL
Área Visual	63,44 x 58,96
Consumo	5V y 145 mA

2.2.6 Adquisición de Datos

Para adquirir los datos de las variables eléctricas del generador, es necesario programar un macro en Excel y obtener los datos a través del puerto serial enviado por el microcontrolador, para luego graficar el comportamiento de las variables en tiempo real.

Para adquirir los datos del vatímetro se debe configurar el puerto de la computadora, luego se debe configurar cada cuánto se desea leer los datos, el número de datos que se desea tomar, los canales es decir las variables del vatímetro que se muestra en la Figura. 2.37 que son 19. En la Figura. 2.38 se muestra un ejemplo como se puede configurar la lectura de los datos.

Configuración del libro

La siguiente configuración afectará a cómo se leen los datos que llegan al libro actual procedentes de orígenes de datos. Borre el contenido de un campo para volver a su configuración predeterminada.

Intervalo de datos (ms)

Filas de datos

Canales de datos

Orientación de los datos

Figura 2.38. Configuración de Lectura de datos

En la Figura. 2.39, se muestra la pantalla principal donde se visualizarán los valores que envía el microcontrolador ESP32 a la computadora en tiempo real.

Entrada de datos (desde Silicon Labs CP210x USB to UART Bridge (COM5))

Los datos procedentes del origen de datos actual aparecerán abajo según se reciban.

Datos actuales									
TIME	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9

Información histórica									
TIME	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9

Figura 2.39. Datos de entrada

3 RESULTADOS

3.1 Pruebas para determinar las características estáticas del grupo motor - generador operando el GOV como turbina a vapor

Las características de estáticas del grupo motor – generador son la inercia, el amortiguamiento y el estatismo y se puede determinar a partir de la conexión o desconexión abrupta de carga, con la prueba de decaimiento. Además, para la prueba del estatismo se utiliza el vatímetro para medir la potencia y la frecuencia y así graficar su curva característica. Para estas pruebas el motor debe girar a 1200 r.p.m que es la velocidad sincrónica y en los terminales del generador un voltaje de 220V.

Los datos de los valores de velocidad, frecuencia y potencia se obtienen a través del puerto serial de cada microcontrolador y se registra los valores en el Excel de adquisición de datos.

3.1.1 Prueba en vacío

Para realizar la prueba en vacío se selecciona al GOV que opere con un modelo de turbina a vapor, el GOV energiza al motor con el voltaje de campo constante y controla la velocidad con el voltaje de armadura, consecuentemente el motor arranca hasta alcanzar la velocidad de 1200 r.p.m y GOV debe mantener esa velocidad como se muestra en la Figura 3.1, para que el generador opere a una frecuencia de 60 Hz.

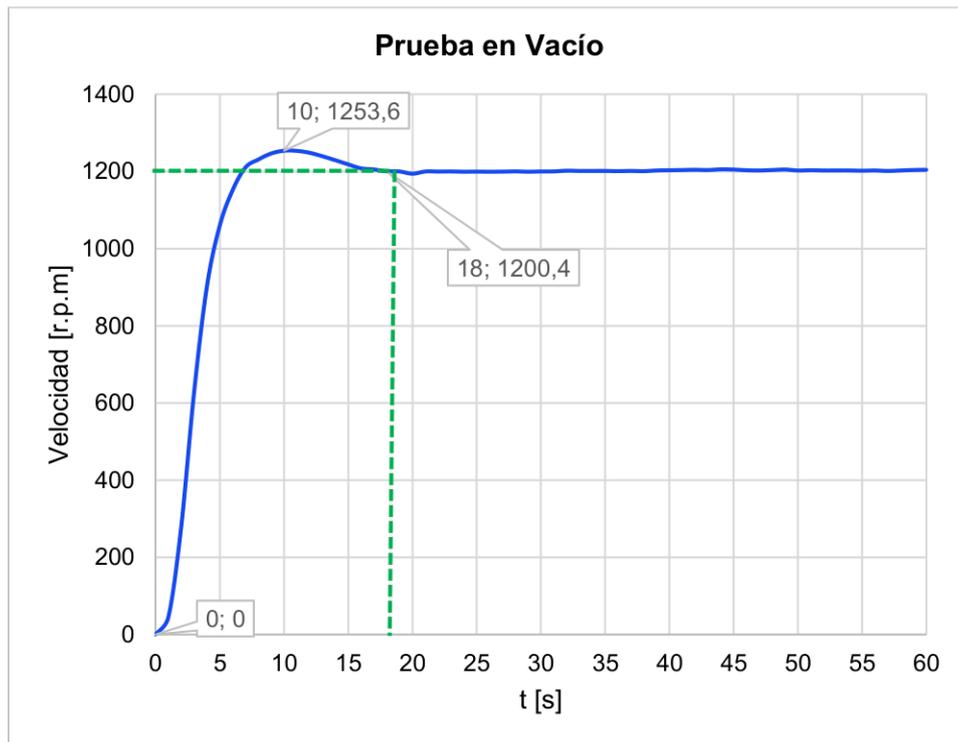


Figura 3.1. Prueba en Vacío con el GOV funcionando como un modelo de turbina a vapor

Análisis de Resultados

En la Figura 3.1 se muestra el comportamiento del motor como un modelo de turbina a vapor, en la curva se presenta un sobreimpulso de 1253,6 r.p.m en 10 s y se estabiliza en 1200 r.p.m en 18 s.

El sobreimpulso se presenta porque el arranque del motor en este modelo de turbina es rápido, ya que, no se considera en el modelamiento las etapas de recalentamiento, pero debido a este sobreimpulso tarda unos segundos en estabilizarse.

3.1.2 Desconexión Abrupta de carga

A esta prueba también se la conoce como rechazo de carga, para realizar esta prueba el generador debe tener un voltaje en terminales de 220 V operando a una frecuencia de 60

Hz, además se utiliza los corredores de transmisión existentes en el Laboratorio Físico de SEP para llegar al centro de cargas.

Una vez energizada las cargas se debe esperar que el GOV como modelo de turbina a vapor regule la velocidad a 1200 r.p.m y el generador siga operando a 60 Hz, luego con el interruptor general de centro de cargas se desenergiza todas las cargas disponibles.

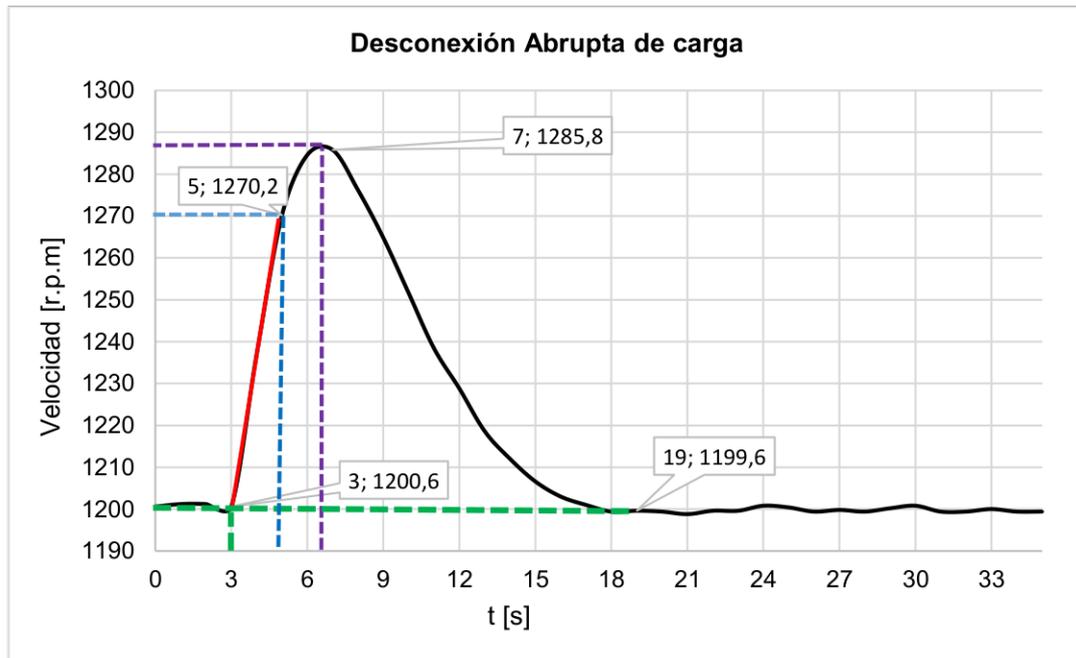


Figura 3.2. Prueba de desconexión Abrupta de carga

Análisis de resultados

En la Figura 3.2 se muestra el resultado de la prueba de rechazo de carga, en el cual, la velocidad aumenta porque el motor se acelera, llegando a una velocidad de 1285,8 r.p.m en 4 s debido a la repuesta inercial y el GOV evita que la velocidad siga aumentando al disminuir el voltaje de armadura, consecuentemente la máquina se desacelera y el GOV estabiliza al motor en 1199,6 r.p.m en 12 s, obteniendo una frecuencia de 59,98 Hz en el generador

En la Tabla 3.1, se muestra los resultados obtenidos de la prueba.

Tabla 3.1. Resultados de la prueba de desconexión abrupta de carga

Parámetro	Valor	Unidad	p.u.
Tiempo pico [t_p]	7	s	-
Tiempo inicial [t_o]	3	s	-
Tiempo final [t_f]	5	s	-
Velocidad máxima [ω_{max}]	1285,8	r.p.m	1,0715

Velocidad inicial [ω_o]	1200,6	r.p.m	1,0005
Velocidad final [ω_f]	1270,2	r.p.m	1,0585
Potencia eléctrica conectada [P_{eo}]	1218,38	W	0,163354

De los valores en p.u se considera una velocidad nominal de 1200 r.p.m, $S_b=8573$ kVA y $f_p=0,87$.

