

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD DEL GRUPO MOTOR DC- GENERADOR SINCRÓNICO DE 10 HP DEL LABORATORIO FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

MARCO PATRICIO GAVILEMA CHAQUINGA

JORGE LUIS SANUNGA CANDO

DIRECTOR: JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph. D.

Quito, Octubre 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marco Patricio Gavilema Chaquina y Jorge Luis Sanunga Cando, bajo mi supervisión.

Jesús Amado Játiva Ibarra, Ph. D.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Marco Patricio Gavilema Chaquina y Jorge Luis Sanunga Cando, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejamos constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Marco Patricio Gavilema Chaquina

Jorge Luis Sanunga Cando

DEDICATORIA

A mi madre Marieta, por su cariño, paciencia y apoyo incondicional, quien con su ejemplo de esfuerzo y trabajo incansable me ha llevado a alcanzar mis metas y sueños; siendo sus consejos y los valores que me inculco, los que dirigen hoy mi camino.

A Diana mi esposa quien me brinda el soporte moral y sentimental durante la presente etapa de nuestra vida juntos y a Sarahi la alegría de la casa y motivo para superarme cada día.

A la memoria de mi abuelita, mamita Presentación quien en vida y hoy desde el cielo me brinda su cobijo y cuidado eterno.

Marco Patricio Gavilema Chaquinga

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento más grande y sincero a mi madre Marieta, mi esposa Diana y Sarahi, las mujeres de mi vida que han sido fuente de apoyo e inspiración en todo momento.

A los amigos que a lo largo del vivir me han acompañado en buenos y malos momentos, en especial a Jorge compañero incondicional en todo momento y con quien logramos finalizar esta etapa de vida estudiantil.

A la Escuela Politécnica Nacional por ser el mejor sitio de formación académica y profesional que pude elegir, y a sus profesores que han formado parte del camino de aprendizaje.

Un profundo agradecimiento al Dr. Jesús Játiva por su acompañamiento y guía a lo largo de la realización del presente proyecto de titulación.

Marco Patricio Gavilema Chaquinga

DEDICATORIA

A mi hija Paula Isabella, “preciosa de papa” mi inspiración a cumplir el objetivo y lograr mi meta, gracias a su carisma y ocurrencia se ha ganado los corazones de sus tíos, tías y su mamita María.

Dedicado en especial a mi padre Luis Enrique (+), que con su apoyo en la tierra me brindo los mejores valores de ética, responsabilidad, impregnar su frase “siempre para adelante” y enseñarme que a pesar de las circunstancias a no darme por vencido ante una situación adversa.

A mi madre María, por ser el apoyo en los tiempos más difíciles y llevar las riendas de la familia de la forma más correcta posible.

A Ian Nicolas, David y Camilito mis campeones, sobrinos que son como mis hijos.

Jorge Luis Sanunga Cando

AGRADECIMIENTO

A Dios, por proteger a mi familia ante las adversidades que en el transcurso de la vida hemos debido batallar.

A mi madre, María por su paciencia y apoyo en mi vida personal y estudiantil, por sentir su apoyo a pesar de cometer muchos errores en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos y hermanas Daysi, Diana, Édison y Juan, por haber juntos aprendido el sacrificio y el trabajo que tuvimos que realizar para llegar a lograr metas y cumplir objetivos.

A mis primos Walter y Carlos, por apoyarnos en los momentos más difíciles.

A Marco e Iván compañeros de aula y amigos de la vida, que gracias a su apoyo y conocimiento permitieron que pueda superar obstáculos presentes en mi camino.

A Stalin, Gabriel, Jhonatan y Cristian mis hermanos que con sus consejos en los momentos correctos permitieron que luche, camine hacia mi objetivo y cumpla mi meta, especialmente a Gabriel responsable de haber ingresado a la Escuela Politécnica Nacional y a su padre Don Fernando por su humildad y haber creído en mí.

A mi más querido amigo de la infancia Patricio Chimbo, que me enseñó que “el ser pobre de dinero, no te hace pobre de inteligencia”, por todas las travesuras y aventuras que tuvimos en la infancia muchas gracias amigo.

A la Escuela Politécnica Nacional por haberme permitido ser parte de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Finalmente, al PhD. Jesús Játiva, por su apoyo académico tanto en la materia de SEP como en el proyecto de titulación que con su guía hemos podido llegar a culminar el presente proyecto.

