

# **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  
HIDRÁULICA 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**

**EDGAR HUMBERTO ANDRANGO TAPIA**

**edgar.andrango@epn.edu.ec**

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

**jesus.jativa@epn.edu.ec**

**DMQ, febrero 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Edgar Humberto Andrango Tapia, 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.

---

**Edgar Humberto Andrango Tapia**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Edgar Humberto Andrango Tapia, 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 producto resultante 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.

EDGAR HUMBERTO ANDRANGO TAPIA

Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA Ph.D

## DEDICATORIA

Comenzamos sin saber que hacer en la vida

Con altos y bajos

Con vicios y descuidos

Buenas y malas voces rodearon el camino

La entereza me permitió formar parte de la Escuela Politécnica Nacional

Ha llegado el último paso y quiero dedicar este trabajo

A mi madre, Martha Tapia

y,

A mi padre, Luis Andrango

Rendirse jamás

Luchar por aquello siempre

.....

E.H.A.T



## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por haberme dado la sabiduría y fuerza para no decaer en el transcurso de la vida.

A mis padres, quienes son mi motor para seguir adelante, y han sido parte de mi formación personal y profesional. Mi madre, que con su sacrificio diario y apoyo incondicional me ha motivado día a día para seguir adelante. Mi padre, con su apoyo y consejos de nunca decaer en el camino me ha permitido encaminarme por buen camino.

A mi hermano y hermanas, por la motivación.

A Jessy, por la inspiración y soporte desde el primer instante que ingresé a la Escuela Politécnica Nacional.

A Emy, por impulsarme a seguir con la misma determinación.

A Cristina, por haber estado a mi lado en este tiempo.

Al Dr. Jesús Játiva que sin su guía no hubiera sido posible la culminación del proyecto. Por la confianza y las enseñanzas durante la carrera.

Al Ing. Juan Galarza que gracias a su ayuda y apoyo fue posible la realización del presente trabajo. Una persona a la que estaré eternamente agradecido.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1 INTRODUCCIÓN .....	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 DC.....	4
1.4.3 Regulador automático de velocidad .....	7
1.4.4 Medidor de voltaje .....	10
1.4.5 Medidor de corriente .....	11
1.4.6 Medidor de factor de potencia .....	12
1.4.7 Control de velocidad motor DC.....	13
1.4.8 Microcontroladores.....	16
2 METODOLOGÍA .....	17
2.1 Rediseño regulador automático de velocidad .....	17
2.1.1 Estudio de condiciones operativas del regulador automático de velocidad GOV ...	17
2.1.2 Hardware: rediseño tarjeta de potencia y control.....	18
2.1.3 Encoder .....	24
2.1.4 Software: rediseño programación en Lenguaje C-Arduino.....	25
2.1.5 Pantalla NEXTION .....	37
2.2 Medidor de voltaje, corriente y factor de potencia.....	38
2.2.1 Medidor de voltaje .....	38
2.2.2 Medidor de corriente .....	39
2.2.3 Medidor de factor de potencia .....	39
2.2.4 Procesamiento de datos.....	40
2.2.5 Transmisión de datos a pantalla Nextion.....	41

2.2.6	Adquisición de datos .....	42
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	43
3.1	Pruebas para obtener las características estáticas del grupo motor- generador de una central hidráulica.....	43
3.1.1	Prueba de vacío .....	44
3.1.2	Desconexión abrupta de carga.....	45
3.1.3	Prueba de decaimiento .....	47
3.1.4	Conexión abrupta de carga .....	48
3.1.5	Estatismo .....	49
3.2	Pruebas para obtener las características dinámicas del grupo motor- generador de una central hidráulica.....	51
3.2.1	Pasos de carga .....	51
3.2.2	Banda muerta.....	58
3.3	Conclusiones.....	60
3.4	Recomendaciones.....	61
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
5	ANEXOS.....	64

## RESUMEN

El presente trabajo es el desarrollo de un rediseño de un regulador automático de velocidad GOV para el grupo motor-generador del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia considerando como base un trabajo de integración realizado anteriormente.

El GOV se compone de hardware y software. En el hardware se tiene la tarjeta de potencia y control para generar los disparos de los tiristores, y lectura de velocidad proveniente del encoder. Por otro lado, el software contiene el modelo de turbina hidráulica, el control PI y la lectura de datos donde la programación se realiza en Lenguaje C-Arduino.

Adicionalmente, se incorpora un módulo para la medición de potencia activa, reactiva y aparente del generador sincrónico a través de las mediciones en tiempo real de voltajes, corrientes y factor de potencia.

Finalmente, se realiza las pruebas en el laboratorio. Las pruebas por realizar son: vacío, rechazo de carga, pasos de carga, estatismo, desconexión de carga y banda muerta.

**PALABRAS CLAVE:** Rediseño regulador automático de velocidad, modelo de turbina hidráulica, Lenguaje C-Arduino, módulo de medición de potencia, pruebas de laboratorio.

## **ABSTRACT**

The present work is the development of a redesign of an automatic speed regulator GOV for the motor-generator group of the Physical Laboratory of Electrical Power Systems considering as a basis an integration work carried out previously.

The GOV is made up of hardware and software. In the hardware there is the power and control card to generate the thyristor triggers, and speed reading from the encoder. On the other hand, the software contains the hydraulic turbine model, PI control and data reading where programming is done in C-Arduino Language.

In addition, a module is incorporated for measuring active, reactive, and apparent power of the synchronous generator through real-time measurements of voltages, currents, and power factor.

Finally, the tests are carried out in the laboratory. The tests to be performed are vacuum, load rejection, load steps, static, load disconnection and dead band.

**KEYWORDS:** Redesign of automatic speed regulator, C-Arduino language, hydraulic turbine model, power measurement module, laboratory tests.

# 1 INTRODUCCIÓN

El Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia (LFSEP) dispone de un generador sincrónico que se encuentra acoplado a un motor DC que opera como máquina motriz permitiendo transformar la energía mecánica en energía eléctrica, también, se tiene los corredores de transmisión a escala de 220kV y 500kV a través de los cuales se transporta la energía eléctrica del sistema de generación hacia las diferentes cargas disponibles en el laboratorio.

En un trabajo de titulación anterior se diseñó, construyó y se puso en funcionamiento un módulo regulador de velocidad (GOV) para el grupo motor DC-generador sincrónico del LFSEP. Este equipo cuenta con dos etapas en su funcionamiento: la etapa de control realiza el ajuste del voltaje de armadura y la etapa de potencia, formada por los rectificadores de armadura y campo del motor DC, que alimentan la máquina motriz. Sin embargo, por el deterioro de los componentes el equipo se encuentra inhabilitado. Por ende, es necesario el rediseño del hardware y software del regulador de velocidad con el fin de obtener un adecuado funcionamiento del LFSEP.

Adicionalmente, para la implementación de los cambiadores de velocidad es necesario un módulo que permita la medición de la potencia activa, aparente y reactiva que entrega el generador, así como, el voltaje y corriente por fase en terminales del generador.

## 1.1 Objetivo general

Rediseñar el software y hardware del regulador automático de velocidad para operación en modo aislado del modelo de turbina hidráulica, 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 hidráulica.
2. Diseñar y construir el hardware del regulador automático de velocidad para turbina hidráulica, 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 hidráulica 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 permite regular la velocidad del motor DC a su valor nominal de 1200 rpm, a través de un controlador tipo PI implementado en la tarjeta microcontroladora STM32F407 utilizando lenguaje C-Arduino. La sintonización del controlador se realiza utilizando el paquete computacional MATLAB. Por otro lado, el conjunto de software y hardware del medidor de potencia permite 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 implementa en el grupo motor-generador y se realizan las pruebas de laboratorio en modo aislado.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Generador sincrónico**

#### **1.4.1.1 Principio de funcionamiento**

El generador sincrónico es una máquina rotativa que transforma la energía mecánica proveniente de la máquina motriz en energía eléctrica a través del principio de inducción electromagnético. El generador consta de la excitatriz que produce la corriente de campo y en consecuencia un flujo magnético en el devanado de campo, que por el giro del rotor de la máquina motriz se produce un campo magnético variable en el tiempo [1].

De acuerdo con la ley de Faraday, al tener un campo magnético variable en el tiempo se obtiene una fuerza electromotriz en el devanado inducido que se encuentra en el estator del generador.

La frecuencia de operación del generador en el Ecuador es de 60 Hz. De acuerdo con la calidad de energía la frecuencia se debe mantener entre  $\pm 2\%$  de su valor nominal.

#### 1.4.1.2 Parámetros del generador sincrónico

**Tabla. 1**

Parámetros del generador sincrónico del LFSEP

Parámetro	Valor	Unidad
Corriente de armadura	22,5	A
Corriente de campo	10,77	A
Factor de potencia	0,87	-
Frecuencia	60	Hz
Potencia aparente	8.573	kVA
Reactancia del eje directo $x_d$	18,32	$\Omega$
Reactancia del eje cuadratura $x_q$	17,51	$\Omega$
Resistencia de armadura	0,205	$\Omega$
Voltaje	254	V

#### 1.4.1.3 Modelo generador-carga

Para analizar la respuesta transitoria en el control P-f es necesario obtener el modelo del generador-carga a través de las siguientes ecuaciones.

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = P_m - P_e \quad (1)$$

Asumiendo que se produce una perturbación en el sistema y aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (1), en modo variacional, se obtiene que:

$$M \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + D \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2)$$

$$\Delta f(s) = \frac{\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)}{Ms + D} \quad (3)$$

Donde:



M: momento de inercia

D: amortiguamiento

$\Delta f$ : variación de frecuencia

$\Delta P_m$ : variación de potencia mecánica

$\Delta P_e$ : variación de potencia eléctrica

## 1.4.2 Motor DC

### 1.4.2.1 Principio de funcionamiento

El motor DC es una máquina electromecánica que produce un torque mecánico a través de la conversión eléctrica-mecánica. Su funcionamiento se basa en la ley de Lorentz de la Ecuación 4, en presencia de un campo magnético producido por el devanado de campo y corriente DC a través del devanado de armadura se produce una fuerza magnética, y en consecuencia el torque electromagnético, produciendo la rotación del rotor de la máquina. Los elementos constitutivos de la máquina se muestran en la Figura 1.

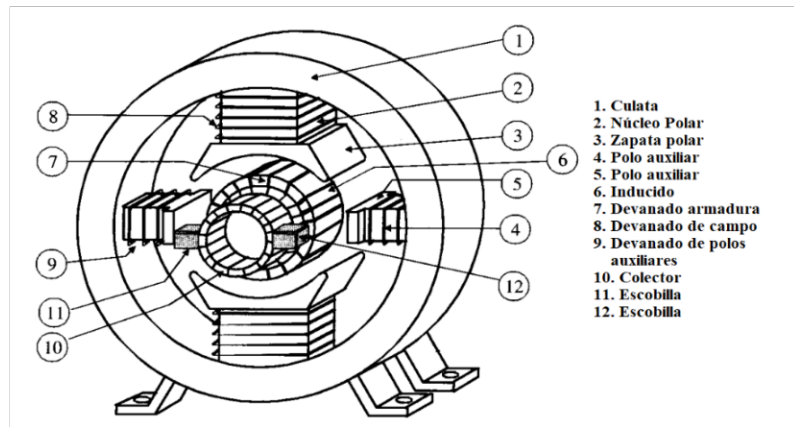


Figura 1. Motor DC: Partes constitutivas [1]

$$\vec{F} = \int I \vec{dl} \times \vec{B} \quad (4)$$

Donde:

$\vec{F}$ : fuerza magnética [N]

I: corriente [A]

$\vec{B}$ : densidad de campo magnético [Wb/m<sup>2</sup>]

El motor DC requiere de corriente continua en su alimentación, en general los sistemas eléctricos se basan en corriente alterna, para lo cual es necesario la implementación de rectificadores tanto en el devanado de campo como el devanado de armadura.

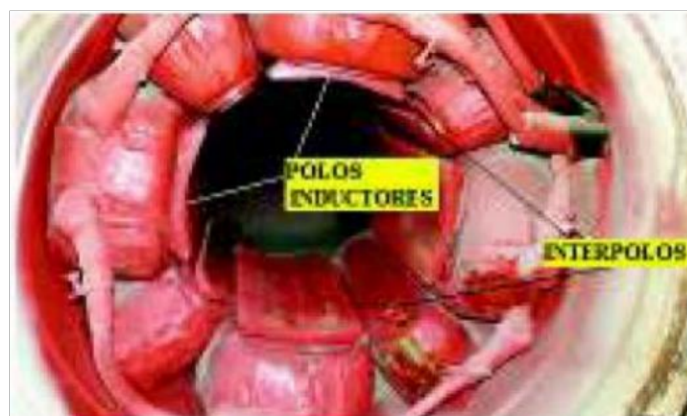
Estos motores son muy utilizados en: maquinaria pesada, máquinas elevadoras ferrocarriles, entre otras. Su uso se debe al alto torque electromagnético y precisa regulación de velocidad [2].

#### 1.4.2.2 Partes constitutivas

##### Estator

Corresponde a la parte fija de la máquina y sirve de soporte para los componentes internos del motor DC. El material de construcción en motores de alta potencia es el acero, que forma un cilindro con pies de apoyo, se muestra en la Figura 1. En el estator se tiene los siguientes componentes:

- **Devanado de campo.** – Se compone de bobinas de cobre, y es el que produce el campo magnético a través de la corriente DC proveniente del rectificador, generalmente no controlado, véase la Figura 2.



**Figura 2.** Motor DC: Devanado de campo [3]

##### Rotor

Esta es la parte móvil del motor DC soportado por el eje que se acopla al generador. Se compone por ranuras de material ferromagnético con baja reluctancia y alta permeabilidad, además, se lamina con el mismo material para reducir las corrientes de Eddy. En el rotor se encuentran los siguientes componentes:

- **Devanado de armadura.** – se encuentra compuesto por bobinas de cobre, en donde se induce el flujo magnético. La conexión puede ser: imbricado y ondulado.

- **Eje del rotor.** – estructura de soporte para los bobinados del devanado inducido. Mantiene el giro con los bobinados y el conmutador.

### Conmutador

Se utiliza para conectar las bobinas del devanado inducido con el circuito externo a través de escobillas de grafito o carbón, permite la conversión del torque AC producido en un torque unidireccional. Se encuentra formado por delgas que se encuentran aisladas mediante papel o plástico aislante. Se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Motor DC: Devanado de campo [3]

### Interpolos

Son polos auxiliares que se conectan con el devanado de armadura en serie con la finalidad de mejorar la conmutación. Generalmente, la sección de las bobinas auxiliares es menor que los otros devanados.

#### 1.4.2.3 Parámetros del motor DC

**Tabla. 2**

Especificaciones nominales motor DC

Parámetro	Valor	Unidad
Corriente de armadura	1,07	A
Corriente de campo	5,15	A
Potencia	10	Hp
Resistencia de campo Rf	18,32	$\Omega$
Resistencia serie Rs	0,112	$\Omega$
Velocidad	1200	rpm
Voltaje de armadura	130	V
Voltaje de campo	186	V

### 1.4.3 Regulador automático de velocidad

#### 1.4.3.1 Principio de funcionamiento

El regulador automático de velocidad (GOV) controla la velocidad de la máquina motriz manteniendo en un valor de referencia. El GOV aumenta o disminuye la potencia mecánica de acuerdo con el cambio de frecuencia en el sistema, producido por la pérdida o aumento de carga [4].

Generalmente, la señal de salida del sensor de velocidad se envía hacia un mecanismo de control que puede ser: válvulas en centrales a gas y compuerta en centrales hidráulicas; la señal ordena la apertura o cierre del mecanismo hasta lograr que el error de frecuencia sea cero en el modo isócrono.

El GOV matemáticamente se puede representar como un PID tal como se muestra en la Figura 4.

En los Sistemas Eléctricos de Potencia se tiene varios tipos de reguladores de velocidad de acuerdo con la función, entre ellos: isócrono, con realimentación y modo paralelo.

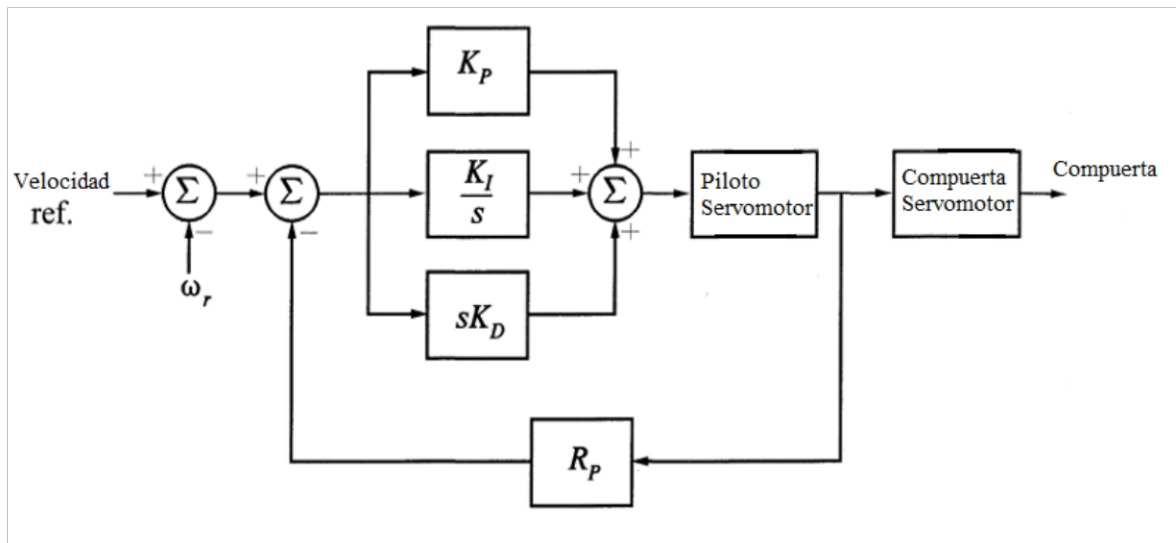
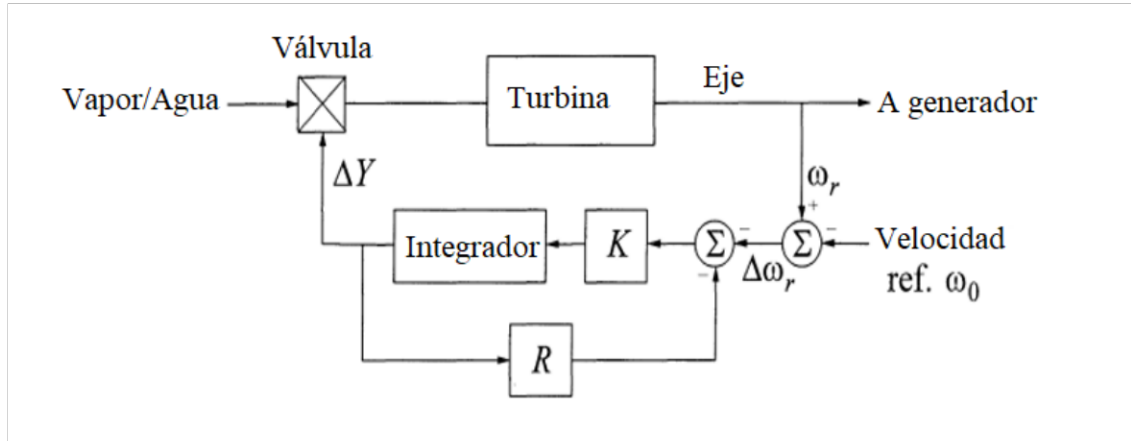


Figura 4. GOV: PID [4]

#### 1.4.3.2 GOV con realimentación

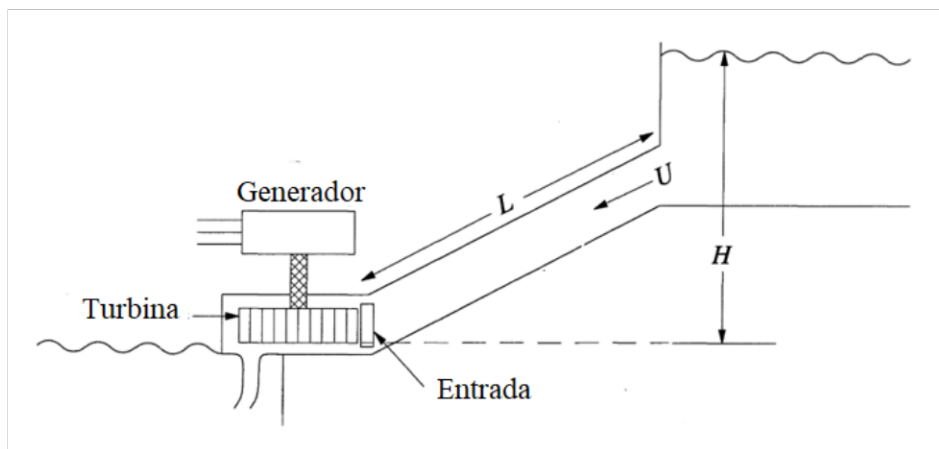
El GOV con realimentación consiste en un PID con lazo de realimentación que permite considerar la característica de regulación conocida como estatismo (R), véase la Figura 5. En este caso la variable de referencia es la velocidad de la máquina motriz.