De esta prueba se puede calcular la inercia utilizando la ecuación de oscilación que se muestra en (3.1).

$$\frac{2H \Delta\omega}{\omega_s \Delta t} + D\Delta\omega = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (3.1)$$

En una prueba de rechazo de carga el coeficiente de amortiguamiento es cero, además no existe variación de potencia mecánica, ya que, el motor sigue entregando la misma potencia, además la variación de potencia eléctrica es igual a la potencia inicialmente conectada, ya que, la potencia eléctrica final es cero. Con todas estas consideraciones la ecuación de la inercia es:

$$H = \frac{P_{eo}}{2 \frac{\Delta\omega}{\Delta t}} \quad [s] \quad (3.2)$$

Remplazando los valores en p.u de la Tabla 3.1 en la ecuación (3.2) se tiene que la inercia es:

$$H = \frac{P_{eo}}{2 \frac{\omega_f - \omega_o}{t_f - t_o}} = 2,8164 \text{ s} \quad (3.3)$$

3.1.3 Prueba de Decaimiento

Para la prueba de decaimiento se apaga el interruptor que se encuentra en el voltaje de armadura cuando la máquina opera su velocidad nominal, instantáneamente la velocidad del motor cae hasta detenerse, la velocidad de caída va a depender de la energía cinética del rotor, de los devanados de amortiguamiento, de la fricción, etc.

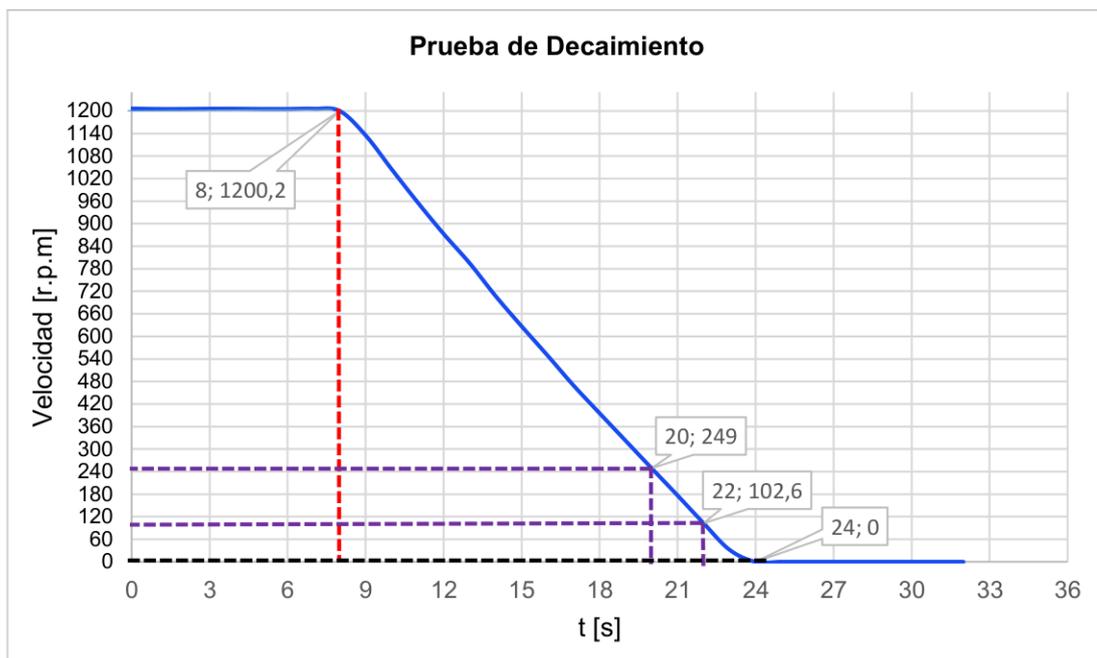


Figura 3.3. Resultados de la prueba de decaimiento

Análisis de resultados

En la Figura 3.3 se muestra la curva de la prueba de decaimiento, en el cual el motor está operando a una velocidad nominal 1200 r.p.m, luego de los 8 segundos el motor se apaga, la potencia mecánica se hace cero y la velocidad comienza a disminuir hasta que el valor sea cero a los 24 s, entonces la máquina tarda 16 s en detenerse.

Los resultados obtenidos de esta prueba se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de la prueba de desconexión abrupta de carga

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo inicial [t _i]	8	s
Tiempo final [t _f]	24	s
Velocidad inicial [ω _o]	1200,6	r.p.m
Velocidad final [ω _f]	0	r.p.m
Tiempo 1 [t ₁]	20	s
Tiempo 2 [t ₂]	22	s
Velocidad 1 [ω _o]	249	r.p.m
Velocidad 2 [ω _f]	102,6	r.p.m

De esta prueba se puede determinar el coeficiente de amortiguamiento a partir de la ecuación de oscilación considerando que la potencia mecánica y eléctrica es igual a cero como la expresión (3.4).

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} + D\Delta\omega = 0 \quad (3.4)$$

Aplicando la transformada de Laplace para condiciones iniciales, y despejando la velocidad se obtiene la ecuación (3.5).

$$\omega(s) = \frac{\omega_s}{s + \frac{\omega_s D}{2H}} \quad (3.5)$$

Luego se aplica la transformada inversa y se obtiene (3.6).

$$\omega(t) = \omega_s e^{-\frac{\omega_s D}{2H} t} \quad (3.6)$$

Donde ω_s es la velocidad sincrónica.

Finalmente, se calcula el T cuando la velocidad de la máquina es 5% de la velocidad sincrónica, a partir (3.6).

$$0,05 \omega_s = \omega_s e^{-\frac{\omega_s D}{2H} t} \quad (3.7)$$

$$T = \frac{6H}{\omega_s D} \quad [s] \quad (3.8)$$

Además, el valor de T se puede obtener a partir de la Figura 3.3 cuando la velocidad es 60 r.p.m, que al realizar una extrapolación lineal con los datos de la Tabla 3.2, se tiene que t es igual a 22,58 s, entonces el valor de T es:

$$T = t - t_i = 14,58 \text{ s} \quad (3.9)$$

De (3.8) se puede despejar el coeficiente de amortiguamiento y se tiene (3.10) en p.u.

$$D = \frac{6H}{T} = 1,159 \quad (3.10)$$

3.1.4 Prueba del Estatismo

Para realizar la prueba del estatismo se realiza la prueba de rechazo de carga como se describe a continuación:

1. Encender el regulador de automático de velocidad y se selecciona el tipo de turbina a vapor.
2. Energizar el motor y ajustar el campo del generador con el variac hasta que el voltaje en terminales sea de 220 V.
3. Encender el vatímetro, el transformador principal, energizar las líneas de transmisión no transpuesta y transpuesta con su transformador LTC y PST, respectivamente.
4. Energizar el interruptor general de las cargas y luego con el módulo de control ir encendiendo cada carga hasta tener el 50% de la potencia activa del generador.
5. Medir el voltaje en el interruptor general para asegurar que exista 127 V, en caso de que no se cumpla, se debe mover el variac, los taps de los transformadores LTC y PST.
6. Desenergizar el interruptor más cercano al generador sincrónico que se encuentra conectado al osciloscopio y controlar el variac para mantener un voltaje constante en los terminales del generador.

Con los datos obtenidos del vatímetro, se suma la potencia activa de cada fase y se grafica la frecuencia vs potencia trifásica y se obtiene una curva que se muestra en la Figura. 3.4

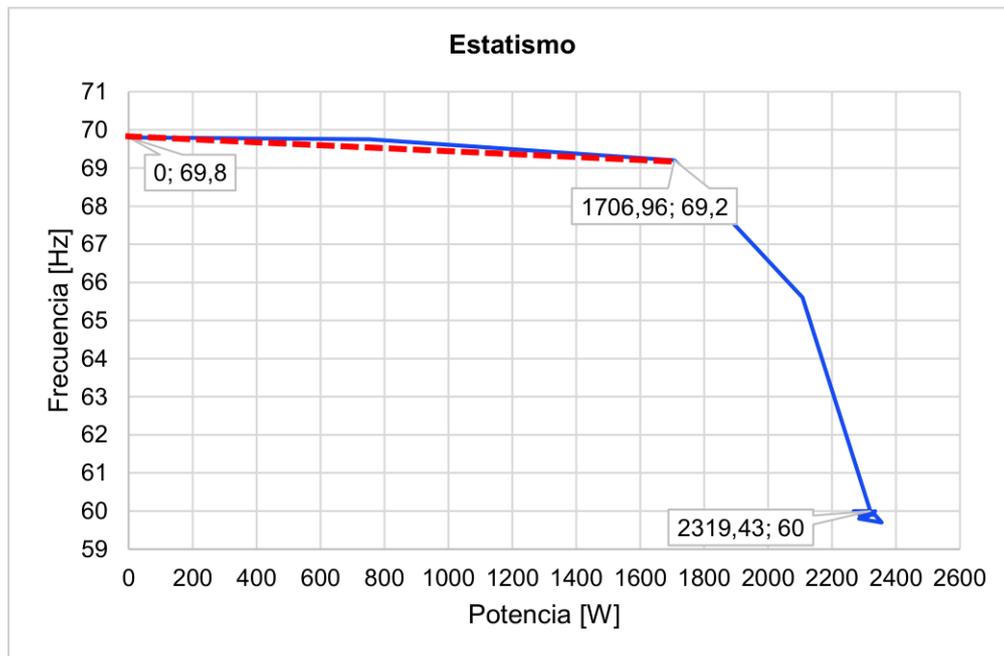


Figura 3.4. Curva característica del Estatismo

En la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos de la prueba del Estatismo.

Tabla 3.3. Datos obtenidos la prueba del Estatismo

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia 1 [P ₁]	1706,96	W
Potencia 2 [P ₂]	0	W
Frecuencia 1 [F ₁]	69,2	Hz
Frecuencia 2 [F ₂]	69,8	Hz

Cálculo del Estatismo

Para calcular el estatismo se calcula la pendiente de la curva de color rojo que se muestra en la Figura 3.4. Los valores de potencia y frecuencia deben estar en p.u.

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{69,2 - 69,8}{\frac{1706,96 - 0}{8573 * 0.87}} = -0,0437 \text{ p.u.} \quad (3.11)$$

El estatismo calculado es de 4,37%.