Jorge Luis Sanunga Cando

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 ALCANCE.....	2
1.3 MARCO TEÓRICO.....	3
1.3.1 SISTEMAS DE CONTROL DE GENERADORES SINCRÓNICOS.....	3
1.3.1.1 Control de velocidad (GOV)	3
1.3.1.1.1 <i>Regulación de velocidad en turbinas hidráulicas</i>	4
1.3.1.1.2 <i>Regulación de velocidad en turbinas a vapor</i>	4
1.3.1.1.3 <i>Control de voltaje (AVR)</i>	5
1.3.1.2 Control de Oscilaciones (PSS).....	6
1.3.2 REGULACIÓN DE VELOCIDAD EN GENERADORES SINCRÓNICOS..	6
1.3.2.1 Operación aislada.....	7
1.3.2.2 Operación en paralelo.....	7
1.3.2.3 Regulación primaria de frecuencia.....	8
1.3.2.4 Regulación secundaria de frecuencia	10
1.3.3 DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	10
1.3.3.1 Fuentes de suministro, transformadores, líneas de transmisión, cargas y sistema SCADA.....	11
1.3.3.2 Grupo motor DC - generador sincrónico	19
1.3.3.2.1 <i>Motor de corriente continua</i>	19
1.3.3.2.2 <i>Generador sincrónico</i>	20

1.3.4	SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA.....	22
1.3.4.1	Método de control en la armadura	22
1.3.4.1.1	<i>Regulación de voltaje de alimentación</i>	22
1.3.4.1.2	<i>Inserción de resistencias externas</i>	22
1.3.4.2	Método de control en el campo.....	23
1.3.5	CONVERSORES AC-DC	24
1.3.5.1	Rectificadores trifásicos controlados.....	24
1.3.5.1.1	<i>Rectificador trifásico controlado de tres pulsos</i>	24
1.3.5.1.2	<i>Rectificador trifásico controlado de seis pulsos</i>	24
1.3.5.1.2.1	<i>Análisis de conducción continua</i>	28
1.3.5.1.2.2	<i>Características de voltaje</i>	30
1.3.5.1.2.3	<i>Potencia de un rectificador de seis pulsos</i>	32
1.3.5.1.2.4	<i>Cruce por cero</i>	33
1.3.5.1.2.5	<i>Rectificador trifásico controlado de doce pulsos</i>	34
1.3.6	MICROCONTROLADORES.....	34
1.3.6.1	Tipos de microcontroladores.....	35
1.3.6.1.1	<i>Arduino</i>	35
1.3.6.1.2	<i>Atmega</i>	35
1.3.6.1.3	<i>STM</i>	35
1.3.7	MODELOS DE TURBINAS A SIMULARSE EN EL LABORATORIO FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	36
1.3.7.1	Modelo hidráulico.....	36
1.3.7.2	Modelo térmico	40
1.3.7.2.1	<i>Modelo térmico a vapor</i>	40
1.3.7.2.2	<i>Modelo térmico a gas</i>	41
2.	DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE REGULADOR DE VELOCIDAD	42
2.1	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	42
2.1.1	MOTOR COMPOUND.....	42
2.1.2	TARJETA CON MICROCONTROLADOR STM32	43
2.1.2.1	Características	43
2.2	DISEÑO DE HARDWARE	45
2.2.1	ETAPA DE CONTROL.....	45
2.2.1.1	Circuito de disparo de tiristores.....	45

2.2.1.2	Sensor de voltaje	47
2.2.1.3	Sensor de corriente.....	48
2.2.1.4	Encoder rotativo incremental	50
2.2.1.5	Pantalla Nextion.....	51
2.2.2	ETAPA DE POTENCIA	52
2.2.2.1	Campo	52
2.2.2.1.1	<i>Rectificador AC/DC no controlado</i>	52
2.2.2.1.1.1	<i>Generalidades</i>	52
2.2.2.1.1.2	<i>Especificaciones Técnicas</i>	53
2.2.2.2	Armadura	53
2.2.2.2.1	<i>Rectificador AC/DC controlado</i>	53
2.2.2.2.1.1	<i>Generalidades</i>	54
2.2.2.2.1.2	<i>Especificaciones Técnicas</i>	55
2.2.3	DISEÑO DE SOFTWARE	55
2.2.3.1	Software de control	55
2.2.3.1.1	<i>Funciones de control PI</i>	57
2.2.3.1.2	<i>Característica hidráulica</i>	57
2.2.3.1.2.1	<i>Sintonización</i>	58
2.2.3.1.3	<i>Característica térmica a Vapor</i>	59
2.2.3.1.3.1	<i>Sintonización</i>	60
2.2.3.1.4	<i>Característica térmica a Gas</i>	61
2.2.3.1.4.1	<i>Sintonización</i>	61
2.2.3.2	Software de medición	62
2.2.3.2.1	<i>Medición de velocidad angular</i>	62
2.2.3.2.2	<i>Medición de voltaje</i>	65
2.2.3.2.3	<i>Medición de corriente</i>	66
2.2.3.3	Limitadores y protecciones	69
2.2.3.3.1	<i>Sobrevoltaje</i>	69
2.2.3.3.2	<i>Sobrecorriente</i>	70
2.2.3.3.3	<i>Campo</i>	72
2.2.3.3.4	<i>Fase</i>	72
2.2.3.4	Interfaz gráfica	73
2.2.3.5	Adquisición de datos.....	73
2.2.4	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD.....	74