**Figura 5.** Regulador de velocidad con realimentación [4]

### 1.4.3.3 Modelo de turbina hidráulica

El modelo de turbina hidráulica representa el comportamiento físico de la turbina real, para llegar a dicho modelo se realiza ciertas consideraciones como: resistencia hidráulica despreciable, la tubería forzada no se expande, la velocidad del agua es proporcional a la apertura de la compuerta y la potencia es igual al producto de la altura y volumen del caudal. Los componentes de una central hidráulica se muestran en la Figura 6.



**Figura 6.** Central Hidráulica [4]

El modelo se puede obtener considerando la velocidad del agua, potencia mecánica de la turbina y aceleración de la columna de agua, se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (5)$$

$$P_m = K_p H U \quad (6)$$

$$T_w = \frac{LU_0}{a_g H_0} \quad (7)$$

Considerando que se presenta una perturbación en el sistema se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\Delta U = 0,5\Delta H + \Delta G \quad (8)$$

$$\Delta P_m = 1,5\Delta H + \Delta G \quad (9)$$

$$T_w \frac{d\Delta U}{dT} = -\Delta H \quad (10)$$

Relacionando las Ecuaciones (5) a (7) se obtiene el modelo ideal de una turbina hidráulica, cuya función de transferencia se muestra en la Ecuación 11.

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0,5T_w s} \quad (11)$$

Donde:

U: Velocidad del agua

G: Posición de compuerta

H: Salto bruto

L: Longitud conducto

$a_g$ : aceleración de la gravedad

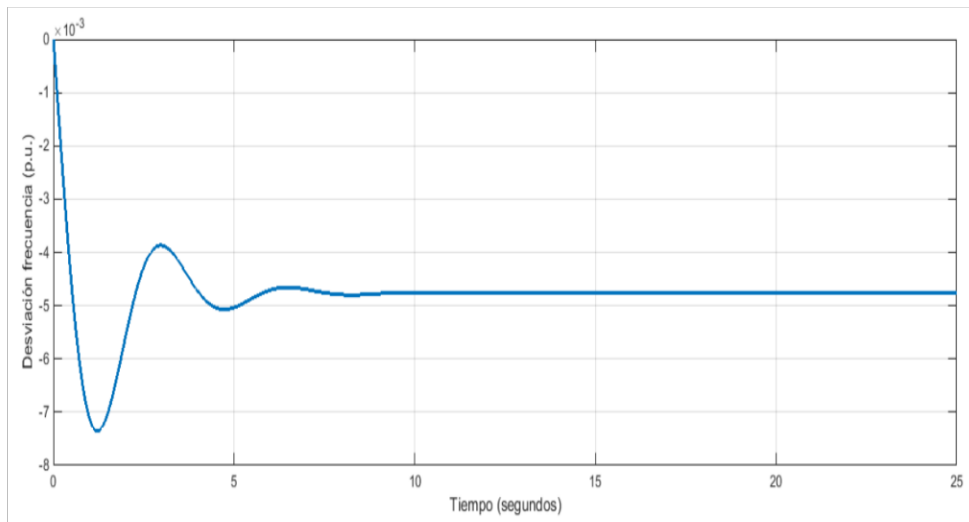
$T_w$ : constante del agua

#### **1.4.3.4 Control primario de frecuencia**

El sistema eléctrico de potencia se encuentra sujeto a cambios repentinos de la demanda o salida de componentes provocando variaciones en la frecuencia y voltaje, los cuales pueden cubrirse a través de las variaciones de generación, ajustes de potencia dada por el sistema interconectado o seccionamientos de carga.

En el sistema de potencia, la primera respuesta ante una perturbación que provoca déficit es la energía electromagnética entregada por los generadores, esta respuesta finaliza con la regulación primaria de frecuencia.

Debido a la perturbación, la velocidad de los generadores disminuye provocando la caída de frecuencia, esto activa la regulación primaria realizada por el regulador de velocidad que aumenta la potencia generada a través de la apertura de las válvulas. En la regulación primaria, el sistema alcanza un nuevo estado estacionario, véase la Figura 7.



**Figura 7.** Regulación primaria de frecuencia [5]

#### 1.4.4 Medidor de voltaje

##### 1.4.4.1 Principio de funcionamiento

El voltímetro es un equipo que permite medir el diferencial de potencial que se tiene entre dos puntos. Mediante los microcontroladores la medición de voltaje ya no requiere de circuitos electromagnéticos. Actualmente, con un microcontrolador se puede tomar muestras de voltaje de 0 V a 3/5 V, que son proporcionales al voltaje real medido, internamente se procesan y calcula el valor RMS del voltaje a través de las muestras tomadas. La cantidad de muestras que se toma depende de la rapidez de procesamiento del microprocesador a utilizar [6].

La desventaja de los microcontroladores es que solo pueden tomar muestras de voltaje positivas, por lo cual, para medir voltajes en alterna es necesario desplazar la onda sinusoidal tal como se muestra en la Figura 8, adicionalmente, se utiliza un transformador reductor para obtener voltajes entre 0 V y 3/5 V. El valor eficaz de voltaje a partir del microcontrolador se obtiene con la Ecuación 12.



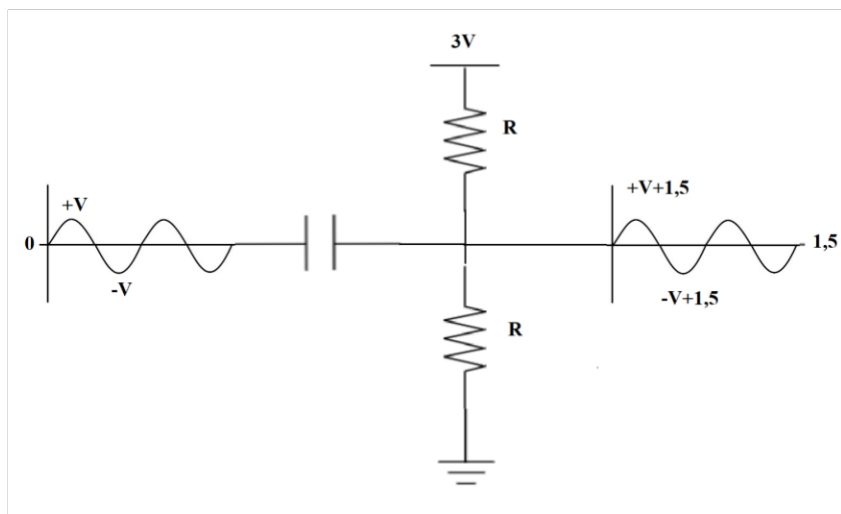
$$V_{RMS}^2 = \sum_{i=1}^N V_{MRMS}^2 \quad (12)$$

Donde:

$V_{RMS}$ : valor de corriente eficaz

$V_{MRMS}$ : valor de corriente eficaz muestreada

N: número de muestras



**Figura 8.** Salida de voltaje hacia el microcontrolador

## 1.4.5 Medidor de corriente

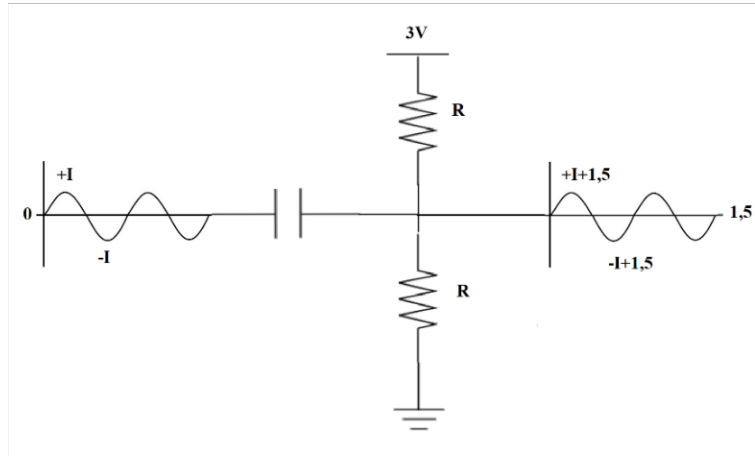
### 1.4.5.1 Principio de funcionamiento

El medidor de corriente consiste en un transformador toroidal con N número de espiras en el secundario, este transformador no tiene pérdidas de dispersión en el primario provocando que la corriente del secundario refleje de forma adecuada la corriente del primario que se desea medir.

Similar al medidor de voltaje, la señal de corriente debe ser procesada para obtener la corriente RMS a través del microcontrolador. Para medir la corriente alterna es necesario desplazar la onda sinusoidal tal como se muestra en la Figura 9.

El valor RMS en el microcontrolador se obtiene a partir de la Ecuación 13, mientras mayor sea el número de muestras tomadas más exacto es el valor medido [7].





**Figura 9.** Salida de corriente hacia el microcontrolador

$$I_{RMS}^2 = \sum_{i=1}^N I_{MRMS}^2 \quad (13)$$

Donde:

$I_{RMS}$ : valor de corriente eficaz

$I_{MRMS}$ : valor de corriente eficaz muestreada

N: número de muestras

## 1.4.6 Medidor de factor de potencia

### 1.4.6.1 Principio de funcionamiento

La medición del factor de potencia se basa en determinar la diferencia de ángulo existente entre el voltaje y la corriente considerando como referencia el voltaje. Para determinar el ángulo se realiza la detección de cruces por cero del voltaje y corriente tomando los flancos de subida de subida.

Con los cruces de cero obtenidos se determina la diferencia entre el flanco de subida de voltaje y el flanco de subida de la corriente obteniendo el ancho de pulso, el pulso se encuentra en tiempo y a partir de la Ecuación 14 se transforma a grados. Una vez determinado el ángulo, el factor de potencia se calcula con la Ecuación 15.

$$\phi_{vi} = T_{pulsos}[\text{ms}] * \frac{2\pi}{16,66\text{ms}} * \frac{360^\circ}{2\pi} \quad (14)$$

Donde:

$T_{\text{pulso}}$ : ancho de pulso de la diferencia entre voltaje y corriente

$\phi_{vi}$ : desfase entre voltaje y corriente

$$fp = \cos(\phi_{vi}) \quad (15)$$

Donde:

fp: factor de potencia

### 1.4.7 Control de velocidad motor DC

El sistema de control de velocidad del motor DC consta de un rectificador controlado que permite variar el voltaje de la armadura a través del ángulo de disparo de los tiristores. Además, es necesario que el voltaje de campo permanezca constante a través de un rectificador no controlado que consiste en un puente de diodos. Esta composición permite regular la velocidad del motor DC a 1200 rpm.

#### 1.4.7.1 Rectificador controlado de 6 pulsos

El uso del rectificador controlado AC/DC permite un control óptimo de la velocidad del motor DC, donde el voltaje de armadura se varía a través del ángulo de disparo de los tiristores.

Este control es muy utilizado debido a que las pérdidas en la armadura son mínimas, y el cambio de velocidad es proporcional al cambio de voltaje en terminales de la armadura. El esquema se muestra en la Figura 10.

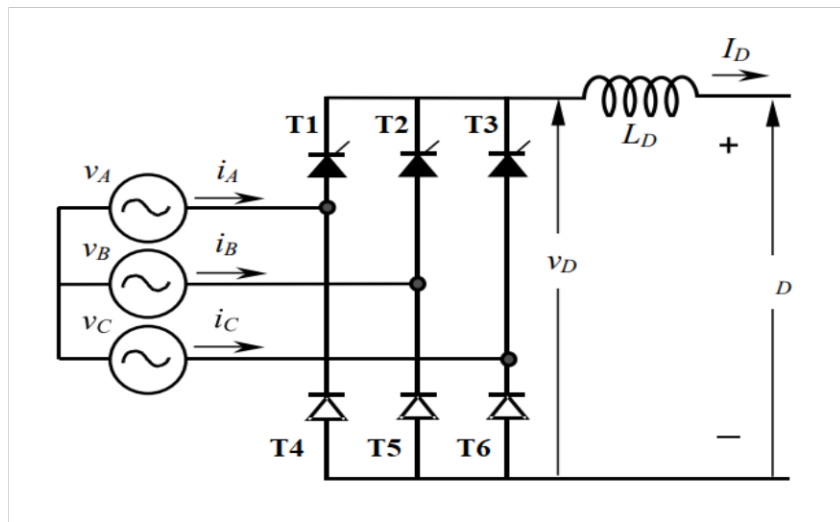
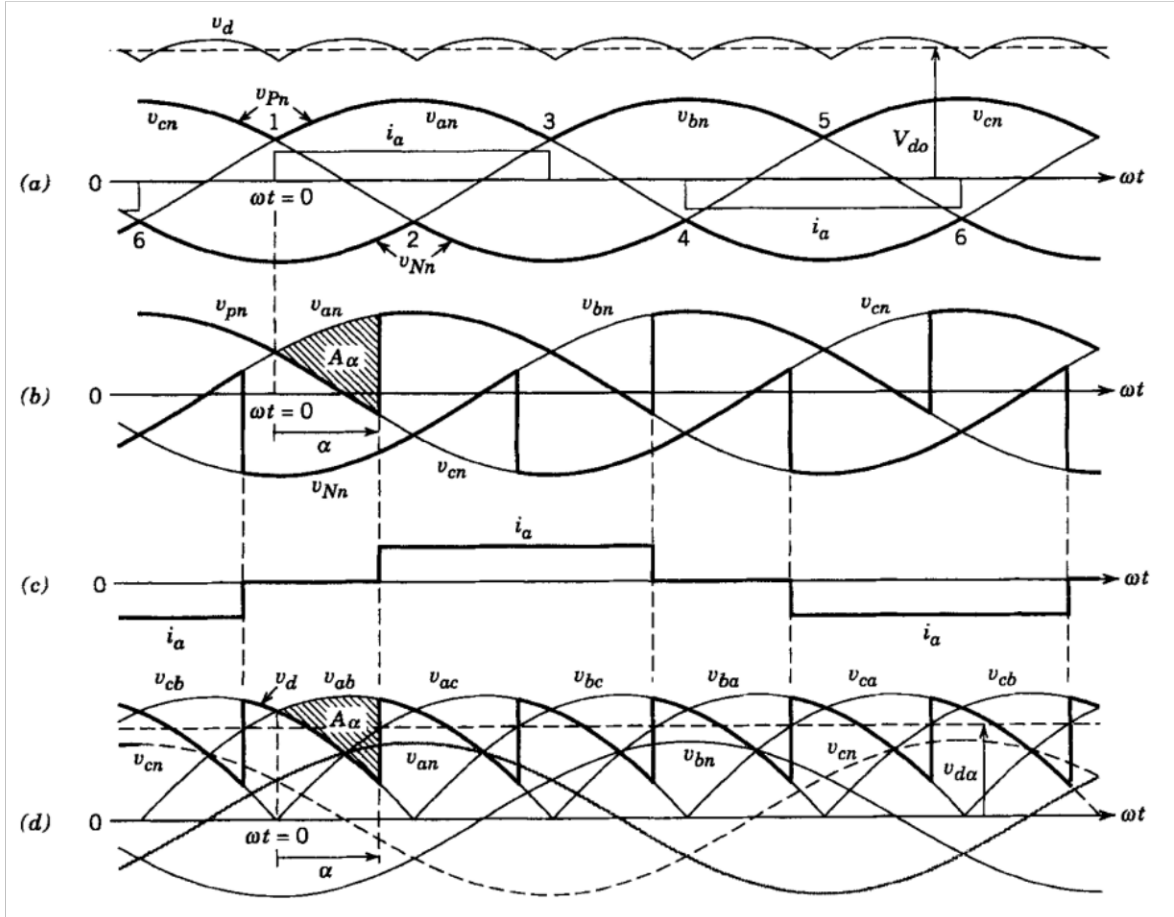


Figura 10. Rectificador controlado de 6 pulsos [8]

El disparo de los tiristores se realiza a través del PWM trifásico, de las fases AB se obtiene el disparo en el ciclo positivo A+ y en el ciclo negativo A- para los tiristores T1 y T5. Por

otro lado, los disparos en el ciclo positivo B+ y el ciclo negativo B- de los tiristores T2 y T6 se obtiene mediante las fases BC. Finalmente, los disparos de los tiristores T3 y T4 se obtiene de las fases CA [9]. El voltaje DC en terminales de la armadura del motor DC se puede obtener a través de la Ecuación 17 considerando las formas de onda de la Figura 11.



**Figura 11.** Formas de onda rectificador de 6 pulsos [9].

$$V_{dc} = \frac{6}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} \sqrt{2} \sqrt{3} V_s \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{3} \right) d\omega t \quad (16)$$

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} V_{max} \cos(\alpha) \quad (17)$$

Donde:

$V_{dc}$ : voltaje de salida DC

$V_{max}$ : voltaje fase-neutro lado AC

$\alpha$ : ángulo de disparo

### 1.4.7.2 Rectificador no controlado

Para producir un campo electromagnético en el motor DC es necesario la alimentación constante en corriente DC que se produce a través de un rectificador no controlado formado por un puente de diodos, el esquema se muestra en la Figura 12.

Este tipo de control se utiliza en máquinas DC donde la conexión del devanado de campo es tipo excitación separada o derivación.

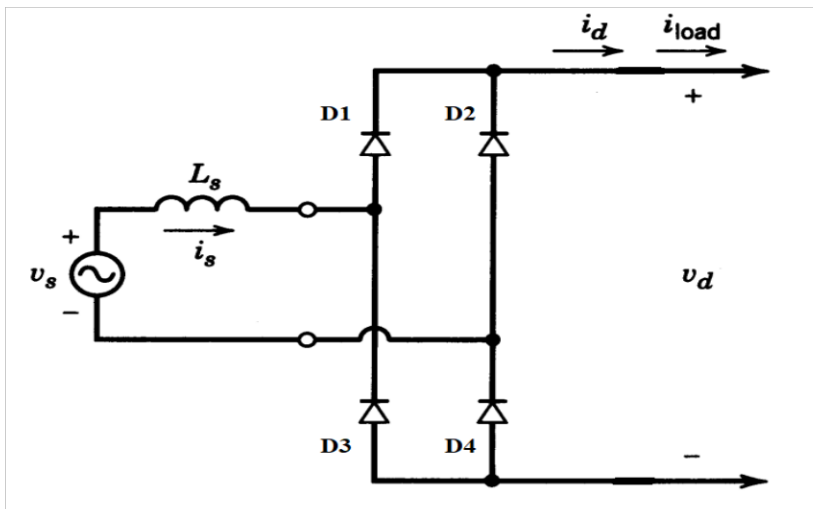


Figura 12. Control de voltaje de campo [9].

La rectificación del voltaje  $V_s$  se realiza a través de la polarización de los diodos D1 y D4 en el ciclo positivo, mientras que, en el ciclo negativo los diodos que se polarizan son D2 y D3 [9]. El voltaje de salida se obtiene a partir de la Ecuación 19 partiendo de las formas de onda de la Figura 13.

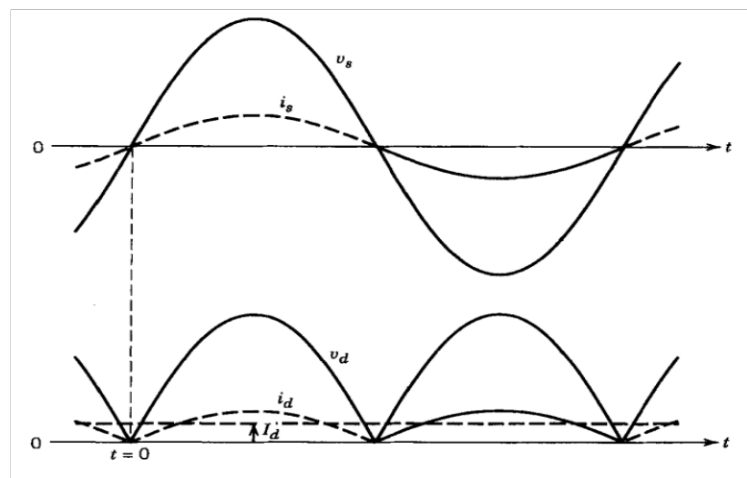


Figura 13. Formas de onda rectificador no controlado [9]

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} 2 \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d\omega t \quad (18)$$

$$V_{dc} = \frac{2}{\pi} V_{max} \quad (19)$$

### 1.4.8 Microcontroladores

Los microcontroladores son circuitos integrados estructurados por un procesador, memoria, entradas y salidas que permiten el control de un sistema sin el requerimiento de un sistema operativo [10].

Mediante las entradas del microcontrolador se pueden tomar datos temporales mediante el procesador que a través de la memoria de programa procesa la información y ejecuta la acción requerida, posteriormente, los datos resultantes se transfieren a través de las salidas para el control del sistema requerido [10].

#### 1.4.8.1 STM32

Se trata de un microcontrolador formado por circuitos integrados de 32 bits con un procesador RISC Arm que realiza operaciones complicadas a través de instrucciones simples permitiendo que las instrucciones a ejecutar se realicen en paralelo logrando reducir el acceso a la memoria [11].

Estos controladores se utilizan en el control de motores, sistemas industriales, instrumentos médicos, entre otros; debido al costo y sensibilidad que posee la tarjeta.

#### 1.4.8.2 Arduino UNO

Es un microcontrolador establecido por ATmega328P, posee 14 entradas y salidas digitales, así como, 6 entradas analógicas y conexión USB, es compatible con otras gamas de Arduino como: Boards, Shields y Pi boards [12].