3.1.5 Conexión Abrupta de Carga

La conexión abrupta de carga se realiza conectando todas cargas existentes al mismo tiempo.

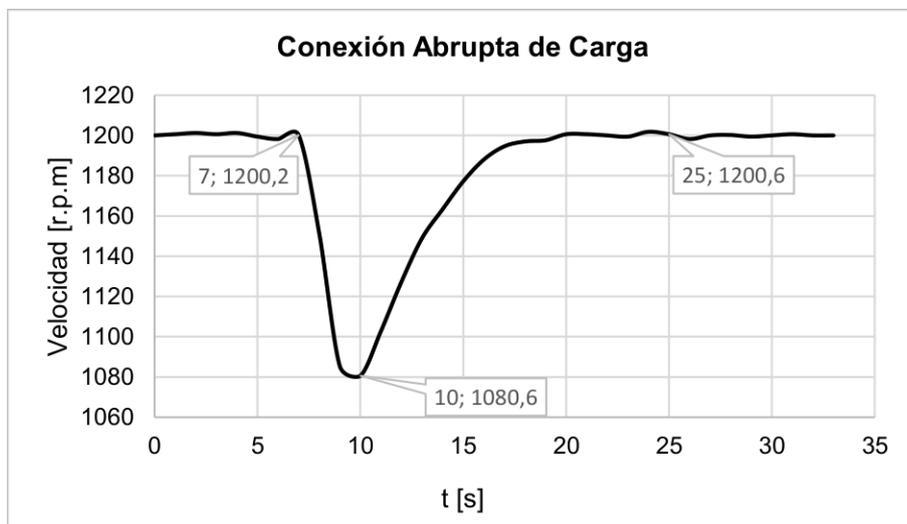


Figura 3.5. Respuesta de la Conexión Abrupta de Carga

Análisis de Resultados

En la Figura 3.5, se puede observar que la velocidad comienza a disminuir debido a la presencia de un gran paso de carga, momento en el cual se presenta la respuesta inercial debido a la energía cinética presente en el rotor de la máquina y cae hasta un valor de

1080,6 r.p.m equivalente a 54,03 Hz, la velocidad no sigue cayendo gracias al GOV que ordena que se aumente el voltaje de la armadura del motor haciéndolo girar más rápido y recuperar la velocidad a 1200 r.p.m equivalente a 60 Hz

3.2 Pruebas para determinar las características dinámicas del grupo motor - generador operando el GOV como turbina a vapor

La manera de obtener las características dinámicas es realizando un estudio de la respuesta transitoria y estado estable de la velocidad del motor cuando el regulador automático de velocidad le hace operar como un modelo de turbina a vapor.

Para la respuesta transitoria se determina, el máximo sobreimpulso, el tiempo de crecimiento, retardo, establecimiento, índice de amortiguamiento cuando el motor opera en vacío y ante la presencia de pasos de carga.

A continuación, se detalla cómo se calcula cada uno de los parámetros de la respuesta transitoria a partir de la gráfica.

Máximo sobreimpulso

$$M_p = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\text{ref}}}{\omega_{\text{ref}}} \times 100 \quad (3.12)$$

Donde:

ω_{\max} : Velocidad máxima que alcanza la máquina.

ω_{ref} : Velocidad nominal de referencia.

Índice de amortiguamiento

$$\xi = \frac{\log(M_p)^2}{\pi^2 + \log(M_p)^2} \quad (3.13)$$

Tiempo de establecimiento (T_s)

Este tiempo se determina cuando la respuesta de la velocidad se encuentra dentro de una banda permitida de ± 2 de la velocidad nominal.

Tiempo de crecimiento (T_r)

El tiempo de crecimiento para respuestas subamortiguadas se calcula cuando la velocidad se encuentra de 0 al 100% de la velocidad de referencia.

Tiempo de retardo (T_d)

Es el tiempo que el motor se demora en llegar a la mitad de su velocidad nominal.

Para la respuesta en estado estable se analiza la banda muerta.

3.2.1 Prueba en Vacío

Para esta prueba se enciende el GOV y se selecciona el modelo de turbina a vapor. El GOV controla la velocidad a través del voltaje de armadura, a través de un control PI para estabilizar en una velocidad de 1200 r.p.m.

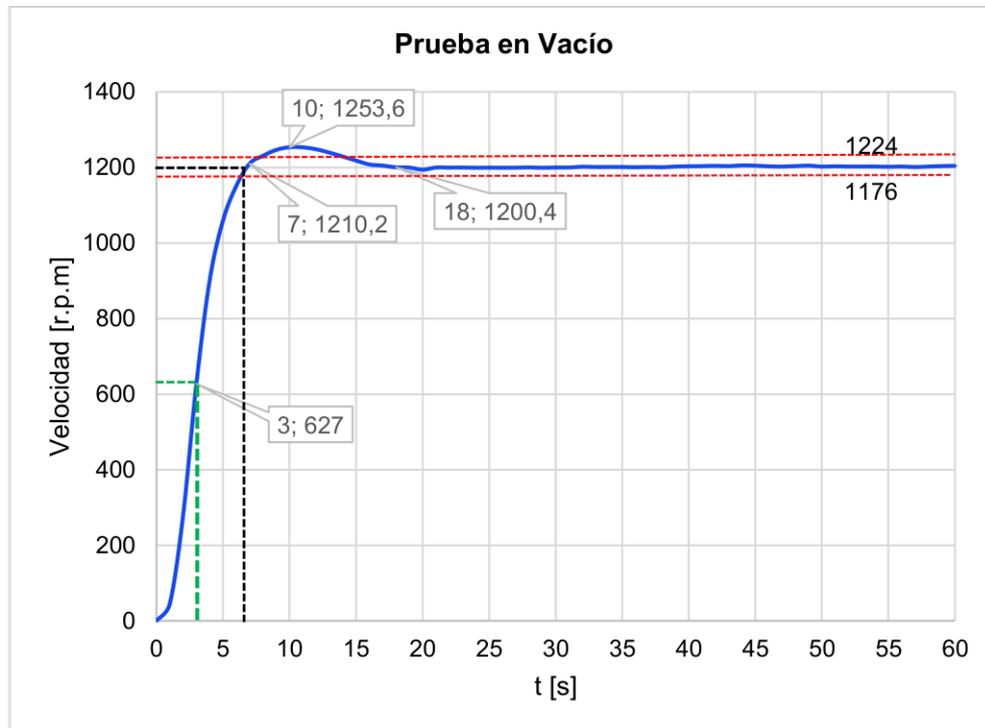


Figura 3.6. Respuesta transitoria de la prueba en vacío

Tabla 3.4. Resultados de la prueba de vacío

Parámetro	Valor	Unidad
Máximo Sobreimpulso	4,24	%
Índice de Amortiguamiento	0,7091	-
T. de Establecimiento	18	s
T. Máximo de Sobreimpulso	10	s
T. Crecimiento	6.5	s
T. de Retardo	3	s
Velocidad máxima	1253,6	r.p.m

En la Figura 3.6 se muestra la respuesta transitoria de la velocidad al momento del arranque del motor, en cual presenta un sobreimpulso de 1253,6 r.p.m en 10 s con un máximo sobreimpulso de 4,24%, tiene un índice amortiguamiento de 0,7091 que indica que es una respuesta subamortiguada.

3.2.2 Prueba de pasos de carga

El resultado de la prueba de pasos de carga se muestra en la Figura 3.7, para esta prueba se realizaron la conexión de tres pasos de cargas diferentes, ya que, las cargas del Laboratorio Físico de SEP son desbalanceadas, y luego se realizaron la desconexión de las 3 mismas cargas en orden descendente a como fueron encendidas.



Figura 3.7. Pasos de carga

3.2.2.1 Conexión paso de carga 1

Para este paso de carga como se muestra la Figura 3.8, la frecuencia cae hasta un valor de 56,13 Hz debido a la respuesta inercial, luego actúa el GOV y estabiliza la frecuencia en 60 Hz en 7 s, el tiempo de actuación de la respuesta inercial y la regulación de frecuencia es de 9 s. Además, el máximo sobreimpulso de la caída de la frecuencia es 6,45% con un índice de amortiguamiento de 0,657 es decir es una respuesta subamortiguada. Estas características de la respuesta transitoria se muestran en la Tabla 3.5.

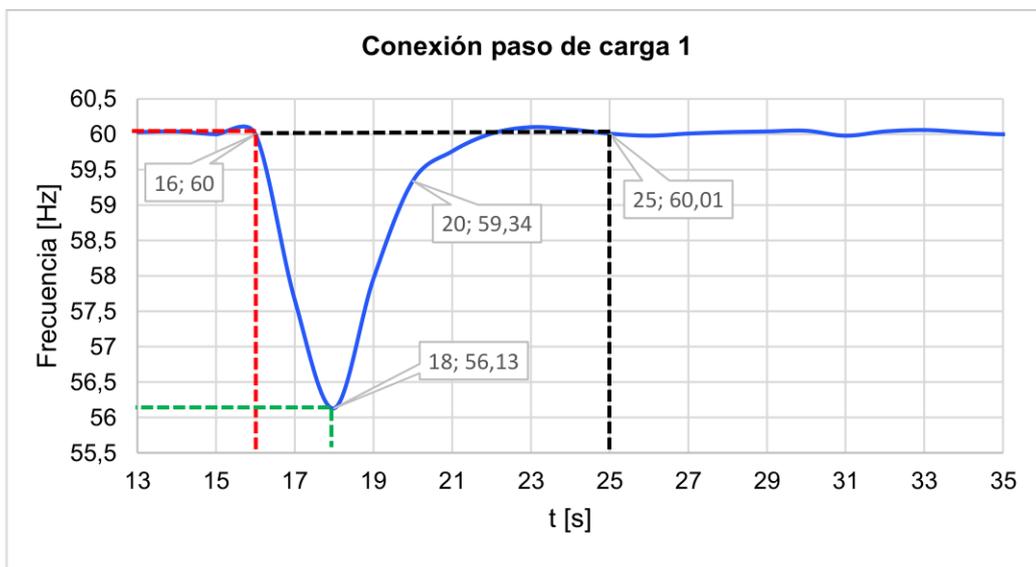


Figura 3.8. Conexión paso de carga 1

Tabla 3.5. Resultados de conexión paso de carga 1

Parámetro	Valor	Unidad
Máximo Sobreimpulso	6,45	%
Índice de Amortiguamiento	0,6574	-
T. de Establecimiento	9	s
T. Máximo de Sobreimpulso	2	s
T. Crecimiento	7	s
T. de Retardo	2	s
Frecuencia mínima	56,13	Hz

3.2.2.2 Conexión de la carga 2

Para este paso de carga como se muestra la Figura 3.9, la frecuencia cae hasta un valor de 56,07 Hz, luego actúa el GOV y estabiliza la frecuencia en 60 Hz en 15 s, el tiempo de actuación de la respuesta inercial y la regulación de frecuencia es de 18 s. Además, el máximo sobreimpulso de la caída de la frecuencia es 6,63% con un índice de amortiguamiento de 0,6537, es decir es una respuesta subamortiguada. Estas características de la respuesta transitoria se detallan en la Tabla 3.6.