2.2.4.1	Elementos constitutivos de la etapa de control	75
2.2.4.1.1	<i>Circuito de disparo de tiristores</i>	75
2.2.4.1.2	<i>Circuito para tarjeta de control STM32</i>	76
2.2.4.1.3	<i>Sensor de voltaje</i>	77
2.2.4.1.4	<i>Sensor de corriente</i>	78
2.2.4.1.5	<i>Encoder rotativo incremental</i>	78
2.2.4.1.6	<i>Interfaz gráfica</i>	80
2.2.4.2	Elementos constitutivos de la etapa de potencia	81
2.2.4.2.1	<i>Rectificador AC/DC no controlado (Campo)</i>	81
2.2.4.2.2	<i>Rectificador AC/DC controlado (Armadura)</i>	81
2.2.4.3	Construcción del módulo para el GOV	82
3.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	85
3.1	REGULACIÓN DE VELOCIDAD CON TURBINA HIDRÁULICA	85
3.1.1	PRUEBA EN VACÍO	86
3.1.2	PRUEBA CON PASOS DE CARGA	86
3.1.3	PRUEBA DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN ABRUPTA DE CARGA	88
3.1.3.1	Desconexión abrupta de carga	89
3.1.3.2	Conexión abrupta de carga	90
3.1.4	FUNCIONAMIENTO EN PARALELO	90
3.1.5	SALIDA DE PARALELISMO	91
3.1.6	PARÁMETROS DINÁMICOS DEL GRUPO MOTOR - GENERADOR CON LA TURBINA HIDRÁULICA	92
3.1.6.1	Rechazo de carga	92
3.1.6.2	Decaimiento de la velocidad	95
3.2	REGULACIÓN DE VELOCIDAD CON TURBINA TÉRMICA A VAPOR	96
3.2.1	PRUEBA EN VACÍO	97
3.2.2	PRUEBA CON PASOS DE CARGA	97
3.2.3	PRUEBA DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN ABRUPTA DE CARGA	98
3.2.3.1	Desconexión abrupta de carga	99
3.2.3.2	Conexión abrupta de carga	99
3.2.4	FUNCIONAMIENTO EN PARALELO	100
3.2.5	SALIDA DE PARALELISMO	101
3.2.6	PARÁMETROS DINÁMICOS DEL GRUPO MOTOR - GENERADOR CON LA TURBINA TÉRMICA A VAPOR	102
3.2.6.1	Rechazo de carga	102

3.2.6.2	Decaimiento de la velocidad	104
3.3	REGULACIÓN DE VELOCIDAD CON TURBINA TÉRMICA A GAS.....	106
3.3.1	PRUEBA EN VACÍO.....	106
3.3.2	PRUEBA CON PASOS DE CARGA.....	107
3.3.3	PRUEBA DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN ABRUPTA DE CARGA	107
3.3.3.1	Desconexión abrupta de carga	108
3.3.3.2	Conexión abrupta de carga.....	108
3.3.4	FUNCIONAMIENTO EN PARALELO	109
3.3.5	SALIDA DE PARALELISMO	110
3.3.6	PARÁMETROS DINÁMICOS DEL GRUPO MOTOR - GENERADOR CON LA TURBINA TÉRMICA A GAS	111
3.3.6.1	Rechazo de carga.....	111
3.3.6.2	Decaimiento de la velocidad	112
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114
4.1	CONCLUSIONES.....	114
4.2	RECOMENDACIONES	115
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
	ANEXOS	121

RESUMEN

El objetivo principal del proyecto es el diseño, construcción y puesta en funcionamiento del módulo regulador de velocidad GOV, en lo correspondiente a hardware y software. El regulador automático de velocidad es un conjunto de componentes eléctricos y electrónicos que controlan el voltaje de alimentación de la armadura, para la máquina motriz de la cual se desea regular la velocidad angular de giro.

El regulador de velocidad cuenta con dos etapas en su funcionamiento, la etapa de control que realiza el ajuste del voltaje de armadura y la etapa de potencia que está formada por los rectificadores de campo y armadura que alimentan la máquina motriz.

La etapa de control utiliza un controlador tipo PI para la tarjeta microcontroladora STM32F407, la cual realiza las tareas relacionadas con la medición de la velocidad mediante encoder, regulación del voltaje de armadura, limitadores de voltaje, corriente y protecciones.

La etapa de potencia está compuesta por el rectificador trifásico controlado que alimenta la armadura y el rectificador no controlado bifásico que conecta el campo del motor.