El lenguaje de programación que utiliza es de código abierto por lo cual es un microcontrolador de bajo costo, flexible y fácil para la realización de proyectos.

Es muy utilizado en el control de relés, LEDs, servomotores y motores, debido a la flexibilidad y rapidez de respuesta del procesador.

## **2 METODOLOGÍA**

### **2.1 Rediseño regulador automático de velocidad**

#### **2.1.1 Estudio de condiciones operativas del regulador automático de velocidad GOV**

Para el rediseño del regulador automático de velocidad disponible en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctrico de Potencia en primera instancia se realiza un estudio del estado del equipo, en el cual se concluye lo siguiente:

##### **2.1.1.1 Hardware**

- El encoder, que permite registrar los datos de la velocidad de la máquina motriz (motor DC) se encuentra dañado, además, es de 100 PPR lo cual hace que los datos de velocidad muestreados no sean rápidos.
- Los pines de la tarjeta STM32F407 que sirve para el control PI y procesamientos de datos, están averiados.
- La tarjeta de potencia y control para generar los pulsos de disparos a las compuertas de los tiristores de las tres fases se encuentra averiada.
- 2 de los 3 tiristores de potencia se encuentran inhabilitados.
- Los relés, sensores de voltaje y corriente del motor DC se encuentran en buen estado, por lo que son reutilizados.

##### **2.1.1.2 Software**

- Las señales de entrada hacia la tarjeta STM32F407 como: datos de encoder, señales de voltaje y corriente; se encuentran en pines inapropiados.
- Señales de salida de la tarjeta STM32F407 como el DAC, que permite variar el ángulo de disparo hacia los tiristores están inhabilitadas.
- La programación de la tarjeta STM32F407 realizada en Matlab provoca que el programa sea robusto y lento, además, requiere de la biblioteca Waijung de Matlab versión 2014.
- El modelo de turbina hidráulica no considera los retardos de la apertura de la compuerta, la dinámica del motor DC y la disponibilidad del recurso, es decir, no simula la operación de una central hidráulica.

- Las variables eléctricas del generador sincrónico y motor DC no se muestran en la pantalla NEXTION.

### **2.1.2 Hardware: rediseño tarjeta de potencia y control**

La tarjeta de potencia y control está constituida por la etapa de control y la etapa de potencia para generar los disparos de los tiristores.

En la etapa de control se tienen 6 circuitos para detectar los cruces por cero que determinan el rango en el que se puede variar el ángulo de disparo de los tiristores. Las entradas del circuito de control son los voltajes R, S y T que a través de los optoacopladores se obtienen las señales cuadradas en la etapa de potencia.

Con las señales cuadradas en la etapa de potencia, se implementa un integrador con la finalidad de realizar el control de acuerdo con la velocidad del motor DC y el control PI implementado en la tarjeta STM32F407. A la salida del integrador se obtiene la señal diente de sierra que es una de las entradas del comparador, la otra señal que entra al comparador es el DAC, véase la Figura 14.

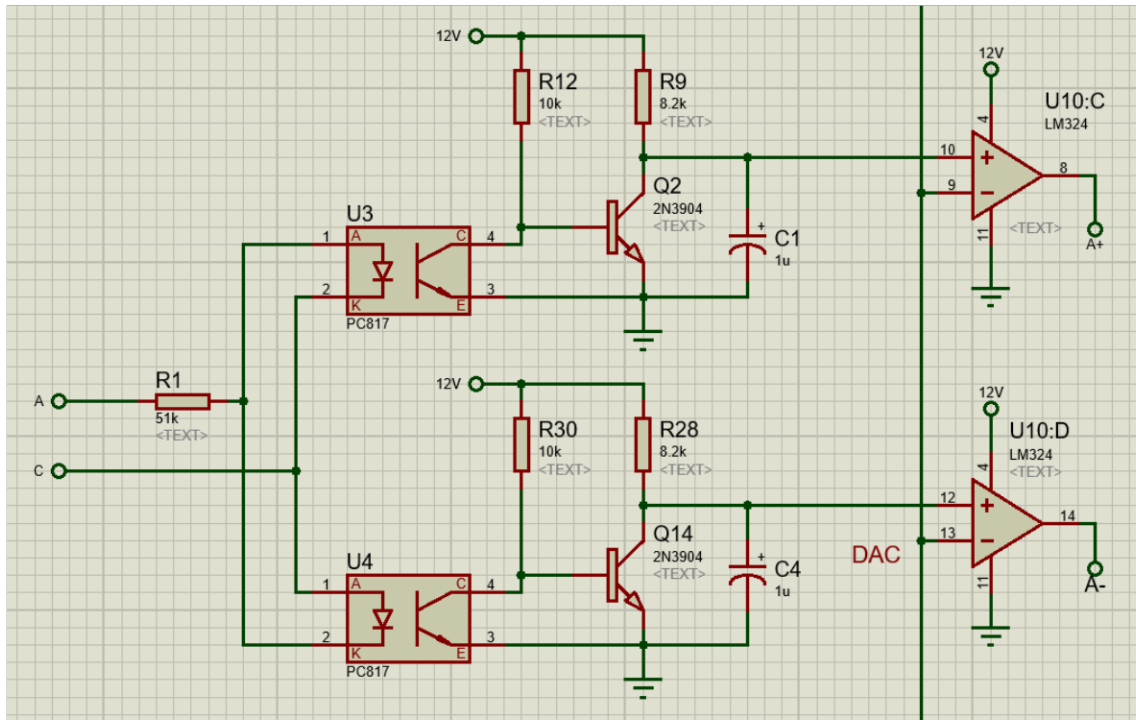
El DAC es una señal de salida de voltaje proveniente de la tarjeta que varía entre 3V (velocidad 0 rpm) y 0V (1399 rpm). Esta señal se obtiene a través del error de velocidad considerando un control PI, es decir:

- Si la velocidad se encuentra en 0 rpm, el voltaje del DAC empieza a disminuir y entra al comparador con la señal diente de sierra provocando la disminución del ángulo de disparo, en consecuencia, el voltaje en la armadura y la velocidad del motor DC aumenta.
- Si la velocidad es 1300 rpm, el voltaje del DAC aumenta por lo cual en el comparador aumenta el ángulo de disparo y la velocidad del motor DC disminuye hasta alcanzar la velocidad de referencia de 1200 rpm.
- Si la velocidad es 1200 rpm, el voltaje del DAC permanece en un valor aproximadamente constante y mantiene el ángulo de disparo provocando que el motor rote a una misma velocidad.

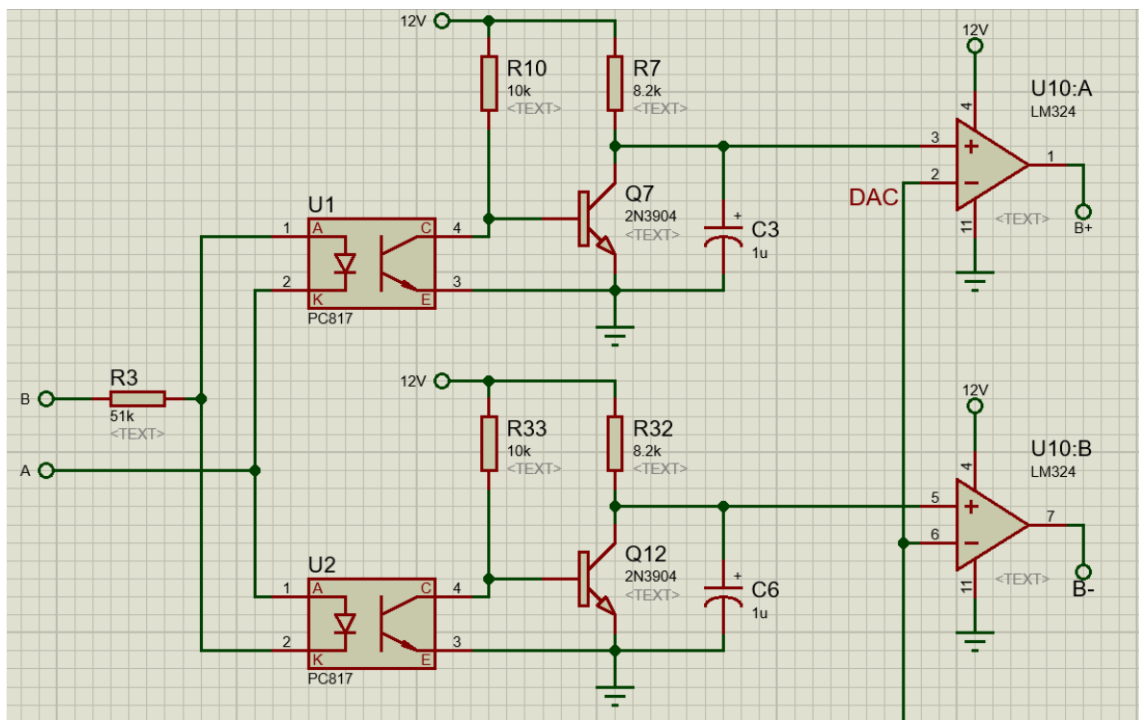
A la salida de los comparadores se tiene las señales de disparo para los tiristores. Para el disparo de los tiristores T1 y T4 se toma las fases A y C tal como se muestra en el esquema de la Figura 14 diseñado en Proteus 8.12.

De forma similar, se tiene el esquema para el disparo de los tiristores T2 y T5, pero con las fases A y B, véase el esquema de la Figura 15.

Finalmente, para los tiristores T3 y T4 se toma los voltajes de las fases B y C tal como se muestra en la Figura 16.

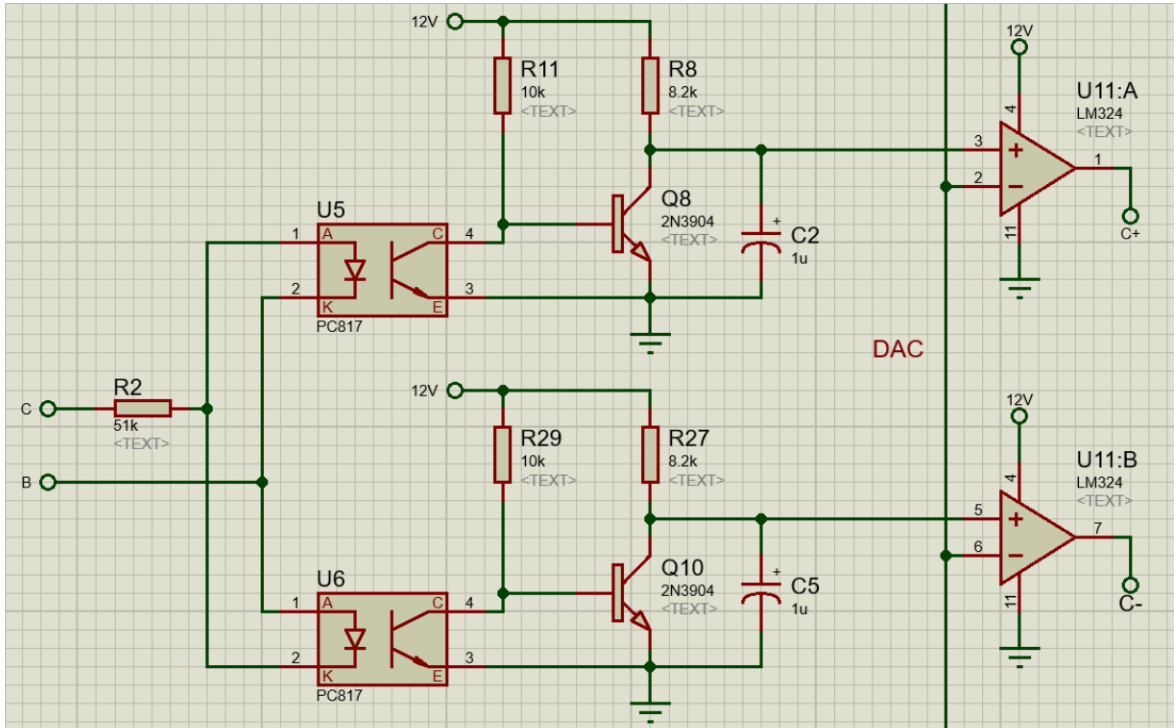


**Figura 14.** Circuito de disparo A+ y A- a partir del voltaje AC.



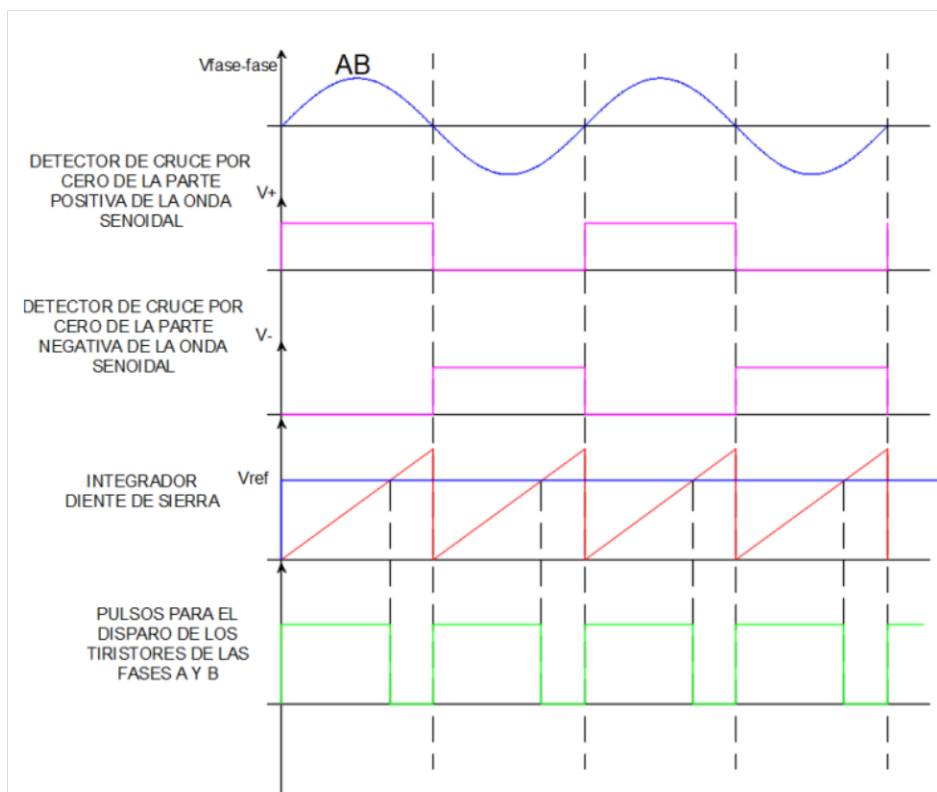
**Figura 15.** Circuito de disparo B+ y B- a partir del voltaje AB.





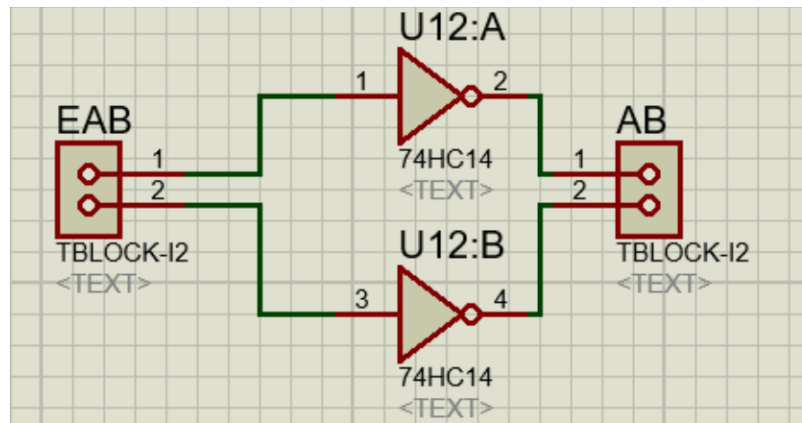
**Figura 16.** Circuito de disparo C+ y C- a partir del voltaje BC.

Los pulsos para disparo a partir del ciclo positivo y negativo de los tiristores se muestran en la Figura 17.



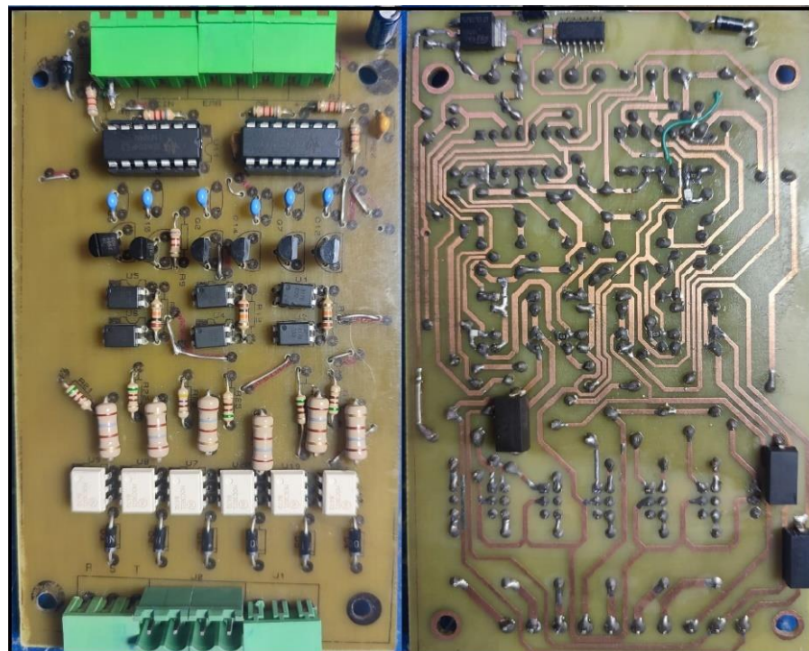
**Figura 17.** Ondas para disparo de tiristores.

Adicionalmente, se incorpora el circuito integrado en la misma placa para la lectura de datos de velocidad proveniente del encoder, con la finalidad de optimizar el proceso y evitar interferencias en la transmisión de datos. El circuito integrado también funciona como filtro, evita pasar falsos datos de velocidad debido a la fricción provocada entre el encoder y el rotor de la máquina, logrando que el control de velocidad sea adecuado y rápido. El circuito implementado se muestra en la Figura 18.



**Figura 18.** Filtro datos de velocidad.

Finalmente, en la Figura 19 se muestra la placa de potencia y control con sus respectivos componentes.



**Figura 19.** Placa de potencia y control.

### 2.1.2.1 Rectificador controlado AC/DC

El esquema de conexión del módulo SCR a utilizar se muestra en la Figura 20, consta de dos tiristores en serie.



Figura 20. Esquema de conexión módulo SCR.

El rectificador de 6 pulsos se implementa en Proteus, Figura 21, con la finalidad de comprobar el funcionamiento de la placa de control y potencia.

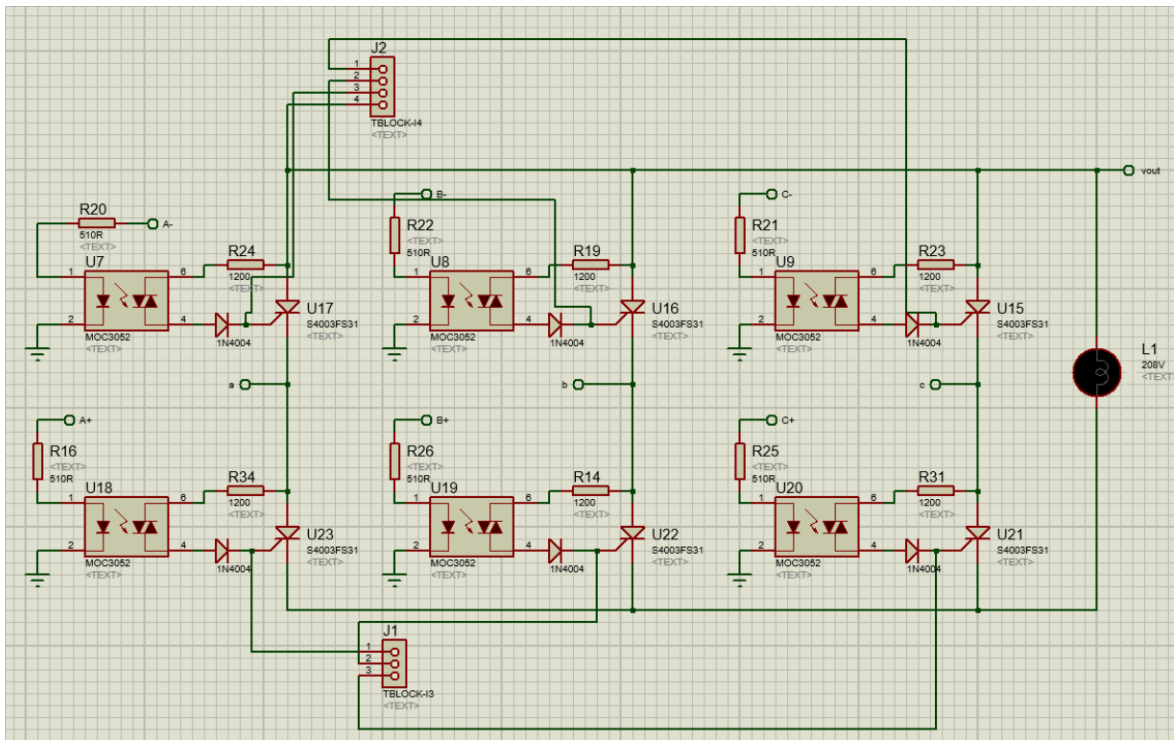


Figura 21. Rectificador de 6 pulsos implementado en Proteus.