En comparación con la carga 1, esta conexión de la carga 2 tiene un mayor porcentaje de máximo sobreimpulso, eso implica que existe mayor desviación de frecuencia, que indica que la carga conectada es más grande.

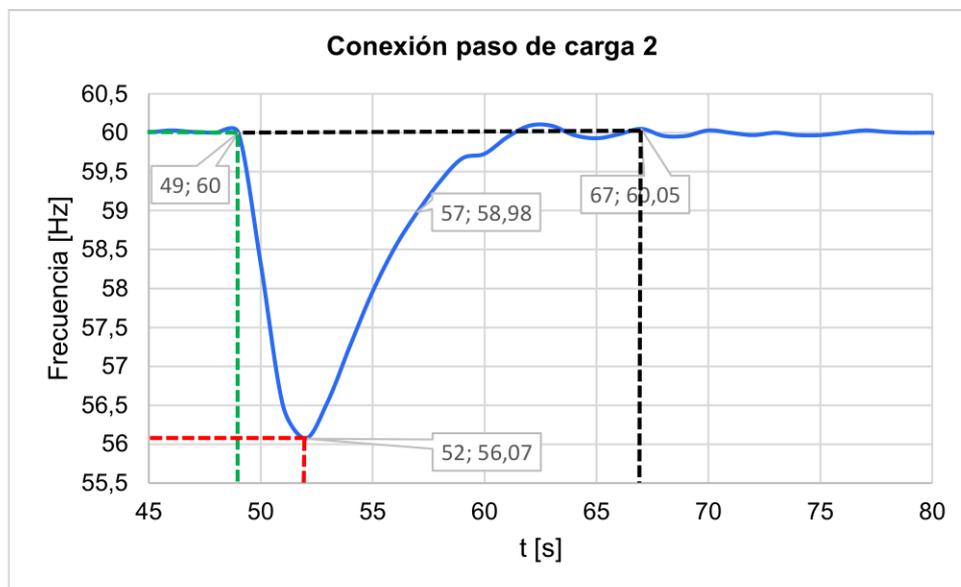


Figura 3.9. Conexión paso de carga 2

Tabla 3.6. Resultados de conexión paso de carga 2

Parámetro	Valor	Unidad
Máximo Sobreimpulso	6,63	%
Índice de Amortiguamiento	0,6537	-
T. de Establecimiento	18	s
T. Máximo de Sobreimpulso	3	s
T. Crecimiento	15	s
T. de Retardo	5	s
Frecuencia mínima	56,07	Hz

3.2.2.3 Conexión de la carga 3

Para este paso de carga como se muestra la Figura 3.10, la frecuencia cae hasta un valor de 57,9 Hz, luego actúa el GOV y estabiliza la frecuencia en 60 Hz en 14 s, el tiempo de actuación de la respuesta inercial y la regulación de frecuencia es de 17 s. Además, el máximo sobreimpulso de la caída de la frecuencia es 3,5% con un índice de amortiguamiento de 0,7297 es decir es una respuesta subamortiguada. Estas características de la respuesta transitoria se muestran en la Tabla 3.7.

En comparación con la carga 2 se puede observar que el paso de carga es más pequeño porque la desviación de frecuencia es más pequeña.

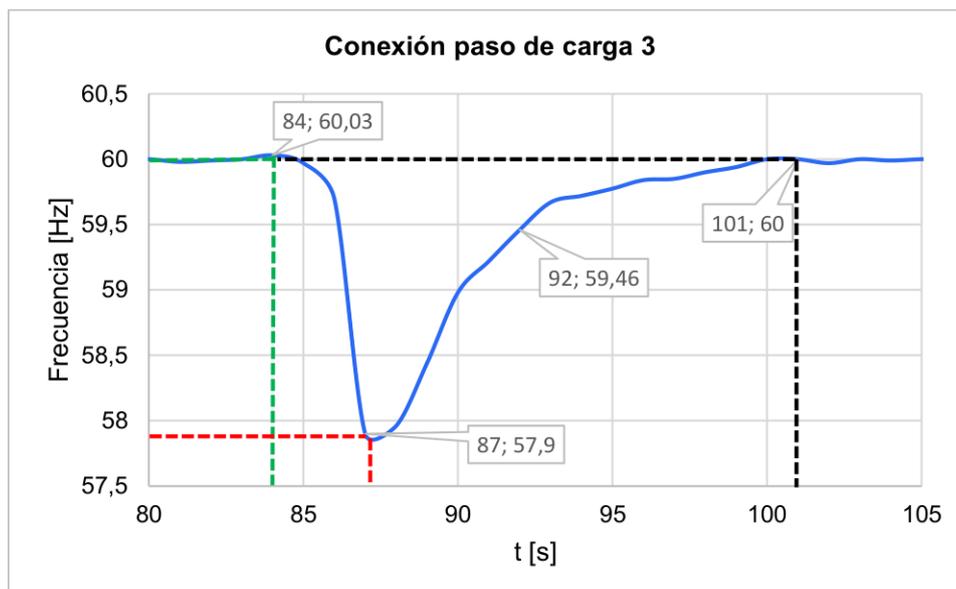


Figura 3.10. Conexión paso de carga 3

Tabla 3.7. Resultados de conexión paso de carga 3

Parámetro	Valor	Unidad
Máximo Sobreimpulso	3,5	%
Índice de Amortiguamiento	0,7297	-
T. de Establecimiento	17	s
T. Máximo de Sobreimpulso	3	s
T. Crecimiento	14	s
T. de Retardo	5	s
Frecuencia mínima	57,9	Hz

3.2.2.4 Desconexión de la carga 3

Al desconectar la carga 3, en la Figura 3.11 se observa que la frecuencia aumenta a un valor de 61,71 Hz, luego actúa el GOV y estabiliza la frecuencia en 60 Hz en 13 s, el tiempo de actuación de la respuesta inercial y la regulación de frecuencia es de 15 s. Además, el máximo sobreimpulso de la caída de la frecuencia es 2,75% con un índice de amortiguamiento de 0,7527, es decir es una respuesta subamortiguada.

Al comparar este caso con los resultados de la conexión de la carga 3, se puede mencionar que el GOV recupera más rápido la frecuencia cuando se realiza un rechazo de carga reduciendo el máximo sobreimpulso.

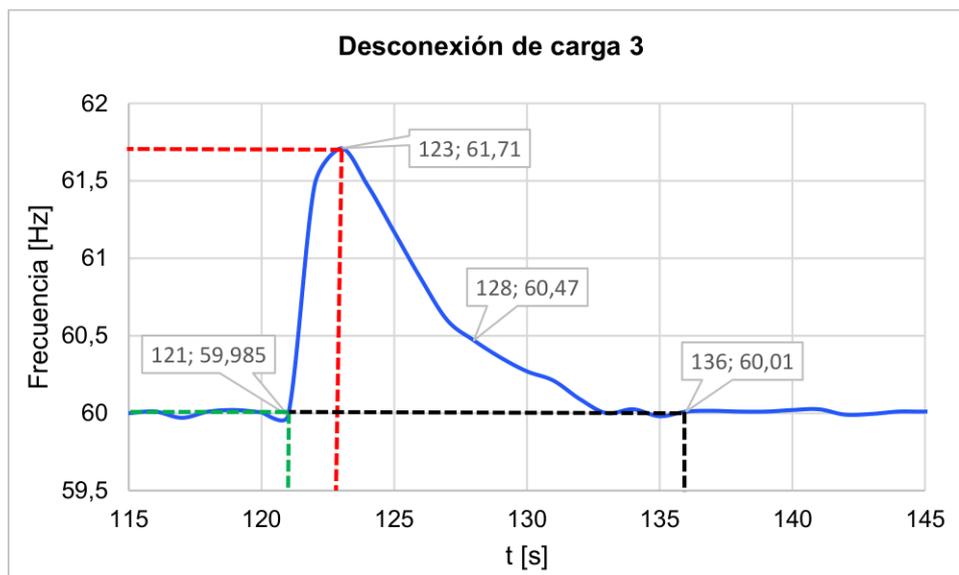


Figura 3.11. Desconexión paso de carga 3

Tabla 3.8. Resultados de desconexión paso de carga 3

Parámetro	Valor	Unidad
Máximo Sobreimpulso	2,75	%
Índice de Amortiguamiento	0,7527	-
T. de Establecimiento	15	s
T. Máximo de Sobreimpulso	2	s
T. Crecimiento	13	s
T. de Retardo	5	s
Frecuencia máxima	61,71	Hz

3.2.2.5 Desconexión de la carga 2

Al desconectar la carga 2, en la Figura 3.12 se observa que la frecuencia aumenta a un valor de 63,45 Hz, luego actúa el GOV y estabiliza la frecuencia en 60 Hz en 16 s, el tiempo de actuación de la respuesta inercial y la regulación de frecuencia es de 20 s. Además, el máximo sobreimpulso es de 5,48% con un índice de amortiguamiento de 0,6787.