El módulo GOV cuenta con una interfaz gráfica que permite la elección del modo de simulación para la turbina hidráulica, vapor y gas. La interfaz permite visualizar los datos de velocidad, voltaje y corriente de armadura de la máquina motriz, además muestra el estado de las protecciones del GOV.

Las pruebas para verificar el funcionamiento del GOV son: encendido, apagado del grupo motor-generator, conexión del módulo de carga, puesta en paralelo con la red de EEQ y el generador fotovoltaico.

PALABRAS CLAVE: GOV, Regulación de frecuencia, Grupo motor-generator, Controlador PI, Rectificador trifásico controlado, Función de transferencia.

ABSTRACT

The main objective of the project is the design, construction and commissioning of the GOV speed regulator module, in terms of hardware and software. The automatic speed regulator is a set of electrical and electronic components that control the supply voltage of the armature, for the motor machine that wants to regulate the angular speed of rotation.

The speed regulator has two stages in its operation, the control stage that adjusts the armature voltage and the power stage that is made up of the field and armature rectifiers that feed the prime mover.

The control stage uses a PI type controller for the STM32F407 microcontroller card, which performs the tasks related to speed measurement by encoder, armature voltage regulation, voltage limiters, current and protections.

The power stage is composed of the controlled three-phase rectifier that feeds the armature and the two-phase uncontrolled rectifier that connects the motor field.

The GOV module has a graphical interface that allows the choice of the simulation mode for the hydro, steam and gas turbine. The interface allows to visualize the speed, voltage and armature current data of the motor machine, also shows the status of the GOV protections.

The tests to verify the operation of the GOV are: switch-on, switch-off of the motor-generator set, connection of the load module, parallel with the EEQ grid and the photovoltaic generator.

KEYWORDS: GOV, Frequency regulation, Motor-generator group, PI controller, Controlled three-phase rectifier, Transfer function.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos en condiciones normales de funcionamiento cuentan con generadores que se encuentran girando en sincronismo y juntos generan la potencia demandada por la carga conectada al sistema. Debido a que la potencia eléctrica no puede ser almacenada en grandes cantidades, cuando la potencia consumida por las cargas varía, y ya que la potencia mecánica aportada por las turbinas permanece constante, la variación de demanda solo puede obtenerse de la energía cinética almacenada, lo que supone cambiar la velocidad de giro de los generadores y la variación de frecuencia eléctrica del sistema. Como la demanda está cambiando continuamente se requiere un sistema de control que ajuste automáticamente la potencia generada buscando mantener la frecuencia dentro de los límites permisibles.

El Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia requiere la construcción de un sistema eléctrico a escala con todos los componentes necesarios que se presentan en la realidad. La máquina motriz es la encargada de suministrar la energía mecánica que se convertirá en potencia eléctrica inyectada al sistema, la cual debe satisfacer los niveles de operación constante de frecuencia que requiere el SEP.

Es indispensable la presencia de un sistema de regulación automático de velocidad que actúe sobre la máquina motriz, para de este modo evitar variaciones de frecuencia con el cambio de la carga conectada al sistema de generación, y de este modo garantizar la operación del sistema dentro de condiciones normales de frecuencia. La confiabilidad del sistema aumentará mediante la implementación de un regulador automático de velocidad (GOV) con la capacidad de controlar el voltaje de alimentación inyectado hacia el bobinado de armadura de la máquina motriz de corriente continua.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

Diseñar y construir un regulador automático de velocidad mediante el uso de un convertidor controlado para el grupo motor DC – generador sincrónico de 10 hp del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Analizar los parámetros de operación del grupo motor-generator implementado en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia.
- Diseñar e implementar el circuito de potencia del sistema de alimentación para el campo del motor de corriente continua.
- Diseñar e implementar el circuito de potencia del sistema de alimentación para la armadura del motor de corriente continua.
- Diseñar y programar el sistema de control de velocidad en un microcontrolador STM32F407
- Realizar las pruebas de regulación de frecuencia ante variaciones de carga

1.2 ALCANCE

El presente trabajo está encaminado al diseño y construcción de un sistema automático de regulación de velocidad, por lo cual se diseñará e implementará un rectificador trifásico controlado, que alimentará la armadura del motor de corriente continua mediante tiristores de potencia, los cuales serán controlados desde un microprocesador. El regulador se encargará de controlar el voltaje de armadura y la velocidad del motor de corriente continua del grupo motor-generator del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia. El campo de la máquina motriz será alimentado mediante un puente rectificador no controlado que proveerá el nivel de voltaje y corriente necesarios para el correcto funcionamiento del motor de corriente continua. Se diseñará e implementará un rectificador trifásico controlado para el regulador de velocidad, el cual tendrá como objetivo la rectificación desde la red trifásica de corriente alterna, para obtener una fuente de corriente continua donde se podrá conectar la armadura del motor de corriente continua de 10 HP del grupo motor-generator. El voltaje de armadura será regulado por un microcontrolador que ajustará el ángulo de disparo de los tiristores de potencia; además, el microcontrolador se encargará de monitorear la velocidad, el voltaje y la corriente del grupo. Se construirá el prototipo de regulador de velocidad automático considerando especificaciones técnicas de los elementos constitutivos del grupo motor-generator. Finalmente, se realizarán las pruebas

necesarias para verificar el funcionamiento del control de velocidad del grupo motor – generador en condiciones de estado estable y transitorio.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 SISTEMAS DE CONTROL DE GENERADORES SINCRÓNICOS