Los 2 tiristores inhabilitados se cambian por nuevos tiristores con las especificaciones dadas en la Tabla 3.

**Tabla. 3**  
Especificaciones SCRS

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Módulo	Serie SCRs	0
Corriente máxima de disparo	150	mA
Corriente directa $I_t$	106	A
Corriente transitoria pico	2,25	kA
Corriente máxima de retención	250	mA
Temperatura de operación	130	°C
Voltaje de disparo	3	V

### 2.1.2.2 Rectificador no controlado AC/DC

Para el funcionamiento del motor DC es necesario la alimentación del campo con corriente continua, por lo cual se requiere de un rectificador no controlado formado por un puente de diodos, véase la Figura 21.

Para el dimensionamiento de los diodos se considera la corriente y voltaje nominales de la máquina motriz que son 1,5 A y 190 V, respectivamente. Las especificaciones del puente rectificador se muestran en la Tabla 4.

**Tabla. 4**  
Especificaciones puente de diodos

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Tipo	Monofásico	-
Encapsulado	KBPC	-
Corriente directa $I_f$	50	A
Voltaje pico inverso $V_{rrm}$	1000	V
Voltaje máximo de entrada $V_{rms}$	700	V
Voltaje de bloqueo máximo $V_{dc}$	1000	V
Corriente máxima de sobrevoltaje $I_{fsm}$	400	A
Temperatura de operación	-65 a 150	°C



**Figura 21.** Puente de diodos monofásico.

### 2.1.3 Encoder

#### 2.1.3.1 Encoder de 1000 PPR

El encoder utilizado en el proyecto anterior es de 100 PPR, es decir, la resolución o el número de pulsos que toma en una vuelta son 100, sin embargo, el número de pulsos altos no son suficientes para lograr el control fino de velocidad de la máquina motriz. Por lo cual, se propone el uso de un encoder de 1000 PPR, véase la Figura 22.

Para medir la velocidad el encoder se encuentra acoplado al eje del motor DC a través de un acople de 6 mm a 8 mm, que por medio de los canales A y B envía pulsos hacia la tarjeta STM32F407 para el procesamiento y ejecución del control de velocidad. Las especificaciones del encoder de 1000 PPR se muestran en la Tabla 5.

Adicionalmente, el encoder cuenta con un cargador de 12 V conectado al regulador automático de velocidad.



**Figura 22.** Encoder de 1000 PPR

**Tabla. 5**

Especificaciones Encoder 1000 PPR

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Canales	A, B	A
Diámetro del eje	6	mm
Frecuencia de respuesta	100	kHz
Marca	CALT	-
Máxima Velocidad	3000	rpm
Modelo	ES3806G	-
Voltaje de alimentación	8-24	V
Voltaje de salida	5	V

La información que el encoder envía hacia la tarjeta se encuentra en pulsos, los cuales se deben transformar a rpm para comparar con la referencia de 1200 del control PI. La transformación se realiza de la siguiente manera.

$$f = \#pulsos * \frac{20}{2} \quad (20)$$

$$RPM = f * \frac{60}{1000} \quad (21)$$

Donde:

f: frecuencia

RPM: revoluciones por minuto

#pulsos: número de pulsos

#### **2.1.4 Software: rediseño programación en Lenguaje C-Arduino**

Con la finalidad de poner el regulador automático de velocidad a disposición de los estudiantes, la programación se realiza en Lenguaje C-Arduino, que es un software libre y muy utilizado actualmente. Además, el lenguaje C no requiere de paquetes adicionales como en el caso de Matlab que requiere la biblioteca Waijung. La programación se carga en la tarjeta SMT32F407 a través del puerto USB, véase la Figura 23.



**Figura 23.** Tarjeta SMT32F407.

#### 2.1.4.1 Control PI

El regulador automático de velocidad se basa en un control PID que consta de las partes: proporcional, integral y derivativo. Para emular el comportamiento de una central hidráulica se considera un control PI que se sintoniza a través de Matlab/Simulink.

El PID en el dominio de Laplace está dado por la Ecuación 22, que se debe transformar al dominio discreto de frecuencia y posteriormente a tiempo para implementar el control en Lenguaje C-Arduino.

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_p s + K_i}{s} + K_d s \quad (22)$$

Donde:

$K_p$ : proporcional

$K_i$ : integral

$K_d$ : derivativo

Partiendo del PID en el dominio de Laplace y aplicando la transformada Z se obtiene el PID en forma discreta, Ecuaciones 23 a 29.



$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (23)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_p \left( \frac{1 - z^{-1}}{T} \right) + K_i + K_d \left( \frac{1 - z^{-1}}{T} \right)^2}{\left( \frac{1 - z^{-1}}{T} \right)} \quad (24)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{\frac{K_p(1 - z^{-1}) + K_i T}{T} + K_d \frac{(1 - z^{-1})^2}{T^2}}{\left( \frac{1 - z^{-1}}{T} \right)} \quad (25)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_p(1 - z^{-1}) + K_i T + \frac{K_d}{T}(1 - 2z^{-1} + z^{-2})}{(1 - z^{-1})} \quad (26)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{\left( K_p + K_i T + \frac{K_d}{T} \right) + z^{-1} \left( -\frac{2K_d}{T} - K_p \right) + z^{-2} \left( \frac{K_d}{T} \right)}{(1 - z^{-1})} \quad (27)$$

Finalmente, aplicando la transformada Z inversa se obtiene el control PI en el dominio del tiempo.

$$Z^{-1} \left\{ U(z)(1 - z^{-1}) = E(z) \left[ \frac{\left( K_p + K_i T + \frac{K_d}{T} \right) + z^{-1} \left( -\frac{2K_d}{T} - K_p \right) + z^{-2} \left( \frac{K_d}{T} \right)}{(1 - z^{-1})} \right] \right\} \quad (28)$$

$$u[k] - u[k - 1] = e[k] \left( K_p + K_i T + \frac{K_d}{T} \right) + e[k - 1] \left( -\frac{2K_d}{T} - K_p \right) + e[k - 2] \left( \frac{K_d}{T} \right) \quad (29)$$

En el control PI el parámetro  $K_d$  que representa la parte derivativa es cero. Por otra parte, las variables  $e[k]$ ,  $e[k - 1]$  y  $e[k - 2]$  son los errores que existen entre el valor medido por medio del encoder y la velocidad de referencia, además, se almacenan los errores anteriores con la finalidad de obtener un error menor en la siguiente iteración y llegar a la referencia de velocidad en un tiempo menor.



### 2.1.4.2 Modelo dinámico motor DC

La sintonización del control PI permite emular la respuesta de una central hidráulica considerando la disponibilidad del recurso y el tiempo que tarda en llegar a la entrada de la turbina. Para la correcta sintonización es necesario considerar el comportamiento dinámico de la máquina motriz que corresponde al motor DC, turbina hidráulica y válvula.

El modelo del motor DC se muestra en la Figura 24, con el cual se obtienen las funciones de transferencia que permitan simular el comportamiento dinámico de la máquina de corriente continua.

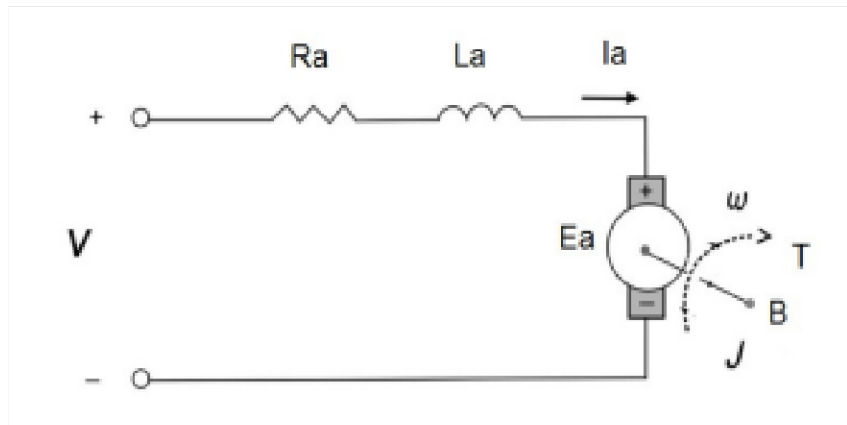


Figura 24. Modelo motor DC [13].

En presencia de flujo magnético producido por el devanado de campo se obtiene una fuerza electromotriz en el devanado de armadura, dada por la Ecuación 30.

$$v(t) = R * i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + E_a(t) \quad (30)$$

Para considerar la parte mecánica del motor en la cual se presenta pérdidas por fricción en el rotor, que disminuyen la potencia desarrollada se tiene la Ecuación 31.

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_m(t) - B\omega(t) \quad (31)$$

La Ecuación 30 y Ecuación 31 se relacionan a través de la Ecuación 32, en la que se asume que el voltaje de armadura es proporcional a la velocidad angular del motor DC.

$$T_m(t) = K_m * i(t) \quad (32)$$

Para conocer la respuesta dinámica se utiliza la transformación de Laplace obteniendo las Ecuaciones 33 a 35.

$$L s i(s) = v(s) - R * i(s) - E_a(s) \quad (33)$$

$$J s w(s) = T_m(s) - Bw(s) \quad (34)$$

$$E_a(s) = K_a w(s) \quad (35)$$

Se pueden obtener varias funciones de transferencia considerando que la entrada es el voltaje de alimentación en la armadura, y las salidas pueden ser: corriente, posición angular, torque mecánico, voltaje inducido y velocidad angular. Las funciones de transferencia que relacionan la entrada con las salidas se muestran en las Ecuaciones 36 a 39.

$$\frac{T_m(s)}{V(s)} = \frac{K_m J s + K_m B}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B) s + R_a B + K_m K_a} \quad (36)$$

$$\frac{E_a(s)}{V(s)} = \frac{K_a K_m}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B) s + R_a B + K_m K_a} \quad (37)$$

$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{J s + B}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B) s + R_a B + K_m K_a} \quad (38)$$

$$\frac{w(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a B) s + R_a B + K_m K_a} \quad (39)$$

Donde:

$K_m$ : constante de torque

$L_a$ : inductancia de armadura

$R_a$ : resistencia de armadura

$J$ : momento de inercia

$B$ : constante de fricción

$K_a$ : constante electromotriz

### 2.1.4.3 Parámetros motor DC

La impedancia de la armadura del motor DC se puede determinar mediante las Ecuaciones 40 a 42, utilizando los parámetros de las resistencias e impedancias del devanado de armadura e interpolos que se muestran en la Tabla 6.

**Tabla. 6**  
Parámetros eléctricos motor DC

Especificaciones	Valor	Unidad
Resistencia devanado de campo Rf	163,7	$\Omega$
Resistencia devanado serie Rs	0,112	$\Omega$
Resistencia armadura e interpolos Rab	0,519	$\Omega$
Impedancia devanada de campo Rf	2630,5 $\angle$ 55,18	$\Omega$
Impedancia devanado serie Rs	0,4966 $\angle$ 51,48	$\Omega$
Impedancia armadura e interpolos Rab	2,966 $\angle$ 73,87	$\Omega$
Inductancia devanada de campo Rf	0,0055	mH
Inductancia devanado serie Rs	1,0308	mH
Inductancia armadura e interpolos Rab	7,5538	mH

$$Z = 2,9661\angle 73,87 + 0,49668\angle 51,40 = 1,1333 + j3,23 \Omega \quad (40)$$

$$L = 0,0085846 \text{ H} \quad (41)$$

$$R_a = 1,1333 \Omega \quad (42)$$

La constante electromotriz se puede obtener a partir de la Ecuación 43.

$$K_a = \frac{v - iR}{w(t)} = 1,020659537 \text{ V/rad} \cdot \text{s} \quad (43)$$

La constante de torque  $k_m$  se puede aproximar igual a la constante electromotriz.

$$K_m = 1,020659537 \text{ N m/A} \quad (44)$$

Por otro lado, el momento de inercia se obtiene mediante la Ecuación 45.

$$J = \frac{t_m K_a K_m}{R} \quad (45)$$

$$J = 0,919214585 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (46)$$

El torque mecánico se obtiene mediante la constante de torque y la corriente nominal de la armadura del motor DC, véase la Ecuación 47.

$$T_m = K_m I_a = 44,0757297 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (47)$$

Finalmente, en condiciones nominales se obtiene la constante de fricción que se presenta en la parte mecánica a través de la Ecuación 48.

$$B = \frac{T_m}{w} = 0,2842746 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad} \quad (48)$$

En la Tabla 7 se muestra un resumen de los parámetros necesarios para obtener la respuesta dinámica de la máquina motriz correspondiente al motor DC.

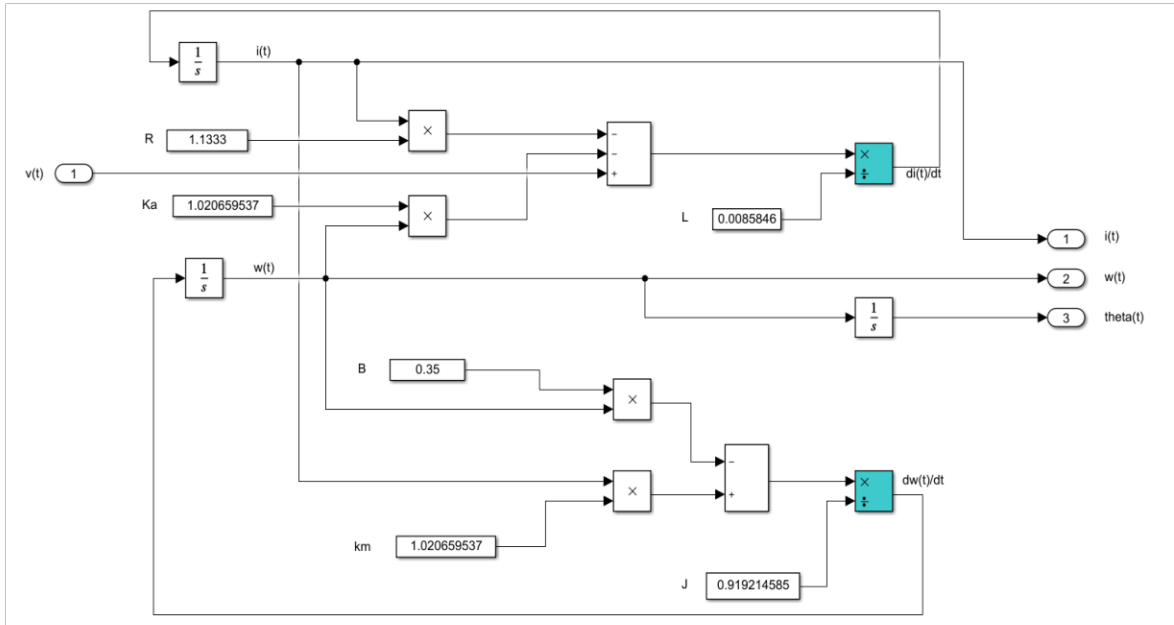
**Tabla. 7**

Resumen parámetros calculados motor DC

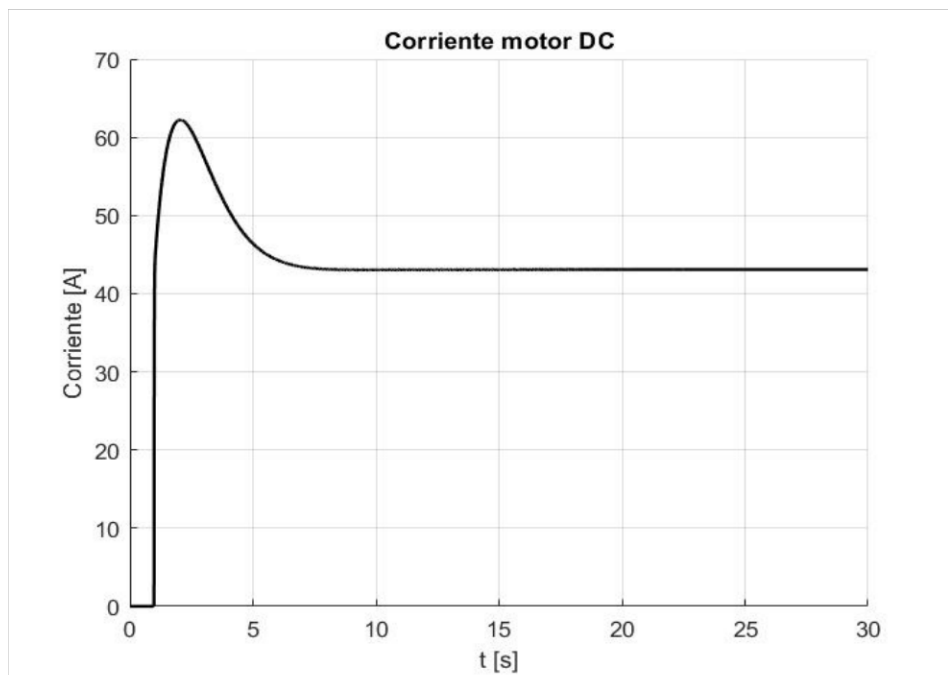
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Momento de inercia	J	0,919214585	kg · m <sup>2</sup>
Constante de fricción	B	0,2842746	N · m · s/rad
Constante fuerza electromotriz	Ka	1,020659537	V/rad · s
Constante de torque mecánico	Km	1,020659537	Nm/A
Resistencia de armadura	Ra	1,1333	Ω
Inductancia	La	0,0085846	H

#### 2.1.4.4 Simulación motor DC en Matlab/Simulink

Para obtener la respuesta dinámica del motor DC se implementa en Matlab/Simulink a través de diagrama de bloques, las funciones de transferencia obtenidas. El sistema se perturba mediante una función de paso, véase la Figura 25.

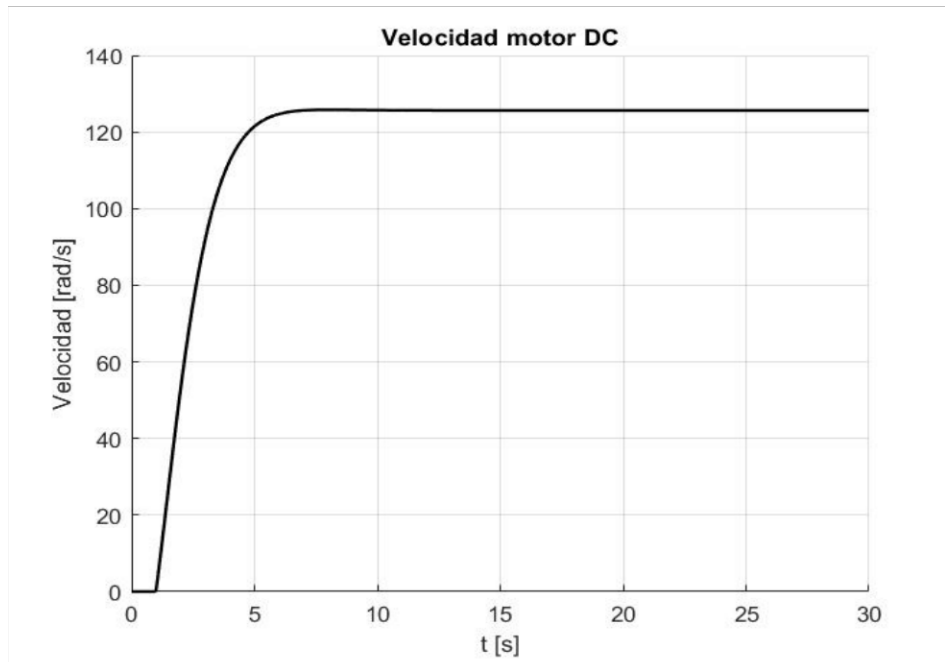


**Figura 25.** Modelo motor DC en Simulink



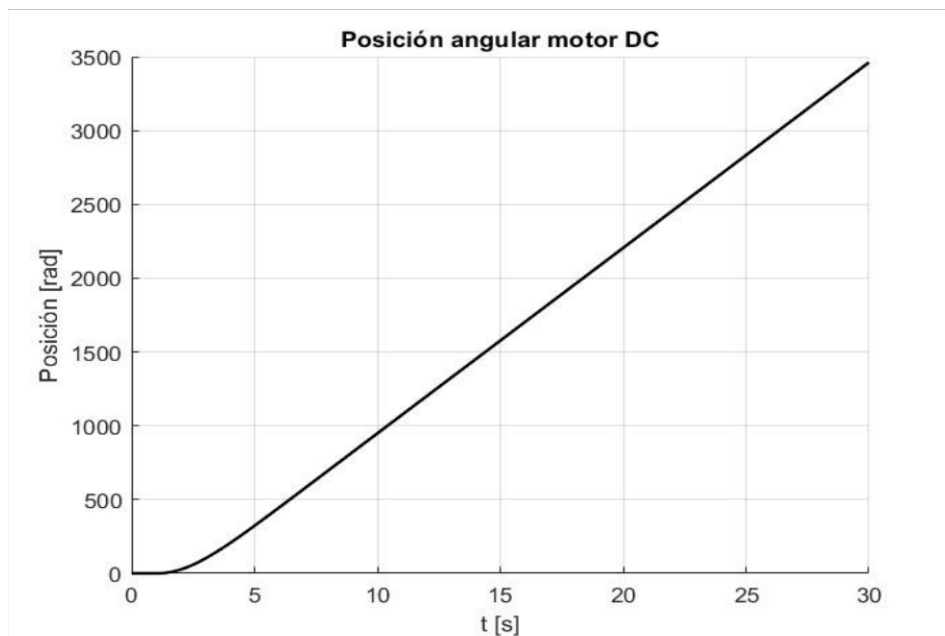
**Figura 26.** Corriente del motor DC.