Al comparar estos resultados con los de la conexión de la carga 2, se observa que el máximo sobreimpulso es menor, eso implica que la desviación de frecuencia en esta prueba es más pequeña que cuando se conecta la misma carga.

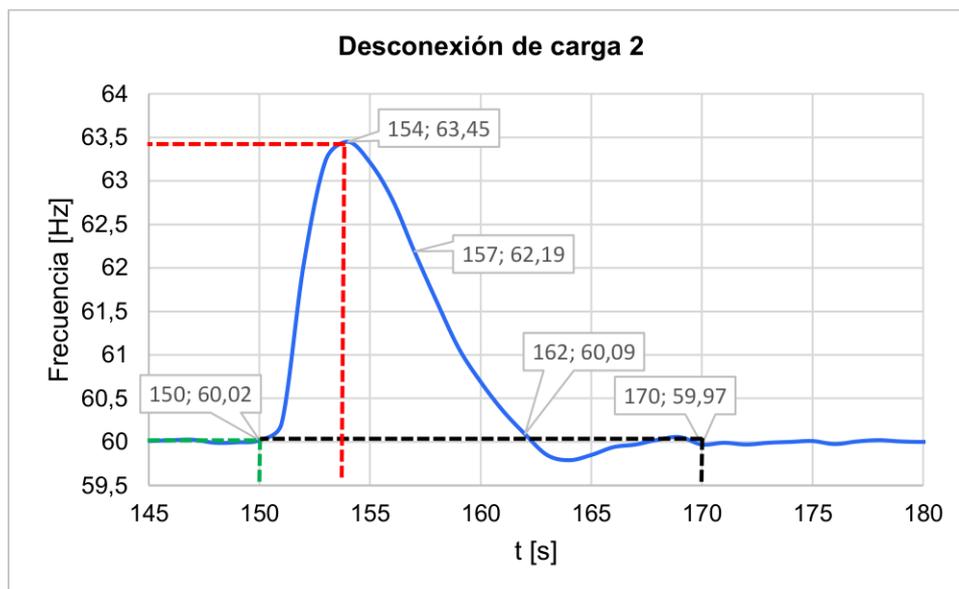


Figura 3.12. Desconexión paso de carga 2

Tabla 3.9. Resultados de desconexión paso de carga 2

Parámetro	Valor	Unidad
Máximo Sobreimpulso	5,48	%
Índice de Amortiguamiento	0,6787	-
T. de Establecimiento	20	s
T. Máximo de Sobreimpulso	4	s
T. Crecimiento	8	s
T. de Retardo	3	s
Frecuencia máxima	63,45	Hz

3.2.2.6 Desconexión de la carga 1

En la Figura 3.13 se observa la respuesta transitoria cuando se desconecta la carga 1, la frecuencia aumenta a un valor de 63,37 Hz, luego actúa el GOV y estabiliza la frecuencia en 60 Hz en 11 s, el tiempo de actuación de la respuesta inercial y la regulación de frecuencia es de 16 s. Además, el máximo sobreimpulso de la frecuencia es 5,30% con un índice de amortiguamiento de 0,6829.

Finalmente, después de haber analizado los tres pasos de carga en conexión y desconexión se puede mencionar que el GOV responde más rápido cuando se presenta una desconexión de carga y todas las respuestas son submortiguadas. De estos resultados analizados se puede mencionar que a mayor carga se presenta una mayor desviación de frecuencia.

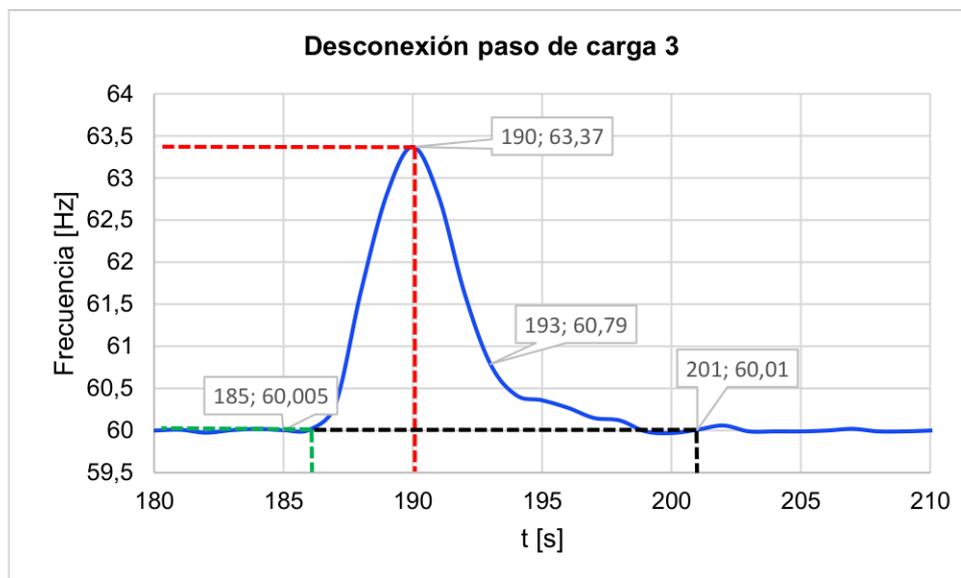


Figura 3.13. Desconexión paso de carga 3

Tabla 3.10. Resultados de desconexión paso de carga 3

Parámetro	Valor	Unidad
Máximo Sobreimpulso	5,30	%
Índice de Amortiguamiento	0,6829	-
T. de Establecimiento	16	s
T. Máximo de Sobreimpulso	5	s
T. Crecimiento	11	s
T. de Retardo	3	s
Frecuencia máxima	63,37	Hz

3.2.3 Banda muerta

La banda o zona muertas es la variación de potencia de salida con la que el generador empieza a responder, luego de un tiempo de continuo aumento o disminución de carga en sus terminales. Para la ejecución de esta prueba se realiza el siguiente procedimiento:

1. En el GOV se elige el modelo de turbina a vapor y se arranca el motor.
2. Se mueve el variac para controlar el voltaje de campo en el generador y así alcanzar un voltaje en terminales de 220V.
3. Se energiza el transformador principal, los corredores de transmisión compuestos de una de las líneas de transmisión transpuesta y no transpuesta, con sus respectivos transformadores.

4. Se verifica que al momento de energizar en el centro de cargas se tenga un voltaje monofásico de 127 V y una frecuencia de 60 Hz.
5. Al energizar las cargas disponibles del Laboratorio Físico de SEP, es necesario controlar el variac para que el voltaje no caiga de forma abrupta, porque no se dispone de un regulador de voltaje (AVR) en el generador y así mantener el voltaje en sus terminales cercano a 220V.
6. Con el formato Excel de adquisición de datos del vatímetro se grafica la potencia vs tiempo y la frecuencia vs tiempo, tal que se analiza el intervalo donde la potencia aumenta y la frecuencia no varía como se muestra en la Figura 3.14 y 3.15, respectivamente.

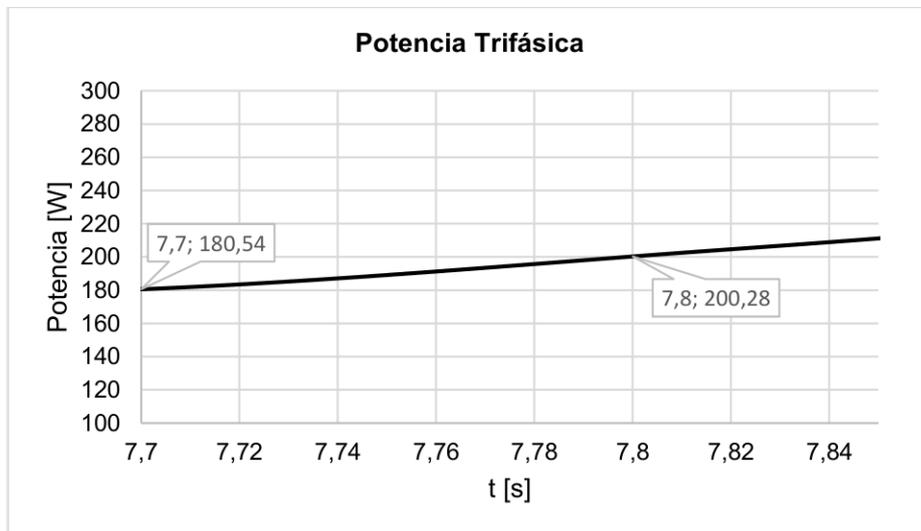


Figura 3.14. Potencia vs tiempo

El cálculo de la zona muerta se realiza a partir de (3.14):

$$Z_{\text{muerta}} = \frac{P_{\text{GOV}} - P_o}{P_B} \text{ [p. u.]} \quad (3.14)$$

Donde P_B es la potencia base.

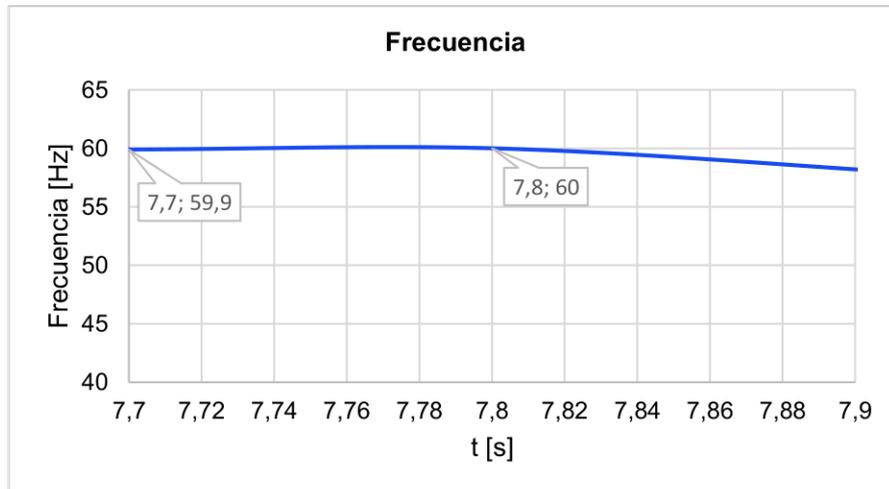


Figura 3.15. Frecuencia vs tiempo

Como se observa en la Figura 3.14 la conexión de carga se realiza a 7,7 s y el GOV comienza a actuar a los 7,8 s como tiene en la Figura 3.15, entonces el tiempo de respuesta es de 0,1 s. Además, durante ese intervalo de tiempo la potencia varía de 180,54 W a 200,28 W. En la Tabla 3.11, se muestra que el valor de la zona muerta es 0,00264664 p.u. ($2,65 \times 10^{-3} \%$).