Los sistemas de control de unidades de generación regulan las diferentes variables existentes dentro del sistema eléctrico, para que opere de manera segura y eficiente en estado estable de voltaje y frecuencia o en su defecto para que el sistema sea capaz de operar cuando existan variaciones a causa de perturbaciones propias del cambio en la demanda de potencia activa y reactiva dentro del sistema.

Aunque los sistemas de control cuentan con una gran variedad de tipos, se dará especial atención a los reguladores de velocidad GOV, de voltaje AVR y el estabilizador de sistemas de potencia PSS.

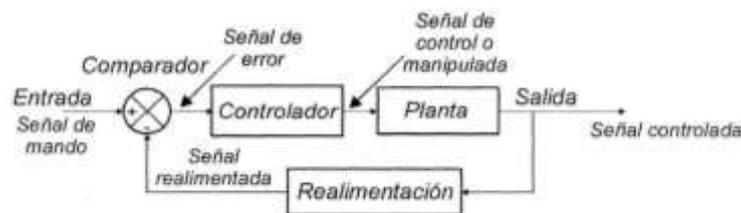


Figura 1.1. Diagrama de bloques sistema de control [33]

1.3.1.1 Control de velocidad (GOV)

El GOV regula la velocidad de rotación de la maquina motriz, mediante la determinación del error de velocidad entre la velocidad de giro y la velocidad sincrónica del generador; dicho error está estrechamente relacionado al cambio de balance de potencia activa de carga y potencia mecánica suministrada hacia el sistema. Los reguladores de velocidad típicamente presentan un valor de estatismo de estado estacionario o permanente de alrededor del 5%, lo cual determina que la velocidad varia un 5% y al mismo tiempo la posición de la compuerta cambia un 100%[1].

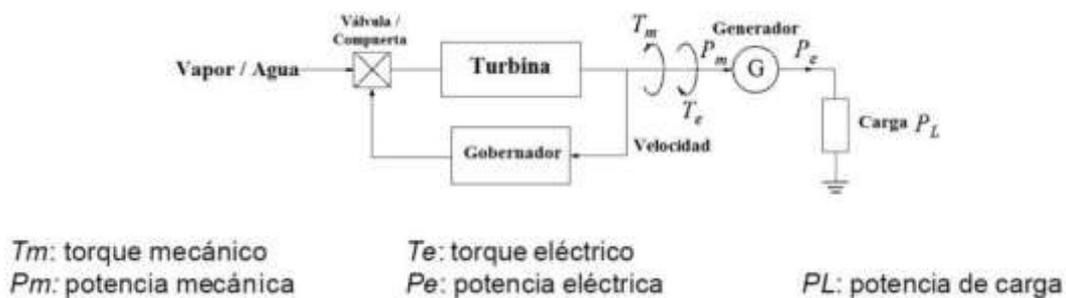


Figura 1.2. Diagrama de bloques GOV [31]

La regulación de velocidad es fundamental para mantener el control frecuencia – potencia activa en los sistemas de generación; además en las unidades de generación los modelos de control y sus parámetros propios dependen del tipo de turbina que se utilice como hidráulicas, térmicas, de ciclo combinado o a gas.

1.3.1.1.1 Regulación de velocidad en turbinas hidráulicas

En este tipo de sistemas su funcionamiento depende directamente de las características de la columna de agua que alimenta a la turbina, determinando los siguientes parámetros que influyen en su comportamiento como características propias de agua como la inercia, compresión del líquido y las características de la tubería de conducción, como la elasticidad de sus paredes.

1.3.1.1.2 Regulación de velocidad en turbinas a vapor

En los sistemas de vapor la energía acumulada en el líquido a alta temperatura se convierte en presión y posteriormente en energía rotativa, la misma que el generador transforma en energía eléctrica, el suministro de calor generalmente este dado por la quema de combustibles fósiles de distintos tipos. Los parámetros que caracterizan las unidades de generación térmica son, las condiciones propias del vapor, la cantidad de secciones con las que cuenta el sistema y el tamaño de la unidad de generación.