En la Figura 26 se observa que la corriente del motor DC presenta un pico elevado correspondiente al arranque del motor. Posteriormente, en pocos segundos la corriente alcance un valor en estado estacionario correspondiente a la corriente nominal.



**Figura 27.** Velocidad del motor DC.

Por otro lado, en la Figura 27 se observa la velocidad angular del motor, la cual se estabiliza en 125,6 rad/s que corresponde a una velocidad de 1200 rpm, que es el valor nominal de la máquina.



**Figura 28.** Posición angular del motor DC.

Finalmente, en la Figura 28 se presenta la posición angular del rotor de la máquina de corriente continua.

### 2.1.4.5 Modelo de turbina hidráulica

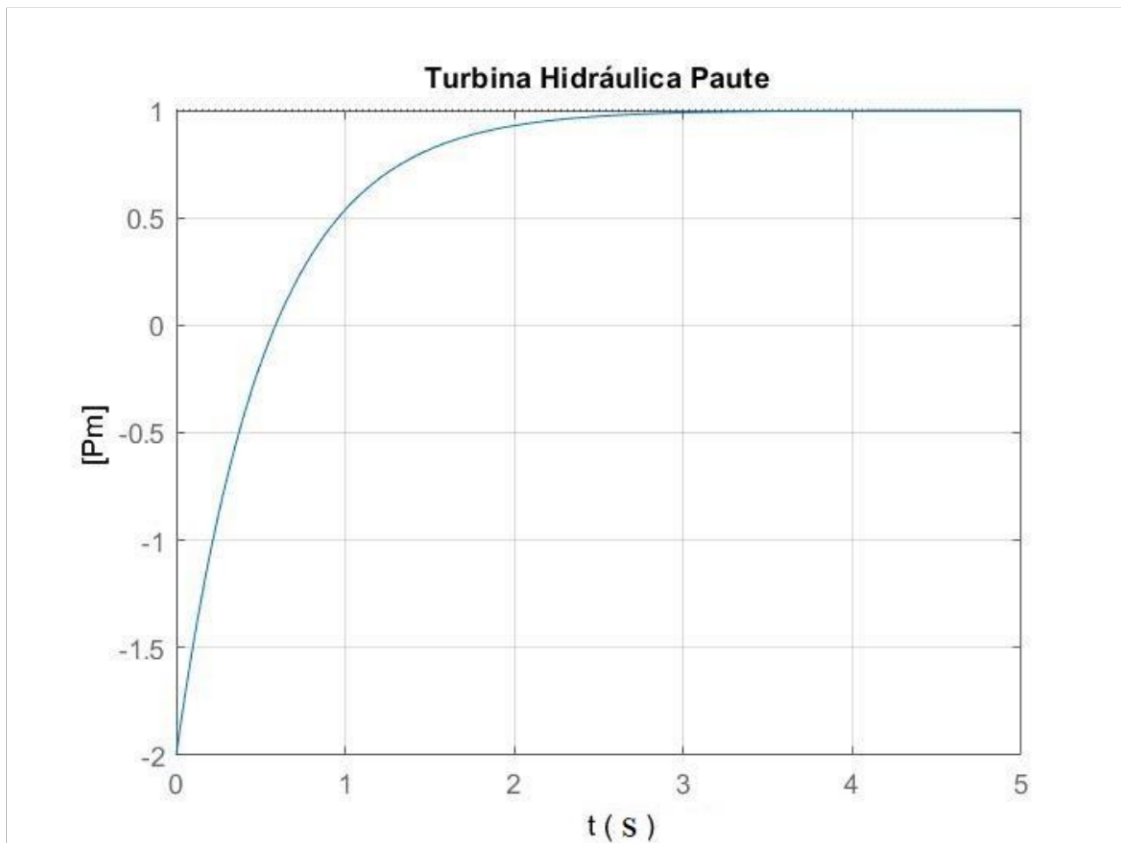
Para obtener un modelo adecuado de la turbina hidráulica se consideran los parámetros de la central Hidroeléctrica Paute Molino, ubicada en Azuay. Esta central tiene una capacidad 1075 MW y corresponde a una de las centrales más grandes del país [14].

Los parámetros de la turbina de Paute se muestran en la Tabla 8 a partir de los cuales se obtiene la función de transferencia dada en la Ecuación 50.

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_v} = \frac{1 - T_w \cdot s}{1 + 0,5 \cdot T_w \cdot s} \quad (49)$$

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_v} = \frac{1 - 1,07 \cdot s}{1 + 0.535 \cdot s} \quad (50)$$

La respuesta del modelo de turbina hidráulica se obtiene mediante Matlab, se muestra en la Figura 29.



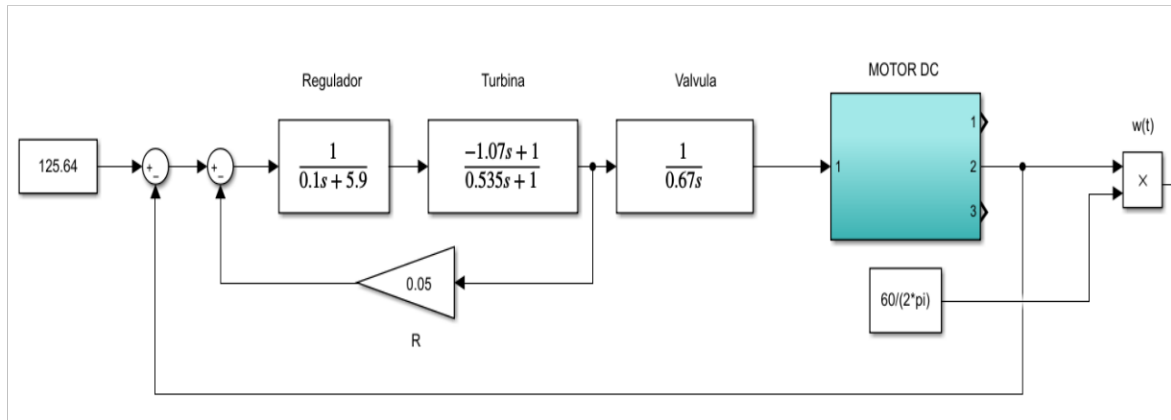
**Figura 29.** Respuesta turbina hidráulica Paute.

**Tabla. 8**  
Turbina hidráulica Paute

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Tiempo de válvula piloto	$T_p$	0,05	s
Constante de tiempo servomotor	$K_s$	5	-
Ganancia servomotor	$T_G$	0,2	s
Estatismo permanente	$R_p$	0,05	p.u
Estatismo transitorio	$R_T$	0,4	p.u
Tiempo de reset	$T_R$	5	s
Apertura de válvula	$T_W$	1,07	s

#### 2.1.4.6 Sintonización motor DC como central hidráulica

Para modelar el comportamiento de la central hidráulica se considera el regulador automático de velocidad, estatismo, turbina hidráulica y la apertura de la válvula que incluye un retardo para modelar el tiempo que toma en llegar el recurso de agua desde el embalse hasta la entrada de la turbina, se muestra en la Figura 30.



**Figura 30.** Modelo central hidráulica

La sintonización se realiza mediante Matlab/Simulink/Tuned, véase la Figura 31, de donde se obtienen las constantes del control PI, mismas que se implementan en la tarjeta STM32F407 mediante la programación en lenguaje C-Arduino.

Con la respuesta de la central hidráulica se compara con la respuesta del motor DC y se sintoniza hasta alcanzar una respuesta similar, Figura 32.

Los parámetros del control PI obtenidos se muestran en la Figura 33, a través de los cuales se obtiene la respuesta de una central hidráulica, véase la Figura 34.



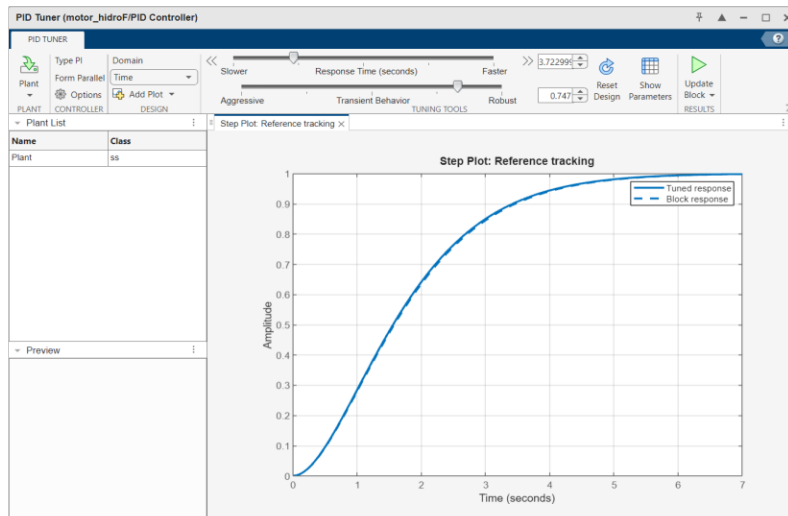


Figura 31. Herramienta Tuned.

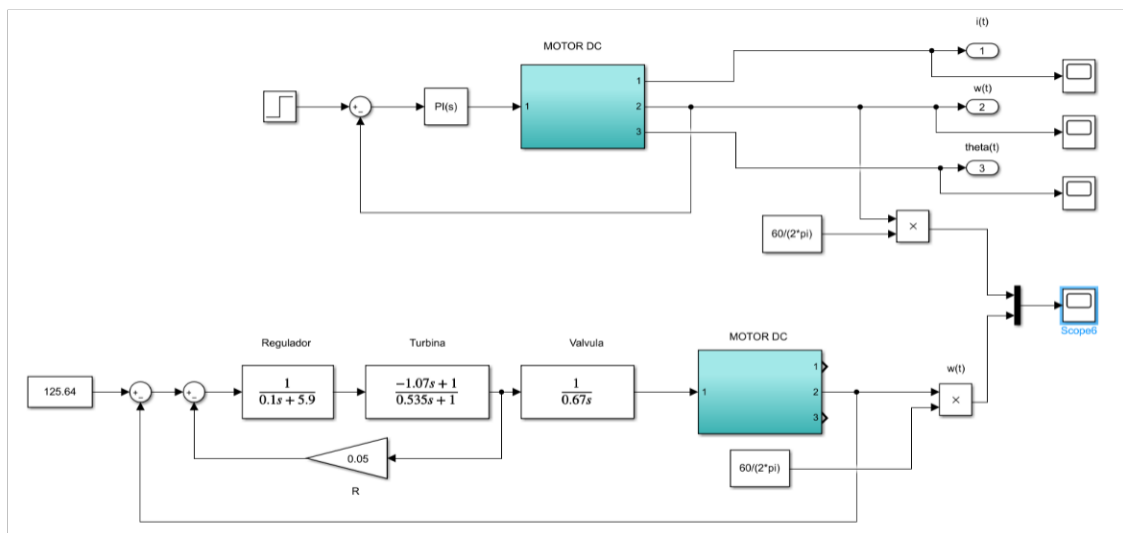


Figura 32. Sintonización del motor DC.

Controller parameters

Source:

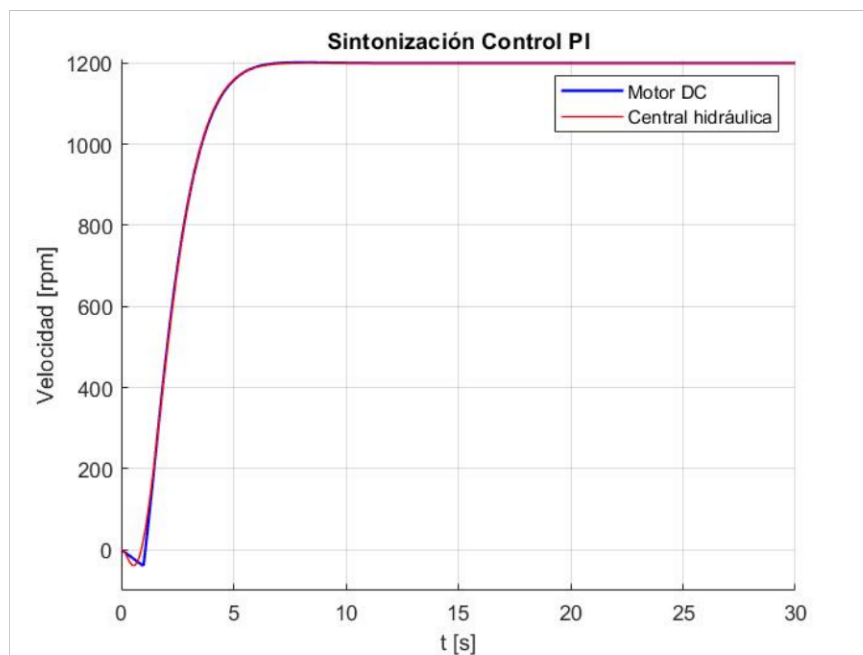
Proportional (P):

Integral (I):

Automated tuning

Select tuning method:

Figura 33. Parámetros del control PI

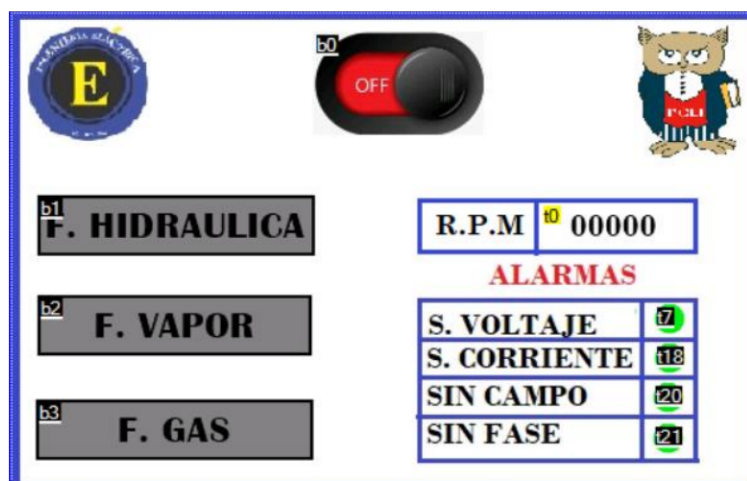


**Figura 34.** Respuesta del motor DC como central hidráulica

### 2.1.5 Pantalla NEXTION

En la pantalla NEXTION se visualiza las alarmas implementadas en el regulador automático de velocidad, se puede escoger el tipo de central que se va a simular y se observa la velocidad en rpm a la que se encuentra girando la máquina motriz, véase la Figura 35. El diseño se realiza en el programa Nextion Editor.

Los datos se transfieren a la pantalla Nextion a través del puerto serial de la tarjeta micro controlada STM32F407. En la Tabla 9 se muestran las especificaciones de la pantalla implementada en el GOV.



**Figura 35.** Pantalla Nextion.

**Tabla. 9**  
Pantalla Nextion

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>
Modelo	NX4832T035
Resolución	480x320
Tipo	Táctil TFT
Interfaz	4 pines TTL
Memoria Flash	16 M
Área visual	73,44x48,96 mm
Brillo	0-180 nit
Consumo	145 mA - 5V

## 2.2 Medidor de voltaje, corriente y factor de potencia

Con el fin de continuar con el Proyecto Cambiadores de Velocidad para Modelo de Turbina Hidráulica en un futuro Trabajo de Integración Curricular se incorpora el medidor de potencia del generador sincrónico al GOV que corresponde a la parte del hardware.

### 2.2.1 Medidor de voltaje

La medición de voltaje se realiza por fase en terminales del generador a través de un microcontrolador ESP32. Previo al procesamiento, las muestras de voltaje se deben transformar a voltajes de 0 a 5 V a través de un capacitor y divisor resistivo de voltaje. El ESP32 procesa las muestras tomadas y calcula el valor RMS de voltaje.



**Figura 36.** Modulo para medición de voltaje

El número de muestras de voltaje que se toma depende de la rapidez de procesamiento del microcontrolador. El ESP32 permite tomar 1.500.000 muestras por segundo por lo cual en un ciclo de la onda de voltaje se puede tomar 25.000 muestras que son suficientes para asegurar que el error de medida sea mínimo. La desventaja del módulo es que mide a partir de 40 V en los terminales del generador.

Al tener las fases R, S y T se utilizan tres módulos del mismo tipo, tal como se muestra en la Figura 36.

### 2.2.2 Medidor de corriente

El principio de funcionamiento del medidor de corriente es similar al medidor de voltaje, al ser una onda sinusoidal se mide el valor RMS de la corriente del secundario del transformador de corriente. Para obtener el valor real de la corriente del generador se utiliza la relación de transformación que es de 100 A/50 mA. La pinza de corriente se muestra en la Figura 37.

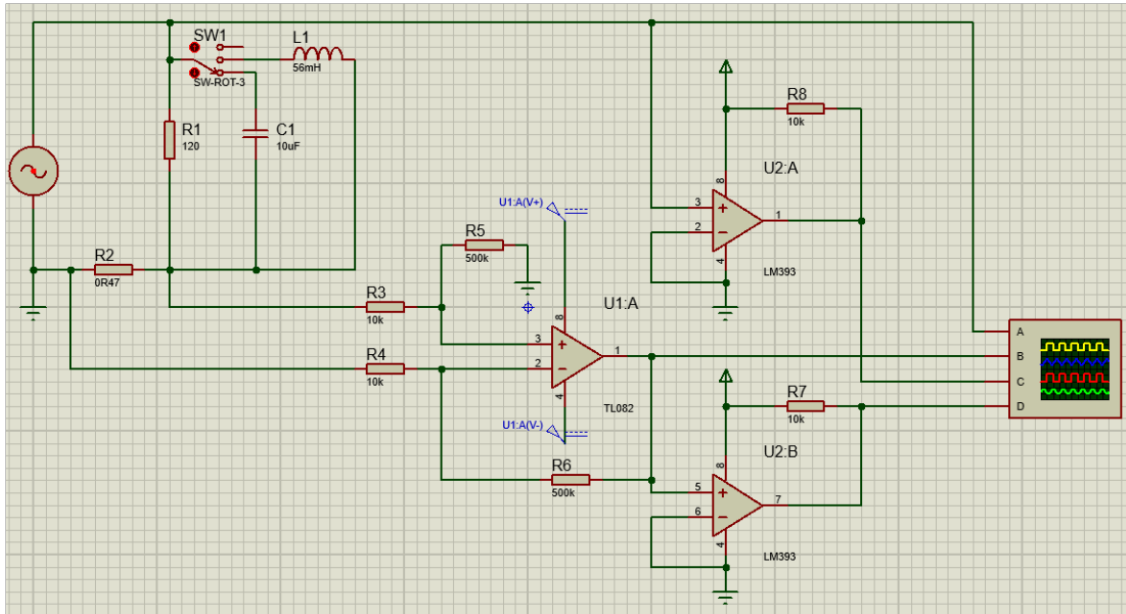


**Figura 37.** Pinza toroidal de corriente.

El número de muestras de corriente que toma el microcontrolador son 1.500.000 muestras por segundo por lo cual las muestras de corriente en un ciclo son 25.000.

### 2.2.3 Medidor de factor de potencia

La medición del factor de potencia consiste en determinar el coseno del ángulo de desfase existente entre la onda de voltaje y corriente. Para determinar el ángulo se utiliza el esquema de la Figura 38.



**Figura 38.** Esquema para obtener el ángulo de desfase.

En el esquema mostrado se tiene la fuente de voltaje que representa una de las fases del generador, la señal de voltaje entra al operacional que es comparado con una referencia de cero, es decir, detecta el cruce por cero de la señal obteniendo una señal cuadrada a la salida.

Por otro lado, para detectar la corriente a través de la carga se implementa un sensor OR47 de 10W. La señal pasa a través de un amplificador con la finalidad de obtener flancos de la misma amplitud. Similar al voltaje, la corriente pasa a través del operacional y se obtiene los cruces por cero.

Los flancos obtenidos de voltaje y corriente se procesan en el microcontrolador, a través de la función Pulse In se obtiene el ancho de pulso de la diferencia entre el pulso de corriente y voltaje obteniendo así el desfase entre las dos señales que posteriormente se transforma a grados.

Con el ángulo de desfase se obtiene el coseno del ángulo que corresponde al factor de potencia.

#### 2.2.4 Procesamiento de datos

En el microcontrolador ESP32, Figura 39, ya se tiene el factor de potencia, voltaje y corriente por fase.