Tabla 3.11. Resultados de la zona muerta

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia al instante de la conexión de carga [P_o]	180,54	W
Potencia antes de actuar el GOV [P_{GOV}]	200,28	W
Zona muerta	0,00264664	p.u.

4 CONCLUSIONES

- Con el rediseño de software utilizando el lenguaje de programación C - Arduino IDE, la incorporación de la medición de velocidad del encoder en la placa rediseñada de control y potencia implementado en el regulador automático de velocidad (GOV) y la implementación de un medidor de potencia por fase en los terminales del generador se puede evidenciar a través de las pruebas realizadas que el regulador automático de velocidad (GOV) tiene un correcto funcionamiento como modelo de turbina a vapor.
- Una vez diseñado y desarrollado la programación en lenguaje C - Arduino utilizando las bibliotecas de la tarjeta STM32F407G, las constantes de PI obtenidos con la aplicación PID Tuner de Matlab y al sintonizar el modelo dinámico del motor DC

como modelo de turbina a vapor, se simula y se envía la información a la tarjeta STM32F407G a través del puerto serial y no presenta errores de codificación, por lo tanto, el software desarrollado es funcional y permite un correcto funcionamiento del GOV operando como un modelo de turbina a vapor según se evidencia en la prueba de vacío.

- El rediseño de la placa de control y potencia permite generar la señal modular de ancho de pulso (PWM) y obtener los disparos de los tiristores SCR para un buen control de fase en el voltaje de armadura y además recepta y filtra la señal de velocidad proveniente del encoder de 1000 ppr permitiendo que se tenga un buen control de velocidad con mayor precisión, por lo tanto, el rediseño de esta placa es funcional porque el GOV como modelo de turbina a vapor recupera la frecuencia de 60 Hz en un valor promedio 18 s ante grandes pasos carga y en estado estacionario tiene una zona muerta de 0,00264664 por unidad con un tiempo de respuesta de 0,1 s.
- El medidor de potencia o vatímetro diseñado e implementado en el sistema GOV – motor-generador permite medir voltaje, corriente y factor de potencia por fase del generador sincrónico y con esos datos del medidor, a través del microcontrolador ESP32 calcula la potencia aparente, activa y reactiva. Por medio de la pantalla NEXTION y el puerto serial se puede visualizar y tomar los datos, respectivamente en tiempo real.
- El correcto funcionamiento del GOV como modelo de turbina a vapor y el vatímetro permitieron realizar las pruebas de vacío, de decaimiento, estatismo, desconexión y conexión de pasos de carga y por medio del macro realizado en Excel permite graficar y analizar el comportamiento de la velocidad, potencia y frecuencia y así obtener las características estáticas y dinámicas del grupo motor - generador.

5 RECOMENDACIONES

- En caso de seguir actualizando el programa con nuevos proyectos a futuro como el control secundario de frecuencia en el modelo de turbina a vapor es necesario que en el software Arduino IDE disponga de las bibliotecas apropiadas para el microcontrolador STM32F407G que pueden ser descargadas del mismo software o de la red. Además, en el software se debe configurar la tarjeta como STM32F407G - Disc1.
- Para que en el medidor de potencia comience a registrar y visualizar los valores es necesario pulsar en el botón datos y que todas las tres fases estén conectadas, en

caso de disponer de una sola fase se deben realizar puentes en las entradas de las fases para observar la potencia que consume la fase medida.

- En caso de implementar el control secundario de frecuencia se debe obtener la potencia trifásica, para ello se debe modificar el programa del medidor potencia sumar la potencia de cada fase y ese valor enviar a la tarjeta de la STM32F407G del GOV, para que esto sea posible se debe considerar un modelo de comunicación máster - esclavo donde el máster sea la tarjeta STM32F407G del GOV y el esclavo el microcontrolador ESP32 del vatímetro.
- El acoplamiento metálico del encoder debe estar totalmente asegurado e internamente el eje del motor con la del encoder no debe estar totalmente unido, ya que genera una fricción entre ambas y puede terminar rompiendo el eje del encoder o los engranajes que existe en su interior y provocar que el GOV no pueda realizar un buen control de velocidad.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, J. Yescas Milanés, y R. Navarro Salas, *Máquinas eléctricas*, 6a ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2004.
- [2] K. Cubi y A. Pilatuña, «Rediseño e implementación del grupo motor dc-generador sincrónico para el laboratorio de sistemas eléctricos de potencia», dic. 2018, Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19917>
- [3] B. S. Guru y J. Enríquez Brito, *Máquinas eléctricas y transformadores*. Mexico: Oxford University Press, 2003.
- [4] S. J. Chapman, C. Rodríguez Pérez, y S. D. Alfredo, *Máquinas eléctricas*, 5a ed. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [5] D. W. Hart, *Power electronics*. New York, NY: McGraw-Hill, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/613059832.pdf>
- [6] M. H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, 2{487} ed. México: Prentice-Hall, 1993.
- [7] A. J. Wood y B. F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*, 2nd ed. New York: J. Wiley & Sons, 1996.
- [8] P. Kundur, N. J. Balu, y M. G. Lauby, *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [9] J. Trujillo Soto, «Simulación del control Potencia-Frecuencia en un Sistema Eléctrico de Potencia en Matlab», 2016.
- [10] J. E. Calle, J. J. Gutiérrez, y Á. Á. Orozco, «Medición de variables eléctricas utilizando señales digitalizadas», *Scientia et technica*, vol. 1, n.º 24, 2004.

- [11] Arduino, «Arduino Official Store | Boards Shields Kits Accessories». Accedido: 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/>
- [12] STM32, «STM32F407/417 - STMicroelectronics», STM32. Accedido: 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html>
- [13] ESP32, «ESP32-DevKitC Board | Espressif». Accedido: 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.espressif.com/en/products/devkits/esp32-devkitc>
- [14] M. P. Gavilema Chaquina y J. L. Sanunga Cando, «Diseño y construcción de un sistema automático de regulación de velocidad del grupo motor DC-generator sincrónico de 10 hp del laboratorio físico de Sistemas Eléctricos de Potencia.», mar. 2022, Accedido: 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22274>
- [15] Semikron, «SKKH106 pdf, SKKH106 Description, SKKH106 Datasheet, SKKH106 view ::: ALLDATASHEET »: Accedido: 4 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/89068/SEMIKRON/SKKH106.html>
- [16] Omron, «E6B2-CWZ3E 1000P/R 2M Omron Automation and Safety | Mouser Ecuador». Accedido: 4 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mouser.ec/ProductDetail/Omron-Automation-and-Safety/E6B2-CWZ3E-1000P-R-2M?qs=TwPrcXezm70MKmjhAe2Mvw%3D%3D>
- [17] D. Giraldo y I. Tabares, «Teoría de control - Didier Giraldo Buitrago, Iván Tabares Gómez - Google Libros». Accedido: 4 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=C0bwjgEACAAJ>
- [18] H. Saadat, *Power system analysis*, 3. ed. S.I.: PSA Publishing, 2010.
- [19] A. NEPLAN, «Turbine-governor models», 2015.
- [20] ARCERNNR, «Regulación – Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables». Accedido: 5 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/regulacion-y-control/>

7 ANEXOS

MANDO DE CONTROL DE CARGAS



CARGAS EXISTENTES EN EL LABORATORIO FÍSICO DE SEP

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
CENTRO DE CONTROL DE CARGAS