Los sistemas de control de velocidad presentan tres sistemas básicos de control: control velocidad–carga en condiciones de funcionamiento normal, sobrevelocidad y desconexión por sobrevelocidad. El regulador de velocidad actúa sobre las válvulas de vapor en su etapa de funcionamiento normal y sobre las válvulas principales, del recalentador y la caldera en condiciones de sobrevelocidad.

El valor del estatismo permanente es similar al de los sistemas de tipo hidráulico.

1.3.1.1.3 Control de voltaje (AVR)

El AVR es un elemento esencial dentro de la operación de un sistema eléctrico de potencia, el regulador automático de voltaje es un sistema electrónico que regula el voltaje de excitación en los generadores sincrónicos, actuando sobre el voltaje suministrado hacia el devanado de excitación del generador sincrónico, tomando en cuenta la magnitud de voltaje y corriente de generación, y en base a la diferencia entre los voltajes terminal y de referencia, regula el voltaje de alimentación del generador sincrónico mediante la variación del voltaje de control sobre el excitador. El sistema de regulación de voltaje es independiente de la demanda de potencia activa y reactiva del sistema, regulando de esta manera la corriente de excitación que ingresa al bobinado de campo del generador mediante la excitatriz del generador sincrónico.

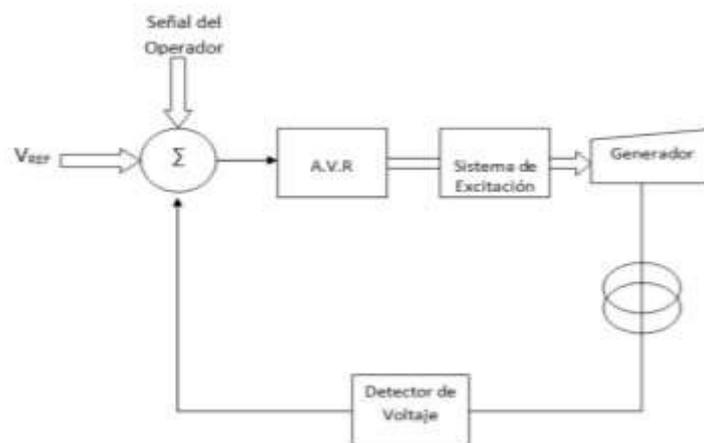


Figura 1.3. Diagrama de bloques AVR [32]

La utilización de elementos de electrónica de potencia y sistemas automáticos de control han hecho que los AVR presenten una gran variedad de funciones adicionales como:

- Arranque suave
- Limitador de subexcitación UEL y sobrexcitación OEL
- Limitador de corriente máxima del estator
- Limitador de flujo máximo V/Hz
- Control potencia reactiva y factor de potencia.
- Protección de sobre y bajo voltaje

- Estabilización del sistema de potencia
- Sincronización

1.3.1.2 Control de Oscilaciones (PSS)

La función principal del PSS es atenuar las oscilaciones electromecánicas del rotor del generador entre 0,1 y 2,5 Hz aproximadamente. El PSS genera una señal adicional de entrada para el AVR, produciendo una componente de torque electromecánico que se opone a la dinámica mecánica, para amortiguar las oscilaciones el PSS debe compensar la diferencia de fase entre la alimentación del sistema de excitación y el torque eléctrico del generador. Las señales de entrada del PSS generalmente son la velocidad del eje, frecuencia de generación y la potencia activa de carga.

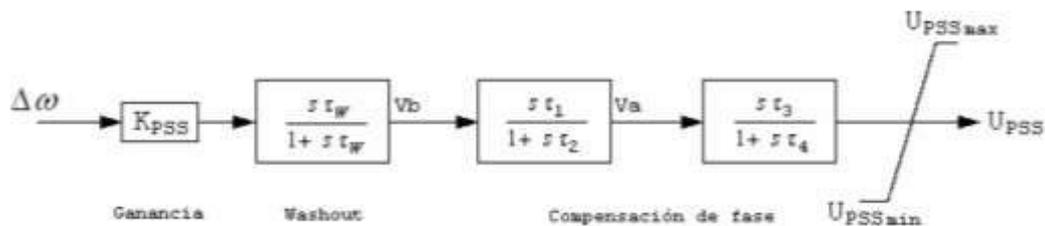


Figura 1.4. Diagrama de bloques PSS [34]

1.3.2 REGULACIÓN DE VELOCIDAD EN GENERADORES SINCRÓNICOS

La velocidad de rotación del generador está directamente relacionada con el valor de la frecuencia de un sistema eléctrico, por lo tanto, está directamente relacionada con el balance de potencia activa dentro del sistema. Cuando existe un cambio en el flujo de potencia activa, la velocidad y frecuencia del sistema se ven afectadas y presentan cambios en sus valores de operación.