**Figura 39.** Microcontrolador ESP32

Para obtener la potencia activa, aparente y reactiva por fase basta con realizar los siguientes cálculos en la programación.

$$S = V_{RMS}I_{RMS} \text{ [VA]} \quad (51)$$

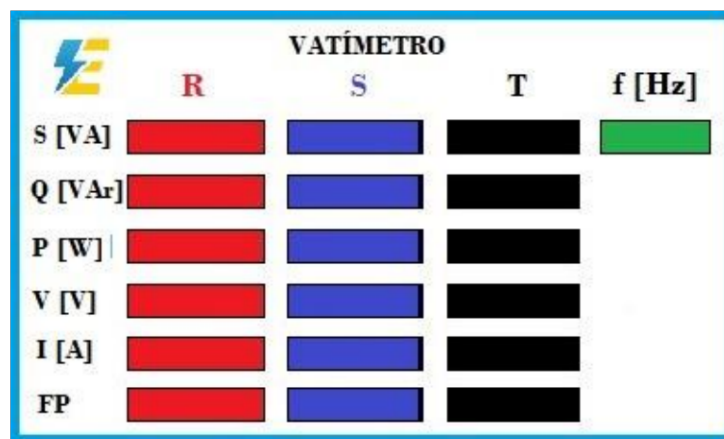
$$P = S \cdot \text{fp} \text{ [W]} \quad (52)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ [Var]} \quad (53)$$

### 2.2.5 Transmisión de datos a pantalla Nextion

En la pantalla Nextion se visualiza la corriente, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y voltaje en tiempo real. Los registros que envía el microcontrolador hacia la pantalla Nextion toma un tiempo de 0,1 s. La pantalla solo es para visualización.

La interfaz de la pantalla se realiza en el programa Nextion Editor, y mediante la programación en Arduino se envían los datos, véase la Figura 40.



**Figura 40.** Pantalla Nextion Vatímetro.

Las especificaciones de la pantalla Nextion se muestran en la Tabla 10.

**Tabla. 10**

Pantalla Nextion para vatímetro

Especificaciones	Valor
Modelo	NX4832T035
Resolución	240x400
Tipo	No táctil TFT
Interfaz	4 pines TTL
Memoria Flash	16 M
Área visual	63,44x58,96 mm
Brillo	0-180 nit
Consumo	145 mA - 5V

### 2.2.6 Adquisición de datos

Para realizar un análisis de los resultados obtenidos de las variables y funciones eléctricas es necesario exportar los datos. La pantalla Nextion tiene una salida USB que se conecta a la computadora, en Excel se realiza una macro que permite obtener el registro de datos reflejados en la pantalla. En la Figura 41 se muestra la interfaz realizada.

La macro cuenta con 19 canales, es decir, se puede registrar datos de 19 variables y funciones eléctricas tales como: corriente por fase, factor de potencia por fase, potencia activa por fase, potencia reactiva por fase, potencia aparente por fase, voltajes por fase y frecuencia 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 41.** Interfaz adquisición de datos.

También, se puede configurar el intervalo en el que se registran los datos en milisegundos, el número de datos que se requiere registrar y los canales activados, tal como se muestra en la Figura 42.

### 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)	150
Filas de datos	5000
Canales de datos	20
Orientación de los datos	Newest last

**Figura 42.** Configuración de los datos de registro.

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

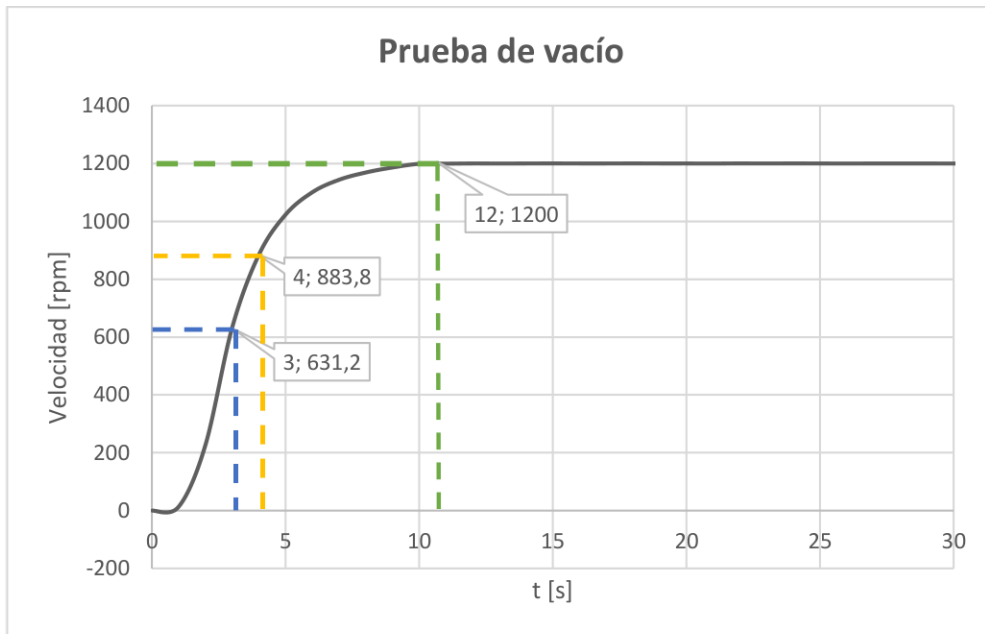
#### 3.1 Pruebas para obtener las características estáticas del grupo motor-generator de una central hidráulica

Las características estáticas del grupo motor-generator corresponden al: amortiguamiento, inercia y estatismo. El amortiguamiento y la inercia se pueden obtener a través de las pruebas de decaimiento y conexión/desconexión abrupta de carga, en estas pruebas se registran los valores de frecuencia y la potencia activa que se obtienen a través de la macro de adquisición de datos.

Por otro lado, el estatismo se obtiene a través de la prueba de rechazo de carga, considerando que la carga conectada al sistema debe ser de al menos el 50% de la potencia nominal del generador.



### 3.1.1 Prueba de vacío



**Figura 43.** Prueba de vacío.

La prueba de vacío se realiza energizando el campo de la máquina motriz, posteriormente se escoge la central hidráulica en la pantalla Nextion y se pone en operación. En esta prueba se observa cómo va aumentando la velocidad del motor hasta llegar a la velocidad de referencia que es de 1200 rpm, la respuesta y el tiempo que tarda en alcanzar el valor nominal depende de la sintonización del controlador PI.

Una vez que el motor alcance la velocidad de referencia debe mantenerse en ese valor, Figura 43, a menos que exista una perturbación externa como la conexión o desconexión de carga.

De la respuesta obtenida se pueden obtener los tiempos de respuesta. La constante de tiempo ( $\tau$ ) que corresponde al 63% del valor final de velocidad es:

$$\tau = 3,5 \text{ s} \quad (54)$$

El tiempo de crecimiento es:

$$t_r = 2,2 \cdot \tau = 8 \text{ s} \quad (55)$$

Finalmente, el tiempo que tarda en estabilizarse es:

$$t_s = 3 \cdot \tau = 14 \text{ s} \quad (56)$$

### 3.1.1.1 Análisis de resultados

Con los tiempos de respuesta obtenidos se observa que la máquina motriz alcanza el 63% del valor nominal en 3,5 s que es similar al tiempo obtenido en Matlab/Simulink. Por otro lado, en 8 s el motor llega al 90% de la velocidad nominal, es decir, que este modelo de central hidráulica es rápido.

### 3.1.2 Desconexión abrupta de carga

También conocida como rechazo de carga, esta prueba consiste en desconectar de forma abrupta toda la carga disponible en el Laboratorio Físico de SEP, a través del interruptor ubicado en el centro de carga cuando el sistema tenga una frecuencia de 60 Hz y 220 V.

Una vez desconectada la carga, se registran los valores de velocidad hasta que el regulador automático de velocidad lleve al motor a la velocidad de referencia y permanezca estable en ese valor. Los resultados se muestran en la Figura 44.

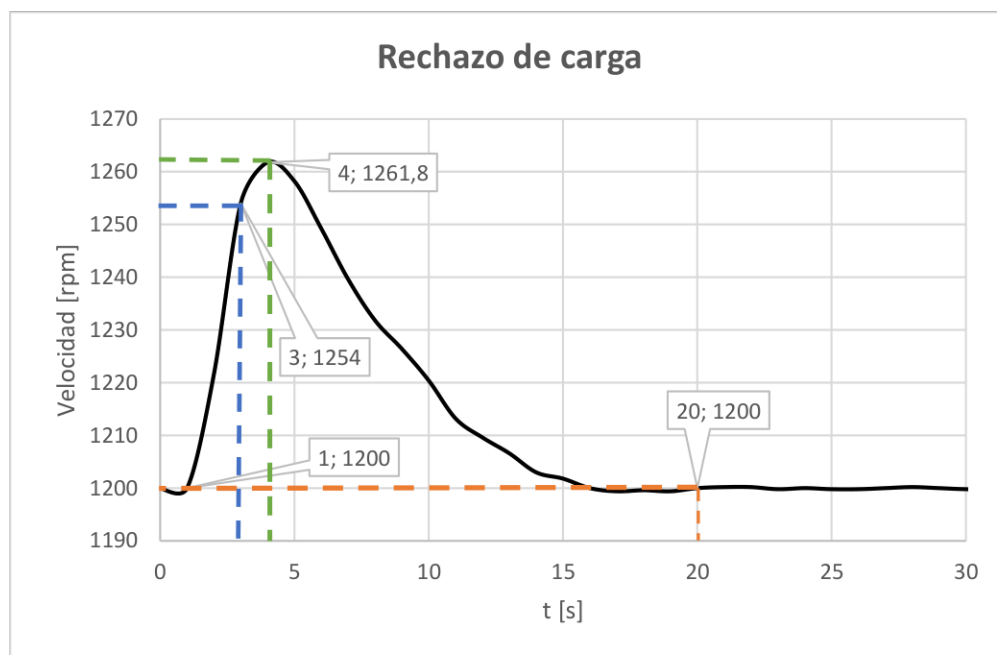


Figura 44. Desconexión abrupta de carga.

### 3.1.2.1 Análisis de resultados

La pérdida abrupta de carga provoca que la máquina motriz se acelere y en consecuencia la frecuencia alcanza un valor más alto al nominal. La pendiente que presenta en los primeros segundos corresponde a la respuesta inercial, posteriormente actúa el regulador

automático de velocidad y disminuye la velocidad de la máquina hasta alcanzar el valor de referencia.

La prueba de rechazo de carga permite determinar el amortiguamiento de las máquinas a partir de la Ecuación 59 y con los valores dados en la Tabla 11.

**Tabla. 11**  
Resultados prueba rechazo de carga

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Tiempo inicial al 10%	$t_o$	1	s
Tiempo final	$t_f$	4	s
Variación de tiempo	$\Delta t$	3	s
Frecuencia inicial	$f_o$	60	Hz
Frecuencia final	$f_f$	63,1	Hz
Potencia eléctrica conectada	$P_{eo}$	720	W

$$\frac{2H}{w_s} \frac{d\Delta w}{dt} + D\Delta w = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (57)$$

La variación de la potencia mecánica es cero cuando se realiza el rechazo de carga, mientras que, la potencia eléctrica final es cero y la inicial es la potencia conectada previa a la desconexión.

$$\frac{2H}{w_s} \frac{d\Delta w}{dt} + D\Delta w = P_{eo} \quad (58)$$

En estado estacionario, la derivada de la variación de la velocidad con respecto al tiempo es cero.

$$D = \frac{P_{eo} [\text{pu}]}{\Delta w [\text{pu}]} \quad (59)$$

$$D = 2,03 \text{ p.u} \quad (60)$$

Por otro lado, esta prueba permite obtener la inercia de la máquina a través de la Ecuación 61. En la parte lineal de la curva de rechazo de carga se puede aproximar el

comportamiento a partir de la Ecuación 62 y se despeja la inercia, el amortiguamiento en la parte inercial es cero.

$$\frac{2H d\Delta w}{w_s dt} = P_{eo} \quad (61)$$

$$2H \frac{\Delta(\Delta f_{pu})}{\Delta t} = P_{eo} \quad (62)$$

$$H = \frac{P_{eo}}{2 \cdot \frac{\Delta(\Delta f_{pu})}{\Delta t}} [s] \quad (63)$$

$$H = 2,8026 s \quad (64)$$

### 3.1.3 Prueba de decaimiento

La prueba de decaimiento consiste en apagar el campo y armadura del motor y determinar el tiempo en el que el grupo motor-generator alcanza la velocidad de 0 rpm. La pendiente de caída depende de la inercia de las partes rotatorias y los amortiguamientos eléctricos y mecánicos del grupo. La respuesta obtenida se muestra en la Figura 45.

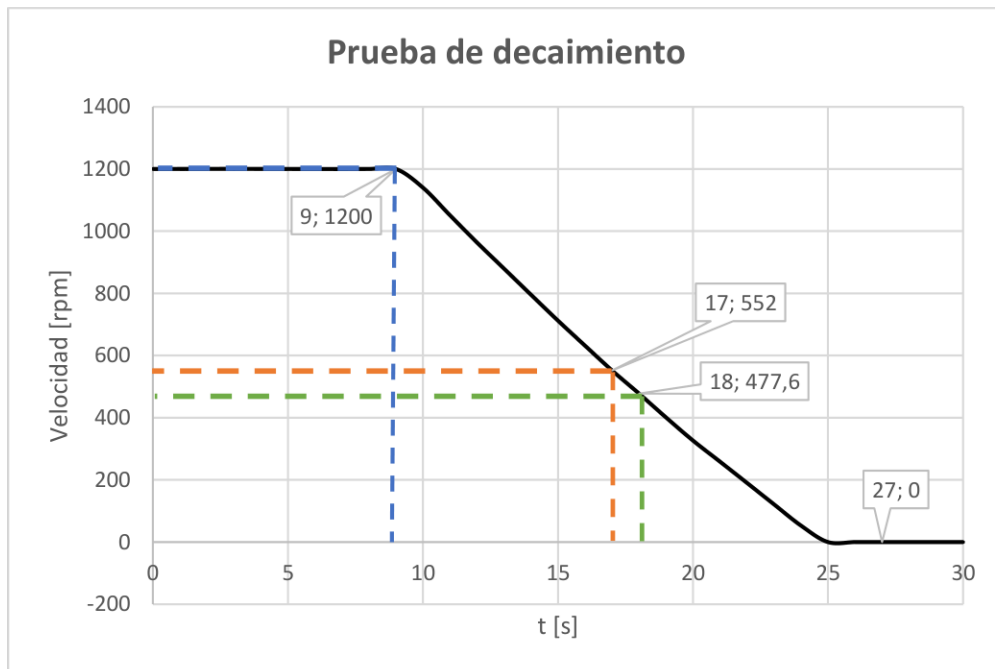


Figura 45. Prueba de decaimiento.

De forma similar a la prueba de vacío se puede obtener los tiempos de respuesta. En este caso la constante de tiempo es:

$$\tau = 8,5 \text{ s} \quad (65)$$

$$t_r = 2,2 \cdot \tau = 18,7 \text{ s} \quad (66)$$

$$t_s = 25 \text{ s} \quad (67)$$

### 3.1.3.1 Análisis de resultados

En la prueba de decaimiento, el tiempo en el que se detiene el motor DC es 18 s, el grupo no se detiene de forma inmediata debido a la inercia del motor y el generador, así como a los amortiguamientos eléctricos y mecánicos.

A partir de la prueba de decaimiento también se puede obtener el amortiguamiento del grupo motor-generador con la Ecuación 70.

$$\frac{2H}{w_s} \frac{dw}{dt} = P_a \quad (68)$$

$$\frac{2H \Delta w}{w_s \Delta t} = P_a \quad (69)$$

$$D = \frac{6 \cdot H}{T} [\text{p.u}] \quad (70)$$

$$D = 1,9764 \text{ p.u} \quad (71)$$

### 3.1.4 Conexión abrupta de carga

La conexión abrupta de carga consiste en energizar todas las cargas del Laboratorio de SEP en un mismo instante de tiempo. En este caso la frecuencia decae debido a que la velocidad de la máquina motriz disminuye, por acción del regulador de velocidad el voltaje de la armadura aumenta y por lo tanto sube la velocidad hasta llegar a 1200 rpm. Los resultados se muestran en la Figura 46.

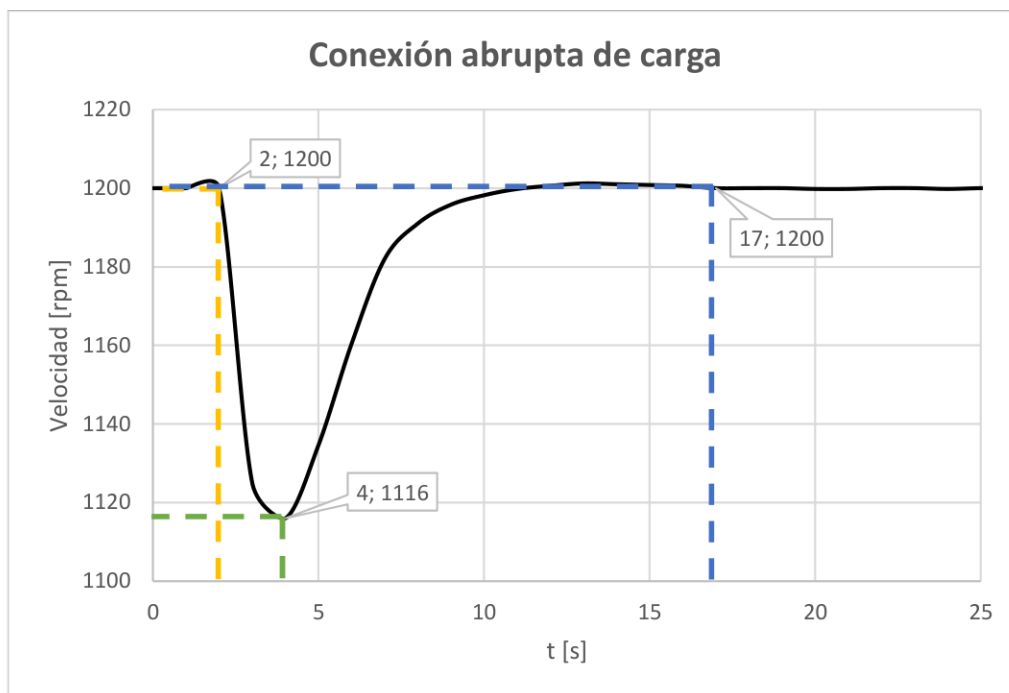


Figura 46. Conexión abrupta de carga.

### 3.1.4.1 Análisis de resultados

En la conexión abrupta de carga la frecuencia cae hasta 55,8 Hz con una variación de 4,2 Hz. El regulador automático actúa en 2 segundos posterior a la respuesta inercial.

### 3.1.5 Estatismo

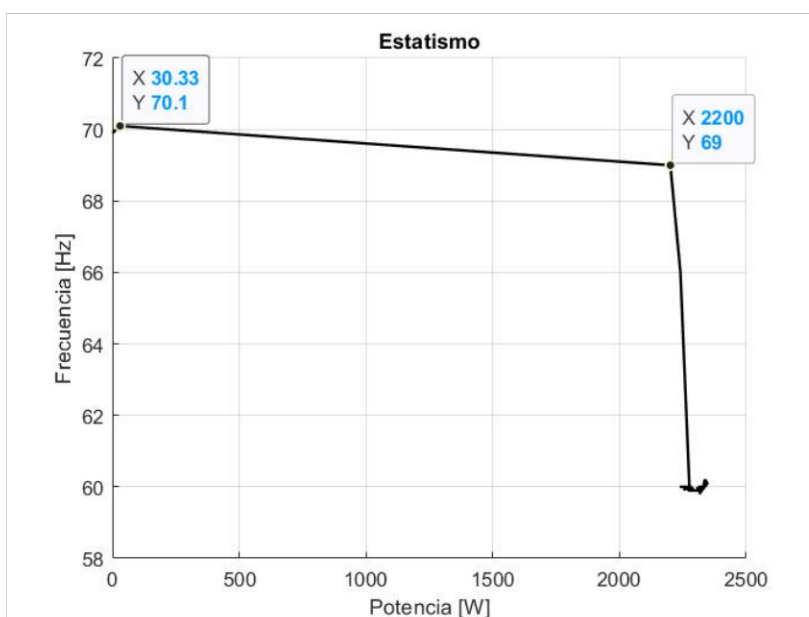


Figura 47. Estatismo

Para obtener el estatismo se realiza la prueba de rechazo de carga, el procedimiento se describe a continuación:

- Energizar el motor DC y el regulador automático de velocidad GOV.
- Alimentar el campo del generador y regular hasta obtener 220 V en terminales del generador.
- Conectar el transformador principal, línea de transmisión no transpuesta y línea de transmisión transpuesta, así como, el transformador LTC y PST.
- Energizar las cargas disponibles en el Laboratorio hasta obtener una potencia activa de al menos el 50% de la potencia nominal del generador.
- Una vez energizadas las cargas es necesario regular el voltaje fase-neutro en la barra de carga a 127 V, y verificar que la frecuencia sea 60 Hz.
- Con las condiciones de operación dadas anteriormente se procede a la desconexión de los equipos del sistema a través del interruptor ubicado en el sincroscoPIO, con la finalidad de obtener una potencia de cero.
- El LFSEP no dispone de un AVR, por cual, al momento de desconectar la carga es necesario mantener el voltaje alrededor de 220 V mediante ajustes manuales del Variac.

Con los datos de potencia y frecuencia se grafica  $f$  vs  $P$ . Los resultados obtenidos en la prueba se muestran en la Figura 47, donde se observa la pendiente correspondiente a la característica de regulación. El valor se obtiene mediante la Ecuación 72 con los resultados de la Tabla 12.