TOMAS EXTERNOS FRONTALES 1φ																																												
FASE A			FASE A			FASE A			INTERRUPTOR 1																																			
VARIABLES	ARMÓNICOS		VARIABLES	ARMÓNICOS		VARIABLES	ARMÓNICOS		VARIABLES	ARMÓNICOS																																		
P [W]	1161	1	100	P [W]	59.43	1	100	A	C	P [W]	59.43	1	100																															
V [V]	127.1	3	2	V [V]	127	3	9.9	V [V]		V [V]	127	3	9.9																															
I [A]	9.137	5	0.1	I [A]	0.975	5	1.0	I [A]		I [A]	0.975	5	1.0																															
Q [VAr]	0.0	7	1	Q [VAr]	107.6	7	0.3	Q [VAr]		Q [VAr]	107.6	7	0.3																															
fp	1	9	0.4	fp	0.48	9	0.7	fp		fp	0.48	9	0.7																															
DC [%]	0.1	11	0.1	DC [%]	3.7	11	0.1	DC [%]		DC [%]	3.7	11	0.1																															
CAFETERA			REFRIGERADOR			LÁMPARA DE SOOJO																																						
FASE A			FASE A			FASE A			INTERRUPTOR 2																																			
P [W]	872.9	1	100	P [W]	1615	1	100	P [W]		P [W]	70.29	1	100																															
V [V]	127.5	3	19	V [V]	127.1	3	2	V [V]		V [V]	220	3	3																															
I [A]	7.08	5	1	I [A]	12.71	5	0.1	I [A]		I [A]	9.137	5	8.4																															
Q [VAr]	113.5	7	1	Q [VAr]	0.0	7	1	Q [VAr]		Q [VAr]	236.8	7	10																															
fp	0.967	9	0	fp	1	9	0.4	fp		fp	0.28	9	5																															
DC [%]	0.1	11	0	DC [%]	0.1	11	0.1	DC [%]		DC [%]	3.2	11	7																															
ASPIRADORA			CALEFACTOR			LÁMPARA DE MERCURIO																																						
TOMA EXTERNO LATERAL 2φ																																												
A			C			INTERRUPTOR 5			INTERRUPTOR 6																																			
P [W]	2122	1	100.0	P [W]	16.54	1		P [W]		P [W]	1161	1	100																															
V [V]	221.9	3	5.0	V [V]	127.1	3	3	V [V]		V [V]	127.1	3	2																															
I [A]	9.78	5	0.9	I [A]	0.25	5	15.6	I [A]		I [A]	9.137	5	0.1																															
Q [VAr]	448	7	1.0	Q [VAr]	6.89	7	10	Q [VAr]		Q [VAr]	0.0	7	1																															
fp	0.978	9	0.3	fp	0.52	9	5	fp		fp	1	9	0.4																															
DC [%]	1	11	0.2	DC [%]	0.1	11	7	DC [%]		DC [%]	0.1	11	0.1																															
AIRE ACONDICIONADO			FOCOS AHORRADORES			UPS-EQUIPOS, TV, RADIO, DVD, COMPUTADOR																																						
BREAKER 4																																												
A			B			C			INTERRUPTOR 8			INTERRUPTOR 9																																
P [W]	1161	1	100	P [W]	1161	1	100	P [W]		P [W]	10.09	1	100																															
V [V]	127.1	3	97.1	V [V]	127.1	3	2	V [V]		V [V]	127	3	85.6																															
I [A]	9.137	5	91.4	I [A]	9.137	5	0.1	I [A]		I [A]	0.131	5	62.7																															
Q [VAr]	0.0	7	83.5	Q [VAr]	0.0	7	1	Q [VAr]		Q [VAr]	5.246	7	39.9																															
fp	0.991	9	73.8	fp	1	9	0.4	fp		fp	0.607	9	25.4																															
DC [%]	0.1	11	63.1	DC [%]	0.1	11	0.1	DC [%]		DC [%]	0.6	11	19.7																															
VARIADOR DE VELOCIDAD			LÁMPARAS INCANDESCENTES			FOCOS LED																																						
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>FASE A</td> <td>P [W]</td> <td>4060</td> </tr> <tr> <td>FASE A</td> <td>Q [VAr]</td> <td>708</td> </tr> <tr> <td>FASE C</td> <td>P [W]</td> <td>3872</td> </tr> <tr> <td>FASE C</td> <td>Q [VAr]</td> <td>962</td> </tr> </table>												FASE A	P [W]	4060	FASE A	Q [VAr]	708	FASE C	P [W]	3872	FASE C	Q [VAr]	962																					
FASE A	P [W]	4060																																										
FASE A	Q [VAr]	708																																										
FASE C	P [W]	3872																																										
FASE C	Q [VAr]	962																																										
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>FASE C</td> <td>VARIABLES</td> <td>ARMÓNICOS</td> </tr> <tr> <td>LÁMPARAS FLUORESCENTES</td> <td>P [W]</td> <td>10.09</td> <td>1</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td></td> <td>V [V]</td> <td>127</td> <td>3</td> <td>85.6</td> </tr> <tr> <td></td> <td>I [A]</td> <td>0.131</td> <td>5</td> <td>62.7</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Q [VAr]</td> <td>5.246</td> <td>7</td> <td>39.9</td> </tr> <tr> <td></td> <td>fp</td> <td>0.607</td> <td>9</td> <td>25.4</td> </tr> <tr> <td></td> <td>DC [%]</td> <td>0.6</td> <td>11</td> <td>19.7</td> </tr> </table>												FASE C	VARIABLES	ARMÓNICOS	LÁMPARAS FLUORESCENTES	P [W]	10.09	1	100		V [V]	127	3	85.6		I [A]	0.131	5	62.7		Q [VAr]	5.246	7	39.9		fp	0.607	9	25.4		DC [%]	0.6	11	19.7
FASE C	VARIABLES	ARMÓNICOS																																										
LÁMPARAS FLUORESCENTES	P [W]	10.09	1	100																																								
	V [V]	127	3	85.6																																								
	I [A]	0.131	5	62.7																																								
	Q [VAr]	5.246	7	39.9																																								
	fp	0.607	9	25.4																																								
	DC [%]	0.6	11	19.7																																								

PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

Vacío		Decaimiento		Desconexión Abrupta de Carga		Conexión Abrupta de Carga	
t [s]	w [r.p.m]	t [s]	w [r.p.m]	t [s]	w [r.p.m]	t [s]	w [r.p.m]
60	1204,2	32	0	35	1199,4	41	1200,6
59	1203,6	31	0	34	1199,4	40	1201,2
58	1202,4	30	0	33	1200	39	1201,2
57	1201,2	29	0	32	1199,4	38	1200,6
56	1202,4	28	0	31	1199,4	37	1200,6
55	1201,8	27	0	30	1200,8	36	1201,2
54	1202,4	26	0	29	1200,2	35	1200,6
53	1202,4	25	0	28	1199,4	34	1200,6
52	1202,4	24	0	27	1199,8	33	1200
51	1203	23	31,8	26	1199,4	32	1200
50	1202,4	22	102,6	25	1200,4	31	1200,6
49	1204,8	21	176,4	24	1200,8	30	1200
48	1203,6	20	249	23	1199,6	29	1199,4
47	1202,4	19	322,2	22	1199,6	28	1200,2
46	1203	18	395,4	21	1198,8	27	1200
45	1204,8	17	469,2	20	1199,4	26	1198,2
44	1205,4	16	549	19	1199,6	25	1200,6
43	1203,6	15	627	18	1199,4	24	1201,8
42	1204,2	14	707,4	17	1201	23	1199,4
41	1203,6	13	795	16	1203	22	1200
40	1203	12	873	15	1206,6	21	1200,6
39	1202,4	11	957	14	1212	20	1200,6
38	1200,6	10	1045,2	13	1218,6	19	1197,6
37	1201,2	9	1135,2	12	1228,8	18	1197
36	1200,6	8	1200,2	11	1238,4	17	1194,6
35	1201,2	7	1206	10	1251,6	16	1188
34	1201,2	6	1205,4	9	1264,8	15	1177,2
33	1201,2	5	1205,4	8	1276,2	14	1163,4
32	1201,8	4	1206	7	1285,8	13	1149
31	1200	3	1206	6	1284,6	12	1127,4
30	1199,8	2	1205,4	5	1270,2	11	1102,8
29	1199,2	1	1205,4	4	1237	10	1080,6
28	1200	0	1206,6	3	1200,6	9	1085,4
27	1199,4			2	1201,2	8	1151,4
26	1199,2			1	1201,2	7	1200,2
25	1199,4			0	1200,6	6	1198,2
24	1199,2					5	1199,4
23	1199,8					4	1201,2
22	1199,6					3	1200,6
21	1199,8					2	1201,2

20	1194					1	1200,6
19	1199,8					0	1200
18	1200,4						
17	1205						
16	1208						
15	1218,2						
14	1229						
13	1239,2						
12	1248,2						
11	1253,2						
10	1253,6						
9	1246,4						
8	1230,8						
7	1210,2						
6	1151,4						
5	1059,6						
4	901,8						
3	627						
2	279						
1	45						
0	0						

Prueba de Estadismo

Potencia [W]	Frecuencia [Hz]						
0	69,8	2300,61	59,9	2305,69	60	2290,06	59,9
752,86	69,8	2285,15	59,9	2307	60	2290,22	60
1706,96	69,2	2288,94	59,9	2310,55	59,9	2300,08	60
2107,72	65,6	2290,73	59,9	2305,87	60	2283,7	60
2319,43	60	2307,15	59,9	2307,66	60	2302	60
2307,08	59,9	2292,94	59,9	2291,89	60	2297,08	59,9
2307,33	60	2288,34	60	2292,21	60		
2307,13	60	2314,27	60	2290,22	60		
2301,66	60	2312,63	60	2297,54	60		
2301,27	60	2325,11	59,9	2307,1	60		
2303,71	59,9	2318,69	60	2298,77	60		
2306,91	59,9	2313,94	60	2301,64	60		
2304,03	59,8	2312,68	59,9	2267,59	60		
2334,47	60	2308,56	60	2323,79	60		
2327,3	59,9	2292,37	59,9	2355,47	59,7		
2290,84	60	2290,71	60	2284,75	59,8		
2299,76	60	2307,83	60	2299,33	59,9		

PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

Pasos de conexión de carga

Paso 1			Paso 2			Paso 3		
t [s]	w [r.p.m]	f [Hz]	t [s]	w [r.p.m]	f [Hz]	t [s]	w [r.p.m]	f [Hz]
48	1200,6	60,03	82	1199,8	59,99	120	1200,1	60,005
47	1200,2	60,01	81	1199,6	59,98	119	1200,4	60,02
46	1200,6	60,03	80	1200	60	118	1200,2	60,01
45	1200,2	60,01	79	1200	60	117	1199,4	59,97
44	1200,2	60,01	78	1200,2	60,01	116	1200,2	60,01
43	1200	60	77	1200,6	60,03	115	1200	60
42	1200,6	60,03	76	1200	60	114	1199,4	59,97
41	1200,2	60,01	75	1199,4	59,97	113	1200	60
40	1200,8	60,04	74	1199,4	59,97	112	1200	60
39	1199,6	59,98	73	1200	60	111	1199,8	59,99
38	1199,8	59,99	72	1199,4	59,97	110	1199,4	59,97
37	1200	60	71	1200	60	109	1200	60
36	1200,4	60,02	70	1200,6	60,03	108	1200	60
35	1200	60	69	1199,2	59,96	107	1199,4	59,97
34	1200,6	60,03	68	1199,2	59,96	106	1200	60
33	1201,2	60,06	67	1201	60,05	105	1200	60
32	1200,8	60,04	66	1199,6	59,98	104	1199,8	59,99
31	1199,6	59,98	65	1198,6	59,93	103	1200	60
30	1201	60,05	64	1199,4	59,97	102	1199,4	59,97
29	1200,8	60,04	63	1201,8	60,09	101	1200	60
28	1200,6	60,03	62	1201,8	60,09	100	1200	60
27	1200,2	60,01	61	1198,8	59,94	99	1198,8	59,94
26	1199,6	59,98	60	1194,6	59,73	98	1198	59,9
25	1200,2	60,01	59	1193,4	59,67	97	1197	59,85
24	1201,4	60,07	58	1187,4	59,37	96	1196,8	59,84
23	1202	60,1	57	1179,6	58,98	95	1195,5	59,775
22	1200,2	60,01	56	1170,6	58,53	94	1194,4	59,72
21	1195,2	59,76	55	1159,2	57,96	93	1193,4	59,67
20	1186,8	59,34	54	1145,4	57,27	92	1189,2	59,46
19	1159,2	57,96	53	1131	56,55	91	1184,4	59,22
18	1122,6	56,13	52	1121,4	56,07	90	1179,6	58,98
17	1153,2	57,66	51	1129,8	56,49	89	1168,8	58,44
16	1200	60	50	1166,4	58,32	88	1159,2	57,96
15	1200	60	49	1200	60	87	1158	57,9