Para la operación adecuada de los sistemas eléctricos se debe regular la frecuencia de operación mediante procesos técnicos fundamentados en teoría de control, los mismos que deben ser lo suficientemente exactos y eficientes. Las frecuencias de operación en sistemas eléctricos alrededor del mundo son 50 y 60 Hz, y la importancia de su control es primordial dentro de las unidades de generación de los sistemas eléctricos.

Los principales efectos de una correcta regulación de frecuencia son: estabilidad de sistemas interconectados, facilidad de control, mantener velocidad de motores de inducción

y sincrónicos, mejorar la operación normal de generadores y turbinas, y permitir el correcto funcionamiento de equipos electrónicos de control en sincronismo con la red de alimentación.

Buscando el balance entre generación y demanda el análisis de regulación de frecuencia se divide en, operación aislada y áreas interconectadas, siempre tomando en cuenta la extensión del sistema eléctrico que será objeto de estudio.

1.3.2.1 Operación aislada

Para este tipo de funcionamiento el generador sincrónico alimenta solo las necesidades de potencia activa y reactiva que presenta la carga conectada al sistema eléctrico, por lo que el factor de potencia de operación depende también de la carga alimentada.

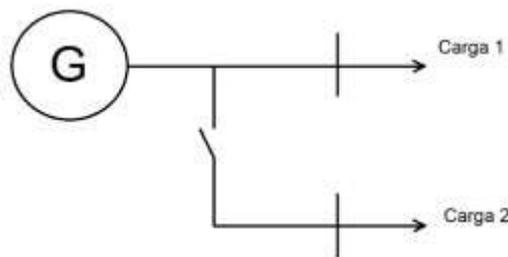


Figura 1.5. Generador en operación aislada

En este caso el regulador de velocidad de la fuente de energía mecánica permite regular la frecuencia del generador, mientras que el cambio de la corriente de excitación del generador regula el voltaje terminal del generador.

1.3.2.2 Operación en paralelo

La operación de generadores sincrónicos en paralelo se realiza para alimentar cargas más grandes que la que alimentaría una maquina aislada, además la confiabilidad del sistema aumenta debido a que una falla en uno de los generadores no afecta a la totalidad de la potencia de carga.

La ventaja de operar sistemas de generación en paralelo permite que una o varias unidades sean removidas por mantenimiento preventivo, correctivo o falla eléctrica.

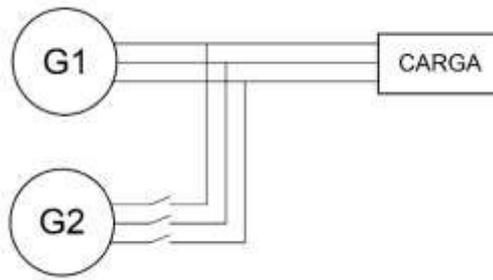


Figura 1.6. Generadores operando en paralelo

Si dos generadores operan en paralelo la repartición de la potencia activa que suministran las dos máquinas está controlada por los reguladores de velocidad de los generadores, en cambio el reparto de potencia reactiva está regulada por los sistemas de excitación de los generadores. Siempre teniendo en cuenta que los niveles de potencia activa y reactiva suministrados por los generadores únicamente están controladas por la carga eléctrica conectada.

Cuando se conecta un generador dentro de un sistema de potencia, debido al mayor tamaño del sistema eléctrico se considera que ninguna de las variaciones en el estado de operación de la unidad de generación que es objeto de análisis tendrá un efecto considerable en el sistema de potencia. Esta forma de análisis es llamado barra o bus infinito, el cuál debido a su robustez y tamaño hace que los valores voltaje y frecuencia de operación no varíen sin importar que cambien los niveles de potencia activa y reactiva que se ingrese o extraiga de la barra infinita. En estas circunstancias el regulador de velocidad controla la potencia activa entregada al sistema por parte del generador.

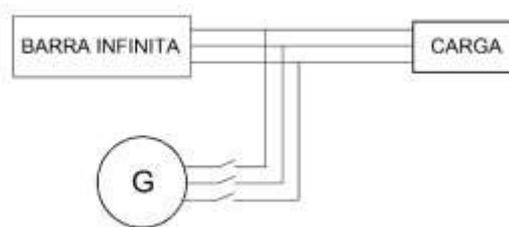


Figura 1.7. Generador conectado a una barra infinita

1.3.2.3 Regulación primaria de frecuencia

Se encarga de corregir el desbalance entre generación y demanda de manera automática, este tipo de regulación se realiza mediante la variación de la potencia de generación,

utilizando para este propósito los reguladores de velocidad (GOV) dentro de las turbinas de generación, para contrarrestar las variaciones de frecuencia dentro del sistema.

El conjunto turbina–generador determina el modelo del GOV, el cual unido a la función de transferencia del generador, constante de amortiguamiento y características adicionales del sistema conforman la regulación primaria de frecuencia.