**Tabla. 12**

Resultados prueba rechazo de carga

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia máxima	$P_{max}$	2200	W
Potencia mínima	$P_{min}$	30,33	W
Frecuencia máxima	$f_{max}$	70,1	Hz
Frecuencia mínima	$f_{min}$	69	Hz

$$R = \frac{\Delta f [pu]}{\Delta P_E [pu]} \quad (72)$$

### 3.2 Pruebas para obtener las características dinámicas del grupo motor-generator de una central hidráulica

El objetivo de las pruebas dinámicas es obtener los tiempos de respuesta del regulador automático de velocidad, así como, los sobreimpulsos que alcanza cuando se perturba el sistema a través de la conexión y desconexión sucesiva de diferentes pasos de caga.

Para esta prueba se utiliza las cargas del Laboratorio, en particular, se usa el calefactor que consume potencia activa elevada con la finalidad de realizar pasos bruscos de carga y obtener adecuadas respuestas.

También, se puede determinar la banda muerta de frecuencia que corresponde a las variaciones pequeñas de velocidad alrededor de la velocidad de referencia. En un sistema real la banda muerta corresponde a los límites de frecuencia en los cuales el GOV no opera, sin embargo, el GOV del Laboratorio siempre permanece operando caso contrario el motor DC puede acelerarse.

#### 3.2.1 Pasos de carga

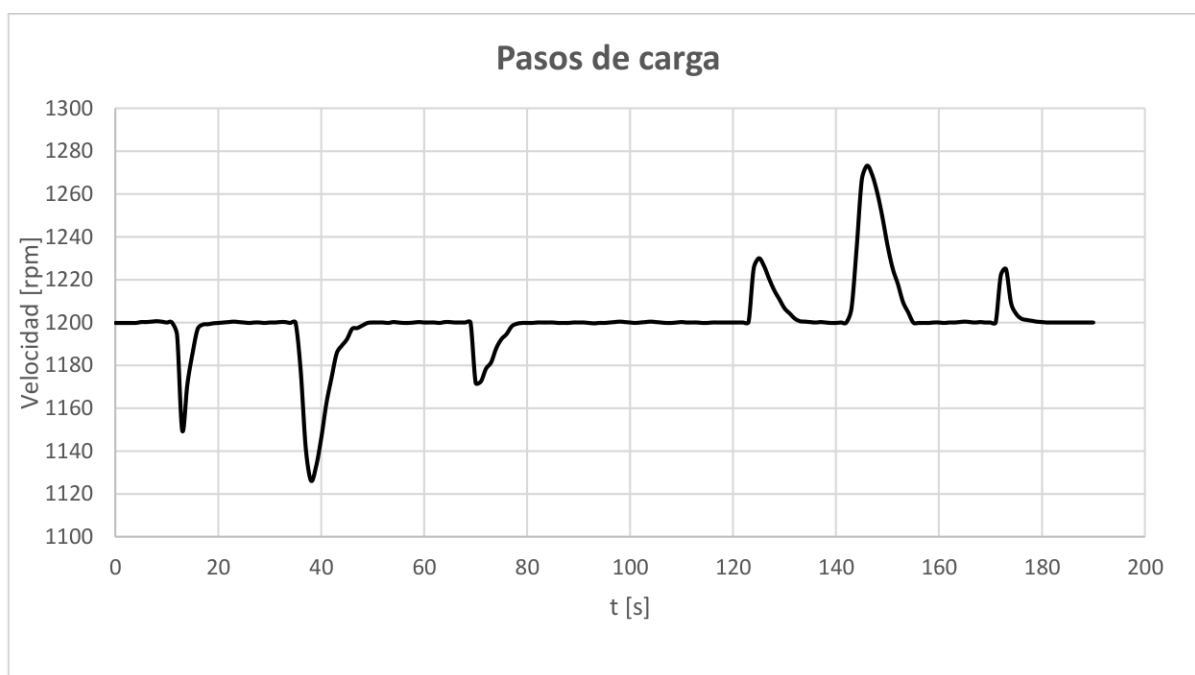


Figura 48. Pasos de carga.



En esta prueba se realizan tres conexiones diferentes de carga y tres desconexiones de las mismas cargas. La conexión se realiza de forma inmediata a través de los interruptores disponibles en el Laboratorio. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 48.

### 3.2.1.1 Conexión: Paso 1 de carga

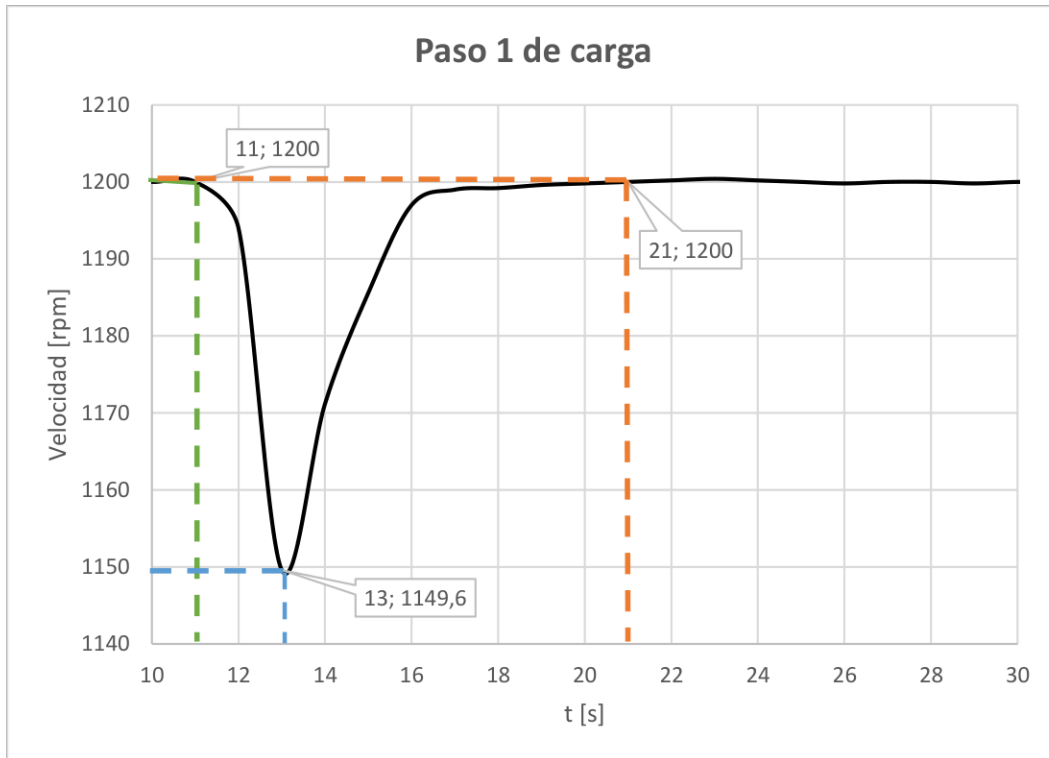


Figura 49. Paso 1 de carga.

Tabla. 13

Resultados paso 1 de carga

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Máximo sobreimpulso	$M_p$	4,16	%
Tiempo de crecimiento	$t_r$	8	s
Tiempo de establecimiento	$t_s$	10	s
Tiempo pico	$t_p$	2	s
Tiempo de retardo	$t_d$	1	s
Frecuencia máxima	$f_{max}$	57,5	Hz

En el primer paso de conexión de carga, Figura 49, la frecuencia cae hasta 57,5 Hz (1150 rpm) en un tiempo de 2 s. La caída se debe a la disminución de velocidad de la máquina motriz provocada por la conexión de carga, posteriormente, el GOV actúa y recupera la frecuencia nominal del sistema en aproximadamente 10 s. Los tiempos de respuesta y sobreimpulso se muestran en la Tabla 13.

### 3.2.1.2 Conexión: Paso 2 de carga

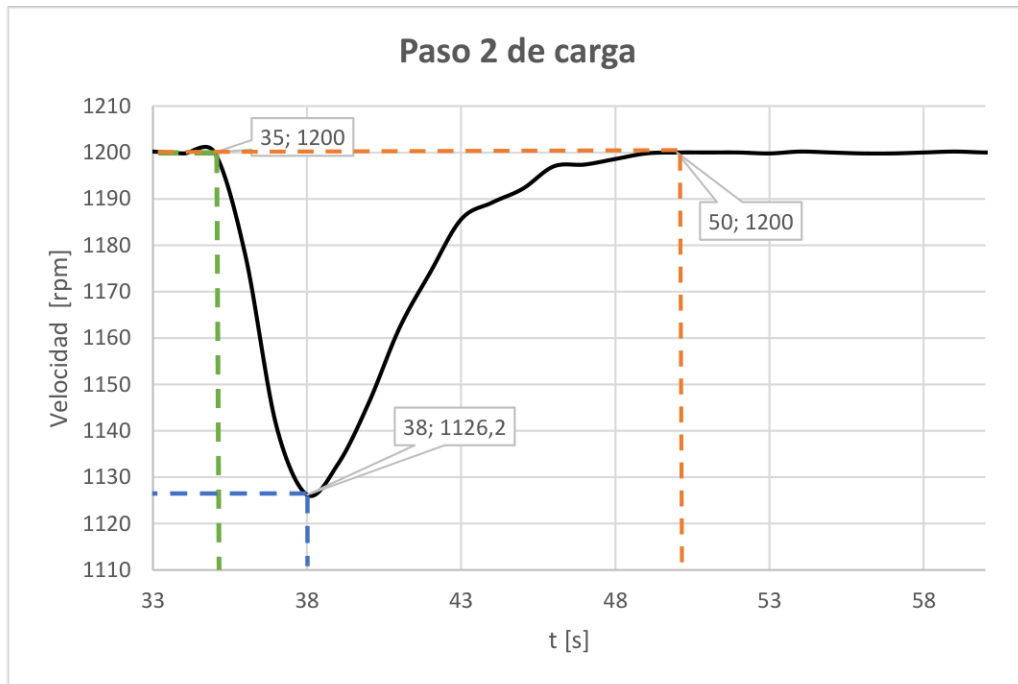


Figura 50. Paso 2 de carga.

Tabla. 14

Resultados paso 2 de carga

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Máximo sobreimpulso	$M_p$	6,16	%
Tiempo de crecimiento	$t_r$	12	s
Tiempo de establecimiento	$t_s$	15	s
Tiempo pico	$t_p$	3	s
Tiempo de retardo	$t_d$	2	s
Frecuencia máxima	$f_{max}$	56,3	Hz

En el segundo paso de conexión de carga la frecuencia cae hasta 56,3 Hz debido a que la carga conectada es mayor a la carga del primer paso, véase la Figura 50. En este caso, el regulador automático de velocidad recupera la velocidad al valor de referencia en 15 s, la carga conectada fue más grande por lo cual toma 5 s más en regular. Los tiempos de respuesta se muestran en la Tabla 14.

### 3.2.1.3 Conexión: Paso 3 de carga

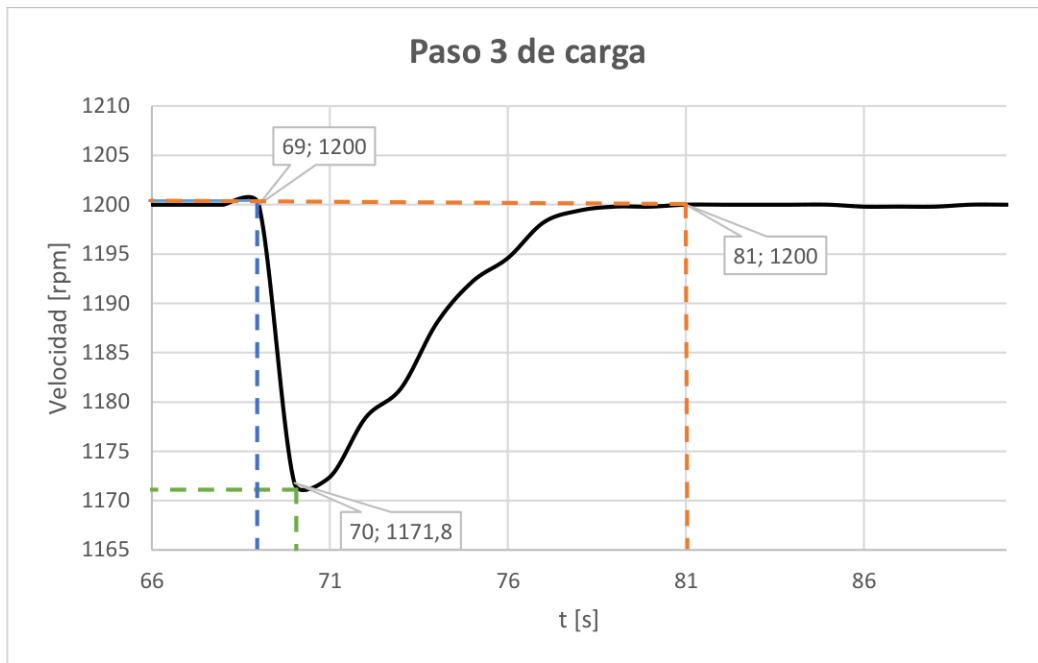


Figura 51. Paso 3 de carga.

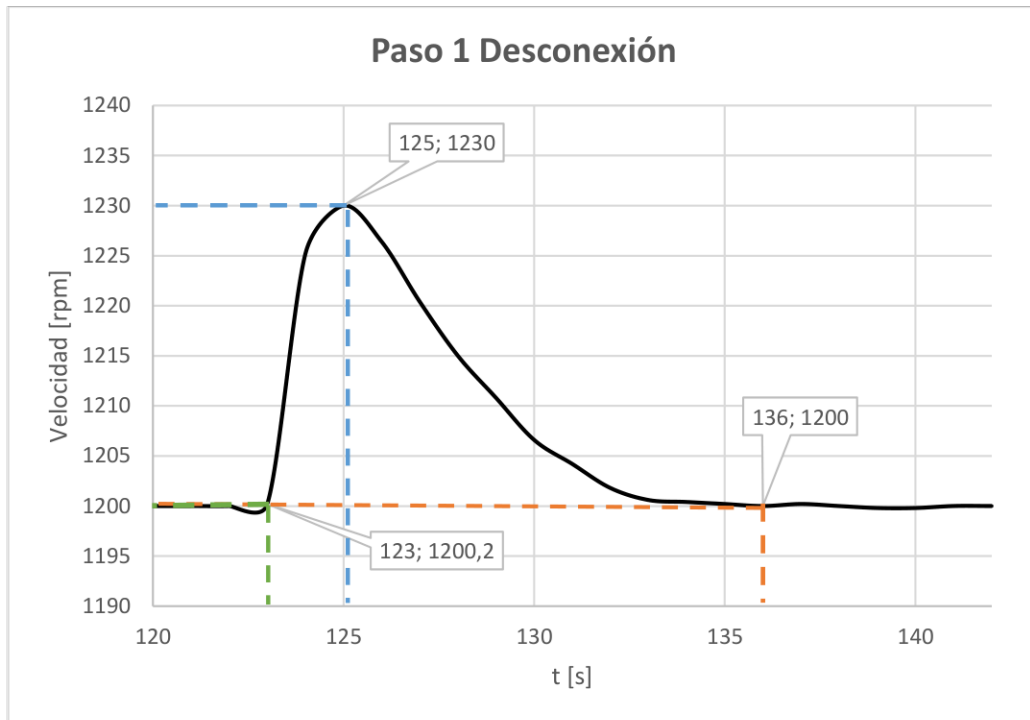
Tabla. 15

Resultados paso 3 de carga

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Máximo sobreimpulso	$M_p$	2,3	%
Tiempo de crecimiento	$t_r$	11	s
Tiempo de establecimiento	$t_s$	12	s
Tiempo pico	$t_p$	1	s
Tiempo de retardo	$t_d$	0,5	s
Frecuencia máxima	$f_{max}$	58,6	Hz

En el tercer paso de carga se conecta una carga menor a la del paso dos y la frecuencia disminuye hasta 58,6 Hz, al ser una perturbación más pequeña el regulador automático recupera la velocidad en 12 s, es decir, 3 s más rápido que el paso dos, Figura 51. Los tiempos se muestran en la Tabla 15.

### 3.2.1.4 Desconexión: Paso 1 de carga



**Figura 52.** Paso 1 de desconexión.

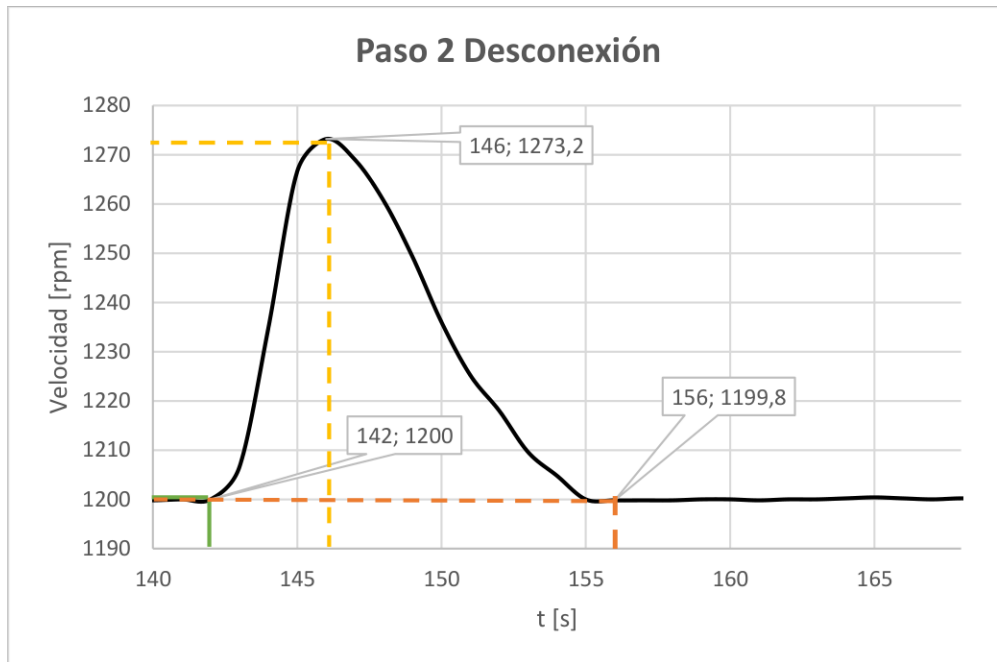
**Tabla. 16**

Resultados paso 1 de desconexión

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Máximo sobreimpulso	$M_p$	2,4	%
Tiempo de crecimiento	$t_r$	11	s
Tiempo de establecimiento	$t_s$	13	s
Tiempo pico	$t_p$	2	s
Tiempo de retardo	$t_d$	0,5	s
Frecuencia máxima	$f_{max}$	61,5	Hz

Con los tres pasos de carga conectados se realiza la prueba de desconexión por pasos. En el primer paso de carga la frecuencia sube hasta 61,5 Hz que se debe a la pérdida de carga que provoca que la máquina motriz se acelere, Figura 52. Los tiempos de respuesta en la desconexión se muestran en la Tabla 16.

### 3.2.1.5 Desconexión: Paso 2 de carga



**Figura 53.** Pasos 2 de desconexión.

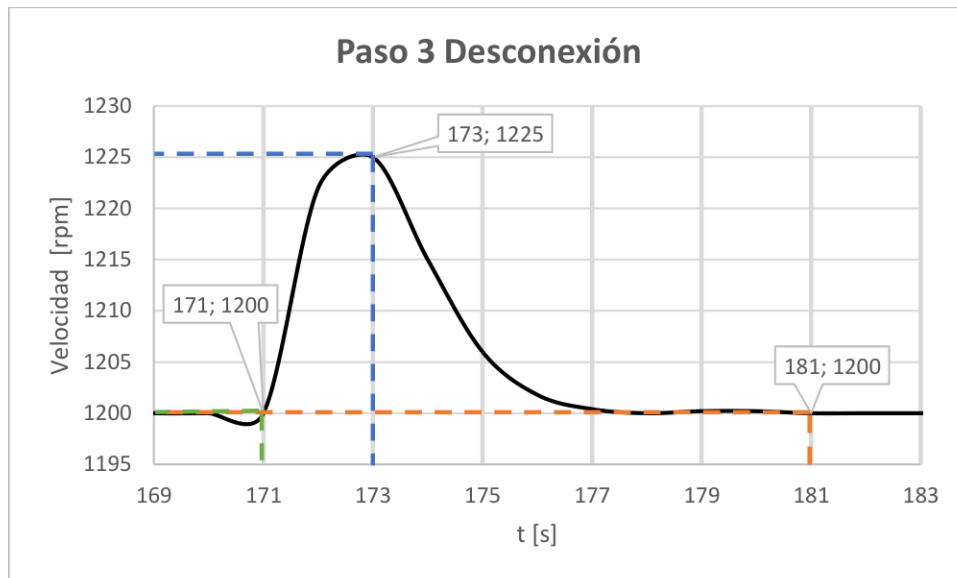
**Tabla. 17**

Resultados paso 2 de desconexión

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Máximo sobreimpulso	$M_p$	6,083	%
Tiempo de crecimiento	$t_r$	10	s
Tiempo de establecimiento	$t_s$	14	s
Tiempo pico	$t_p$	4	s
Tiempo de retardo	$t_d$	3	s
Frecuencia máxima	$f_{max}$	63,65	Hz

La segunda desconexión de carga corresponde a la carga más grande conectada previamente por lo cual la frecuencia aumenta representativamente en comparación con el primer caso de desconexión. La frecuencia alcanza un valor de 63,65 Hz y se regula en un tiempo de 14 s tal como se muestra en la Figura 53. Los tiempos se muestran en la Tabla 17.