14	1200,8	60,04	48	1200	60	86	1194	59,7
13	1200,6	60,03	47	1200,2	60,01	85	1199,4	59,97
12	1200,3	60,015	46	1200,6	60,03	84	1200,6	60,03
11	1200,5	60,025	45	1200,2	60,01	83	1200	60
10	1199,3	59,965	44	1200,8	60,04	82	1199,8	59,99
9	1200,6	60,03	43	1200	60	81	1199,6	59,98
8	1200,6	60,03				80	1200	60
7	1201,2	60,06				79	1200	60
6	1201,2	60,06				78	1200,2	60,01
5	1200,6	60,03				77	1200,6	60,03
4	1200,6	60,03						
3	1200,3	60,015						
2	1200,2	60,01						
1	1199,4	59,97						
0	1199,4	59,97						

Pasos de desconexión de carga

Paso de 1			Paso 2			Paso 3		
t [s]	w [r.p.m]	f [Hz]	t [s]	w [r.p.m]	f [Hz]	t [s]	w [r.p.m]	f [Hz]
149	1199,9	59,995	185	1200,1	60,005	224	1200	60
148	1199,8	59,99	184	1200,4	60,02	223	1199,4	59,97
147	1200,5	60,025	183	1200,1	60,005	222	1199,5	59,975
146	1200,4	60,02	182	1199,5	59,975	221	1200,5	60,025
145	1200,2	60,01	181	1200,2	60,01	220	1200,1	60,005
144	1200,2	60,01	180	1200	60	219	1199,9	59,995
143	1199,9	59,995	179	1200,1	60,005	218	1199,8	59,99
142	1199,8	59,99	178	1200,4	60,02	217	1199,4	59,97
141	1200,5	60,025	177	1200,1	60,005	216	1200,6	60,03
140	1200,4	60,02	176	1199,5	59,975	215	1200,2	60,01
139	1200,2	60,01	175	1200,2	60,01	214	1199,8	59,99
138	1200,2	60,01	174	1200	60	213	1199,4	59,97
137	1200,3	60,015	173	1199,8	59,99	212	1200	60
136	1200,2	60,01	172	1199,4	59,97	211	1200,2	60,01
135	1199,6	59,98	171	1199,8	59,99	210	1200	60
134	1200,5	60,025	170	1199,4	59,97	209	1199,8	59,99
133	1200	60	169	1201,1	60,055	208	1199,8	59,99
132	1201,8	60,09	168	1200,5	60,025	207	1200,4	60,02
131	1204,2	60,21	167	1199,4	59,97	206	1200	60

130	1205,4	60,27	166	1198,8	59,94	205	1199,8	59,99
129	1207,2	60,36	165	1197	59,85	204	1199,8	59,99
128	1209,4	60,47	164	1195,8	59,79	203	1199,8	59,99
127	1212	60,6	163	1197	59,85	202	1201,2	60,06
126	1217,4	60,87	162	1201,8	60,09	201	1200,2	60,01
125	1223,4	61,17	161	1207,2	60,36	200	1199,4	59,97
124	1229,4	61,47	160	1213,8	60,69	199	1199,8	59,99
123	1234,2	61,71	159	1221,6	61,08	198	1202,4	60,12
122	1229,4	61,47	158	1232,4	61,62	197	1203	60,15
121	1199,7	59,985	157	1243,8	62,19	196	1205,4	60,27
120	1200,1	60,005	156	1255,8	62,79	195	1207,2	60,36
119	1200,4	60,02	155	1264,2	63,21	194	1208,4	60,42
118	1200,2	60,01	154	1269	63,45	193	1215,8	60,79
117	1199,4	59,97	153	1264,8	63,24	192	1232,6	61,63
116	1200,2	60,01	152	1240,8	62,04	191	1255,6	62,78
115	1200	60	151	1204,2	60,21	190	1267,4	63,37
			150	1200,4	60,02	189	1256,2	62,81
			149	1199,9	59,995	188	1233,2	61,66
			148	1199,8	59,99	187	1206	60,3
			147	1200,5	60,025	186	1200,2	60,01
			146	1200,4	60,02	185	1200,1	60,005
			145	1200,2	60,01	184	1200,4	60,02
						183	1200,1	60,005
						182	1199,5	59,975
						181	1200,2	60,01
						180	1200	60

Prueba de Banda Muerta

t [s]	f [Hz]	P [W]	t [s]	f [Hz]	P [W]
16	59,8	367,07	7,3	59,8	175,55
15,9	59,9	369,31	7,2	59,9	178,67
15,8	60,2	368,83	7,1	59,9	175,7
15,7	60	373,36	6,9	59,9	176,62
15,6	59,6	369,7	6,8	59,8	177,61
15,5	59,8	373,53	6,7	59,9	175,26
15,4	59,8	365,4	6,6	59,9	177,76
15,3	59,8	360,45	6,5	60	185,39
15,2	59,8	373,78	6,4	60	182,04
15,1	59,8	368,09	6,3	60	176,38
15	59,8	360,8	6,2	60	181,99
14,9	59,7	366,56	6,1	60,1	177,04
14,8	60	360,63	6	59,9	176,2
14,7	60	360,14	5,9	59,8	179,05
14,6	60	365,87	5,8	59,8	175,24
14,5	59,6	368,75	5,7	59,9	174,46
14,4	60	365,6	5,6	59,8	175,67
14,3	60,3	363,77	5,5	59,9	176,58
14,2	59,7	369	5,4	60	178,76
14,1	59,8	367,58	5,3	60,1	175,47
14	60,1	372,49	5,2	60	178,46
13,9	59,6	365,62	5,1	59,9	177,57
13,8	59,8	365,78	5	60	180,29
13,7	59,8	365,91	4,9	60	178,8
13,6	59,8	368,29	4,8	59,9	179,5
13,5	59,8	363,31	4,7	59,8	176,65
13,4	59,9	370,32	4,6	59,6	180,16
13,3	60,3	375,1	4,5	59,7	182,71
13,2	59,8	362,07	4,4	59,6	175,75
13,1	59,8	371,77	4,3	59,8	179,15
13	59,9	375,42	4,2	59,8	181,84
12,9	60	365,01	4,1	59,8	177,32
12,8	60,1	366,52	4	59,8	175,71
12,7	60,1	366,52	3,9	60	176,12
12,6	60,3	368	3,8	60,3	180,46
12,5	60,2	374,53	3,7	60,1	176,8
12,4	60,3	371,22	3,6	59,8	176,64
12,3	60,2	368,88	3,5	59,9	177,71
12,2	60,3	369,82	3,4	59,9	177,18
12,1	59,9	361,8	3,3	60	176,57
12	59,9	364,24	3,2	60,2	179,21
11,9	59,8	361,68	3,1	60,3	178,79
11,8	59,8	367,43	3	60	180,53

11,7	59,8	371,26	2,9	59,9	179,08
11,6	59,6	375,36	2,8	59,8	178,43
11,5	59,9	370,6	2,7	59,8	175,46
11,4	59,7	380,46	2,6	59,9	178,51
11,3	59,8	381,21	2,5	60	175,87
11,2	59,7	367,47	2,4	59,9	179,88
11,1	59,8	384,06	2,3	60	177,99
11	60,1	377,74	2,2	59,9	179,9
10,9	59,9	380,85	2,1	59,8	175,59
10,8	60,1	380,31	2	59,8	175,09
10,7	60,3	382,05	1,9	59,8	178,09
10,6	60,2	383,98	1,8	59,8	178,22
10,5	60,3	383,4	1,7	60	184,14
10,4	60,1	381,53	1,6	60,1	184,72
10,3	60,1	378,65	1,5	60	188,59
10,2	60,3	370,74	1,4	59,8	182,88
10,1	60,2	372,8	1,3	59,7	181,76
10	60	370,16	1,2	59,8	185,55
9,9	60	383,31	1,1	59,8	184,37
9,8	59,9	364,78	1	59,7	187,14
9,7	59,9	365,82	0,9	59,7	183,3
9,6	60	364,34	0,8	59,7	184,96
9,5	60,1	373,28	0,7	59,6	186,47
9,4	59,8	365,86	0,6	59,8	186,07
9,3	59,6	360	0,5	59,7	189,66
9,2	59,5	362,51	0,4	59,8	189,12
9,1	59,2	375,77	0,3	60	183,27
9	59	370,25	0,2	60,1	185,82
8,9	58,7	385,14	0,1	60,1	185,12
8,8	58,3	370,77	0	60	180,2
8,7	57,7	379,04			
8,6	57,2	377,27			
8,5	56,3	382,9			
8,4	55,4	366,07			
8,3	54,5	348,8			
8,2	54,6	337,39			
8,1	54,7	316,6			
8	55,8	278,44			
7,9	58,2	226,07			
7,8	60	200,28			
7,7	59,9	180,54			
7,6	59,9	175,36			
7,5	59,8	177,26			
7,4	59,8	179,74			