### 3.2.1.6 Desconexión: Paso 3 de carga



**Figura 54.** Paso 3 de desconexión.

Finalmente, se desconecta la última carga. En la última desconexión la frecuencia sube a 61,25 Hz (1225 rpm). La desconexión de carga no es tan representativa por lo cual la frecuencia aumenta 1,25 Hz, mientras que, el tiempo que tarda en regular es 10 s, como se muestra en la Figura 54. Los tiempos se muestran en la Tabla 18.

**Tabla. 18**

Resultados paso 3 de desconexión

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Máximo sobreimpulso	$M_p$	2,083	%
Tiempo de crecimiento	$t_r$	8	s
Tiempo de establecimiento	$t_s$	10	s
Tiempo pico	$t_p$	3	s
Tiempo de retardo	$t_d$	1	s
Frecuencia máxima	$f_{max}$	61,25	Hz

### 3.2.2 Banda muerta

Para obtener el tiempo de respuesta y la zona muerta del GOV se realiza la prueba de conexión de carga, el procedimiento es el siguiente.

- Energizar el motor DC y el regulador automático de velocidad GOV.
- Alimentar el campo del generador y regular hasta obtener 220 V en sus terminales.
- Conectar el transformador principal, línea de transmisión no transpuesta y línea de transmisión transpuesta, así como, los transformadores LTC y PST.
- Regular el voltaje fase-neutro en la barra de carga a 127 V, y verificar que la frecuencia sea 60 Hz.
- Energizar las cargas disponibles en el Laboratorio, se sugiere conectar una potencia activa de al menos 200 W en el mismo instante.
- El grupo motor-generador del LFSEP no dispone de un AVR, por lo cual, al momento de conectar la carga es necesario mantener el voltaje alrededor de 220 V mediante ajustes manuales del Variac.
- Obtener las gráficas P vs t y f vs t, y analizar en los primeros segundos a partir de la conexión.

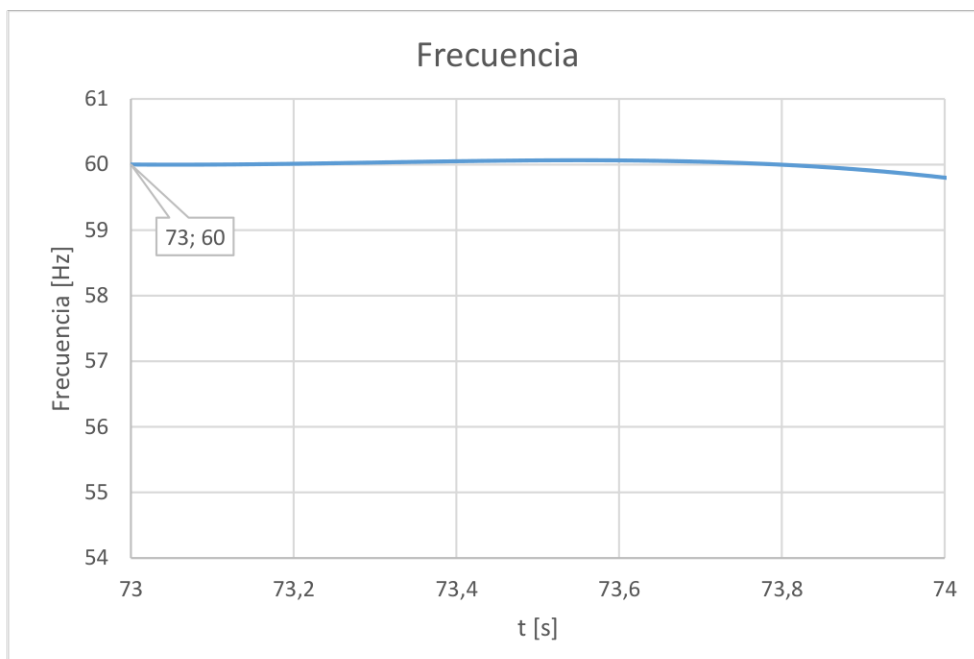
La conexión de las cargas se realiza a los 7,3 s, a partir de ese instante se observa cuando la frecuencia empieza a decaer obteniendo el tiempo de respuesta del regulador automático de velocidad en el que empieza a regular, véase la Figura 55. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

**Tabla. 19**

Resultados tiempo banda muerta

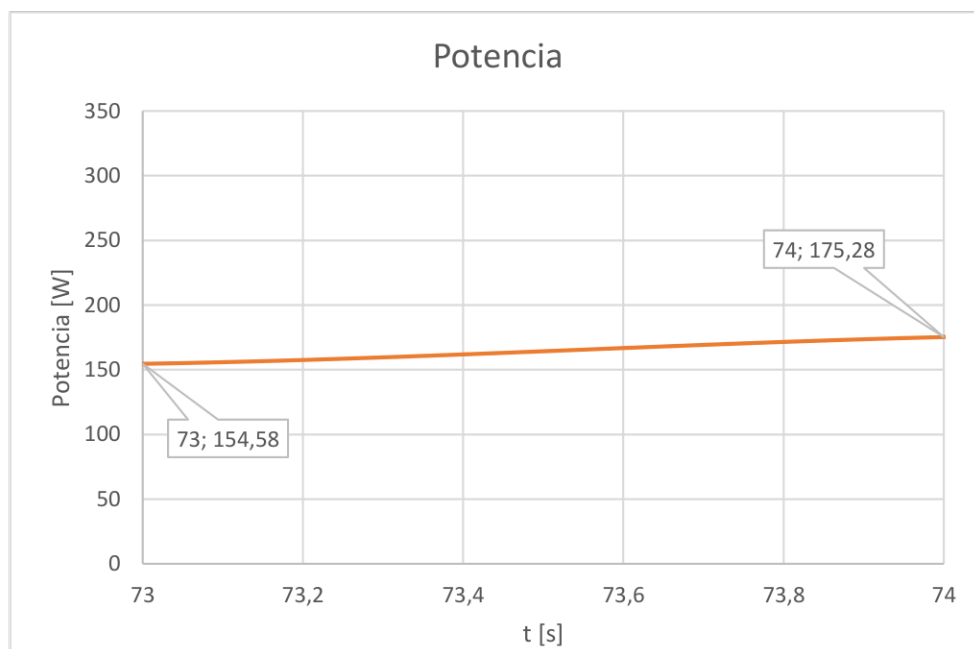
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Tiempo de conexión carga	$t_c$	7,3	s
Tiempo de caída de frecuencia	$t_d$	7,38	s

$$t_{\text{respuesta}} = 0,08 \text{ s} \quad (74)$$



**Figura 55.** Frecuencia vs tiempo

Por otro lado, en la Figura 56 se observa la potencia en el tiempo, conocido el tiempo de conexión y el tiempo de respuesta del GOV se determina la zona muerta a partir de la diferencia de potencia en por unidad. Los resultados se muestran en la Tabla 20.



**Figura 56.** Potencia vs tiempo



**Tabla. 20**

Resultados de la prueba para determinar la zona muerta

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia en el instante de conexión carga	$P_c$	154,58	s
Potencia en el instante de caída de frecuencia	$P_d$	175,28	s

$$Z_{muerta} = \frac{P_d - P_c}{P_b} \text{ [p. u]} \quad (75)$$

$$Z_{muerta} = 0,002775 \text{ p. u} \quad (76)$$

Entonces, la zona muerta del grupo motor-generador funcionando como modelo de turbina hidráulica es  $2,775 \times 10^{-3} \%$ .

### 3.3 Conclusiones

- Una vez realizado el rediseño del software, hardware e incorporación del encoder en la tarjeta de potencia y control, así como, el diseño de un medidor de potencia se implementa de manera física al grupo motor-generador. Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas son satisfactorios y esperados. Se puede concluir que se cumple con los objetivos planteados en el presente proyecto.
- Mediante el modelo dinámico del motor DC implementado en Matlab/Simulink se determinan las constantes del controlador PI con la herramienta tuned. Las constantes se implementaron en la tarjeta STM32F407 por medio de la programación en Lenguaje C-Arduino. Lo que lleva a concluir que el regulador automático de velocidad emula el comportamiento de una turbina hidráulica.
- En cumplimiento con los objetivos planteados, se implementa una tarjeta de potencia y control que genera los pulsos para disparo de los tiristores e incluye la medición de velocidad proveniente del encoder de 1000 PPR que permite un control de velocidad más exacto con una zona muerta de 0,002775 p.u y tiempo de respuesta de 0,08 s.
- El diseño del medidor de voltaje, corriente y factor de potencia se construye e incorpora al regulador automático de velocidad. Mediante las mediciones de corriente, factor de potencia y voltaje por fase se calculan la potencia activa,

potencia reactiva y aparente por fase en terminales del generador que se visualizan en la pantalla Nextion en tiempo real.

- Las características estáticas y dinámicas del grupo motor DC-generador sincrónico se obtienen a partir de las pruebas de decaimiento y rechazo de carga tomando mediciones de frecuencia y potencia, considerando que en el regulador automático de velocidad se incorpora la turbina hidráulica, válvula y modelo dinámico del motor DC.
- El vatímetro incorporado al regulador automático de velocidad permite la adquisición en tiempo real de corriente, factor de potencia, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y voltaje de las fases R, S y T utilizando una macro programada en Excel.

### **3.4 Recomendaciones**

- Se recomienda verificar el estado del encoder acoplado al eje del motor DC que envía los datos de velocidad hacia la tarjeta SMT32F407 para realizar el control PI, dado que en caso de estar inhabilitado el motor DC se puede embalar.
- Se recomienda que, para futuros proyectos se modifique la programación de la tarjeta STM32F407 para realizar control secundario de frecuencia utilizando la función de potencia activa calculada en el vatímetro.
- Para el uso del vatímetro se recomienda mantener conectadas las tres fases de voltaje y el neutro para su funcionamiento, además, es necesario reiniciar el vatímetro a través del botón ubicado en la parte izquierda para el registro de datos.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Fraile, *Máquinas Eléctricas*, Quinta. España: McGraw-Hill Inc, 2003.
- [2] S. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, Quinta. New York: McGraw-Hill Inc, 2012.
- [3] M. P. Gavilema Chaquina y J. L. Sanunga Cando, «Diseño y construcción de un sistema automático de regulación de velocidad del grupo Motor DC-Generador síncrono de 10 ho del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia», Ing. tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2021.
- [4] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [5] J. Soto, «Simulación del control Potencia-Frecuencia en un Sistema Eléctrico de Potencia en Matlab», Escuela Técnica Superior de Ingeniería Sevilla, España, Sevilla, 2016.
- [6] R. W. Fransiska, E. M. P. Septia, W. K. Vessabhu, W. Frans, y W. Abednego, «Electrical power measurement using arduino uno microcontroller and labview», en *2013 3rd international conference on instrumentation, communications, information technology and biomedical engineering (ICICI-BME)*, IEEE, 2013, pp. 226-229.
- [7] U. B. Mujumdar y J. S. Joshi, «Microcontroller based true RMS current measurement under harmonic conditions», en *2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, IEEE, 2010, pp. 1-5.
- [8] M. Rashid, *Power Electronics*, First. Florida: Academic Press, 2001.
- [9] N. Mohan, T. Undeland, y W. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications and Design*, Third. United States: Jonh Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [10] A. P. Godse y D. A. Godse, *Microcontrollers*. Technical Publications, 2020.
- [11] G. Brown, «Discovering the STM32 microcontroller», *Cortex*, vol. 3, n.º 34, p. 64, 2012.
- [12] Y. A. Badamasi, «The working principle of an Arduino», en *2014 11th international conference on electronics, computer and computation (ICECCO)*, IEEE, 2014, pp. 1-4.

- [13] M. S. A. Alvarado, «Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura», *Lat Am J Phys Educ Vol*, vol. 6, n.º 1, p. 155, 2012.
- [14] M. S. Romero Granda, «Modelo de reguladores de velocidad y turbinas implementados en el grupo motor generador del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia», Ing. tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, D.M, 2023.

## 5 ANEXOS

### Pruebas para características estáticas del grupo motor-generador

Prueba de Vacío		P. de Decaimiento		Conexión de Carga		Rechazo de Carga	
Tiempo	w [rpm]	Tiempo	w [rpm]	Tiempo	w [rpm]	Tiempo	w [rpm]
40	1200	30	0	40	1200	40	1200
39	1200	29	0	39	1200	39	1200
38	1200	28	0	38	1200	38	1200
37	1200	27	0	37	1200	37	1200
36	1200	26	0	36	1200	36	1200
35	1199,8	25	0	35	1200	35	1200
34	1200	24	52,8	34	1200	34	1200
33	1200	23	121,2	33	1200	33	1200
32	1200,2	22	190,2	32	1200	32	1200
31	1199,6	21	258,6	31	1200	31	1199,8
30	1199,8	20	326,4	30	1199,8	30	1199,8
29	1200	19	400,8	29	1200	29	1200
28	1200	18	477,6	28	1200,2	28	1200,2
27	1200	17	552	27	1200	27	1200
26	1199,8	16	631,8	26	1200	26	1199,8
25	1200	15	712,2	25	1200	25	1199,8
24	1200,2	14	795,6	24	1199,8	24	1200
23	1200	13	879,6	23	1200	23	1199,8
22	1200,2	12	963,6	22	1200	22	1200,2
21	1199,8	11	1051,2	21	1199,8	21	1200,2
20	1200	10	1140	20	1199,8	20	1200
19	1200	9	1200	19	1200	19	1199,4
18	1200,2	8	1200	18	1200	18	1199,6
17	1200	7	1199,8	17	1200	17	1199,4
16	1200	6	1199,9	16	1200,6	16	1200
15	1200,2	5	1200	15	1200,8	15	1201,8
14	1200	4	1200,1	14	1201	14	1203
13	1199,8	3	1200,4	13	1201,2	13	1206,6
12	1200	2	1200,2	12	1200,6	12	1209,6
11	1199,4	1	1200,1	11	1199,8	11	1213,2
10	1198,8	0	1200	10	1198,2	10	1220,4
9	1186,2			9	1195,8	9	1226,4
8	1168,8			8	1191	8	1231,8
7	1143,6			7	1182	7	1239,6
6	1100,4			6	1160,4	6	1249,2
5	1023			5	1134,6	5	1258,2
4	883,8			4	1116	4	1261,8
3	631,2			3	1125	3	1254
2	225,6			2	1200	2	1221,6
1	13,2			1	1200	1	1200

## Prueba estatismo

Estatismo	
Frecuencia [Hz]	Potencia [W]
70,1	30,33
69	2200,49
66	2240,25
60	2275,66
60	2272,51
60	2258,88
60	2262,27
60	2255,55
59,9	2256,48
60	2261,3
60	2237,5
60	2257,13
59,9	2273,79
60	2269,73
59,9	2290,85
60	2284,46
60	2285,7
60	2274,9
60	2273,2
60	2275,48
60	2270,38
60	2265,75
60	2272,29
59,9	2279,62
59,9	2277,24
60	2274,15
59,9	2273,08
59,9	2279,81
59,9	2320,42
59,8	2315,39
59,9	2324,73
60,1	2347,03
60,2	2336,74
60	2330,59
60	2311,8
60	2319,98
59,9	2314,28
60	2307,17
59,9	2309,01
59,9	2310,25
59,9	2278,66
59,9	2277,66

## Pruebas para características dinámicas del grupo motor- generador

Pasos de conexión de carga					
Paso 1 de carga		Paso 2 de carga		Paso 3 de carga	
Tiempo [s]	w [rpm]	Tiempo [s]	w [rpm]	Tiempo [s]	w [rpm]
35	1200	68	1200	102	1200
34	1199,8	67	1200	101	1199,8
33	1200,2	66	1200	100	1200
32	1200,2	65	1200,2	99	1200,2
31	1200	64	1200,2	98	1200,4
30	1200	63	1199,8	97	1200,2
29	1199,8	62	1200	96	1200
28	1200	61	1200	95	1199,8
27	1200	60	1200	94	1199,8
26	1199,8	59	1200,2	93	1199,6
25	1200	58	1200	92	1199,8
24	1200,2	57	1199,8	91	1200
23	1200,4	56	1199,8	90	1200
22	1200,2	55	1200	89	1200
21	1200	54	1200,2	88	1199,8
20	1199,8	53	1199,8	87	1199,8
19	1199,6	52	1200	86	1199,8
18	1199,2	51	1200	85	1200
17	1199	50	1200	84	1200
16	1197	49	1199,8	83	1200
15	1185,6	48	1198,6	82	1200
14	1171,2	47	1197,4	81	1200
13	1149,6	46	1197	80	1199,8
12	1194	45	1192,2	79	1199,8
11	1200	44	1189,2	78	1199,4
10	1200	43	1185,6	77	1198,2
9	1200,4	42	1174,2	76	1194,6
8	1200,6	41	1162,2	75	1192,2
7	1200,4	40	1146	74	1188
6	1200,2	39	1132,8	73	1181,4
5	1200,2	38	1126,2	72	1178,4
4	1199,8	37	1141,2	71	1172,4
3	1199,8	36	1177,8	70	1171,8
2	1199,8	35	1200	69	1200
1	1199,8			68	1200
0	1199,8				

Pasos desconexión de carga					
Desconexión paso 1		Desconexión paso 2		Desconexión paso 3	
Tiempo [s]	w [rpm]	Tiempo [s]	w [rpm]	Tiempo [s]	w [rpm]
142	1200	169	1200	190	1200
141	1200	168	1200,2	189	1200
140	1199,8	167	1200	188	1200
139	1199,8	166	1200,2	187	1200
138	1200	165	1200,4	186	1200
137	1200,2	164	1200,2	185	1200
136	1200	163	1200	184	1200
135	1200,2	162	1200	183	1200
134	1200,4	161	1199,8	182	1200
133	1200,6	160	1200	181	1200
132	1201,8	159	1200	180	1200,2
131	1204,2	158	1199,8	179	1200,2
130	1206,6	157	1199,8	178	1200
129	1210,8	156	1199,8	177	1200,4
128	1215	155	1200	176	1201,8
127	1220,4	154	1204,8	175	1206
126	1226,4	153	1209,6	174	1215
125	1230	152	1218	173	1225
124	1225,2	151	1225,2	172	1222
123	1200,2	150	1236	171	1200
122	1200	149	1249,2	170	1200
121	1200	148	1260,6	169	1200
		147	1269		
		146	1273,2		
		145	1266,6		
		144	1234,8		
		143	1206,6		
		142	1200		



## Prueba banda muerta

Prueba banda muerta								
Tiempo [s]	Frecuencia [Hz]	Potencia [W]	Tiempo [s]	Frecuencia [Hz]	Potencia [W]	Tiempo [s]	Frecuencia [Hz]	Potencia [W]
107	59,8	265,08	64	60,1	167,64	21	60	198,5
106	60	264,86	63	60,2	180,7	20	60	200,62
105	60	263,89	62	60	184,34	19	60	199,83
104	60	268,81	61	60	164,86	18	60	201,07
103	60	268,52	60	60	167,55	17	60	204,42
102	59,9	268,43	59	60	154,31	16	60	206,09
101	60	277,22	58	60	152,83	15	60	205,58
100	60	277,12	57	59,9	153,33	14	60	204,15
99	59,9	270,91	56	60	154,07	13	59,9	200,12
98	59,9	256,39	55	60	161,85	12	60	206,9
97	59,9	259,75	54	60	168,25	11	60	213,47
96	59,9	258,06	53	59,9	167,67	10	60	215,21
95	59,9	258,83	52	59,9	165,36	9	59,9	208,98
94	60	259,6	51	59,8	169,92	8	59,9	213,63
93	60	265,44	50	59,8	173,61	7	59,9	205,85
92	60,2	272,62	49	60	191,48	6	60	212,8
91	60,2	257,99	48	60	189,37	5	60	215,61
90	60,3	261,12	47	60	196,76	4	60	219,03
89	60,4	257,69	46	59,9	192,44	3	59,9	217,05
88	60,5	257,41	45	59,9	189,46	2	60	217,25
87	60,3	277,89	44	59,8	183,7	1	59,9	211,72
86	59,9	262,02	43	59,9	182,16	0	59,9	201,55
85	59,7	292,21	42	59,9	192,4			
84	59,3	294,06	41	60,1	188,35			
83	58,9	302,48	40	59,8	192,27			
82	58,3	290,16	39	59,9	186,93			
81	57,5	286,49	38	60	199,2			
80	56,6	268,45	37	60	209,86			
79	56	253,86	36	60,1	212,15			
78	54,9	254,46	35	60	208,23			
77	54,5	265,09	34	60,1	201,94			
76	55,5	192,1	33	60,3	203,54			
75	57,2	184,91	32	60,1	201,94			
74	59,8	175,28	31	60,3	210,14			
73	60	154,58	30	60,3	211,2			
72	60	155,18	29	60,4	218,98			
71	60,1	164,41	28	60,1	212,38			
70	60,2	178,76	27	60	211,15			
69	60,1	155,81	26	60	200,47			
68	60,1	170,21	25	60	198,72			
67	60,2	181,84	24	60	201,64			