Este tipo de control se ve limitado por la inercia propia de las unidades de generación y el margen de operación del sistema de control que se encuentra entre 2 y 20 segundos.

Para la regulación primaria de frecuencia, debido a que no existen interconexiones o áreas adicionales, el Control Automático de Generación AGC corrige la diferencia entre la frecuencia de generación y la frecuencia de referencia, enfocándose específicamente en corregir la desviación de frecuencia y restaurar su valor a la referencia luego de haber sido realizada la regulación primaria.

Para garantizar el funcionamiento estable y no oscilatorio de los generadores dentro de un SEP, los reguladores de velocidad de cada una de las unidades generadoras deben funcionar dependiente de la característica P-f en el sistema.

La regulación está dada por:

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1.1)$$

Donde, Δf y ΔP en p.u. en bases de la máquina.

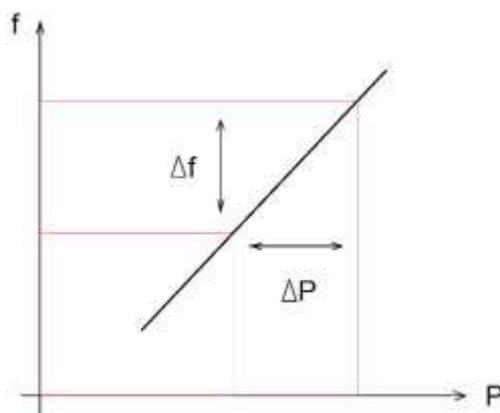


Figura 1.8. Regulación P-f

Se denomina estatismo permanente a la variación de frecuencia en p.u., que ocurre cuando el generador va del funcionamiento en vacío a plena carga.

$$\Delta P = P_n = 1,0 \text{ p. u.}$$

$$R_s = \frac{\Delta f}{1,0}$$

1.3.2.4 Regulación secundaria de frecuencia

La regulación secundaria actúa sobre el área de control tomando en cuenta el flujo de potencia activa y las frecuencias de operación de áreas vecinas, su margen de operación está entre 20 segundos y 2 minutos. La regulación secundaria regula de forma automática la generación de las unidades que hayan realizado su regulación primaria.

Por medio de un sistema de control la regulación secundaria actúa mediante el Control Automático de Generación AGC, cuyo objetivo es corregir la desviación entre la frecuencia de generación y la frecuencia de referencia, mediante el ajuste programado de flujos de potencia entre áreas vecinas.

Debido a la conexión existente entre varias áreas los cambios de cada área causan efectos sobre el sistema completo, involucrando el Error de Control de Área (ACE) expresado en MW, el mismo que determina los niveles de generación necesarios para que el sistema vuelva a los valores de frecuencia normal de operación y el intercambio entre las áreas vecinas.

Las áreas se representan con máquinas equivalentes conformadas por, turbina, regulador de velocidad y sus parámetros característicos como la constante de inercia y coeficiente de amortiguamiento.

1.3.3 DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

El sistema eléctrico de potencia a escala está formado por: módulos de simulación de centrales de generación, transformadores, autotransformadores, líneas de transmisión transpuesta y no transpuesta, módulo fotovoltaico, simulador eólico y centro de cargas residenciales, comerciales e industriales.

1.3.3.1 Fuentes de suministro, transformadores, líneas de transmisión, cargas y sistema SCADA

Transformador trifásico LTC

Transformador trifásico, permite el control de voltaje mediante el cambio de taps, varía la relación de transformación dando diversos niveles de voltaje en el primario como en el secundario del transformador.

Tabla 1.1. Características del transformador trifásico LTC

Potencia	5 kVA										
Voltaje primario	220 V										
Voltaje secundario	220 V										
Conexión	DYn5										
Taps primario	1	2	3	4	5						
	230	225	220	215	210						
Taps secundario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132



Figura 1.9. Transformador trifásico LTC

Transformador trifásico PST

Transformador trifásico de cambio de fase, permite el control del ángulo y modulo del voltaje mediante el cambio de taps, varia la relación de transformación dando diversos ángulos en el primario como en el secundario del transformador.

Tabla 1.2. Características del transformador trifásico PST

Potencia	5 kVA
Voltaje primario	220 V
Voltaje secundario	220 V
Conexión	DYn5
Taps primario	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 +5° +4° +3° +2° +1° 0° -1° -2° -3° -4° -5°
Taps secundario	1 2 3 4 5 +5° +2,5° 0° -2,5° -5°



Figura 1.10. Transformador trifásico PST

Transformador trifásico con servicios auxiliares

Transformador principal, permite el paso de la energía suministrada por el grupo motor-generador hacia las líneas de transmisión y cagas del SEP, este módulo además dispone de servicios auxiliares capaz de abastecer con una potencia de 2 kVA.

Tabla 1.3. Características del transformador trifásico con servicios auxiliares

Principal	
Potencia	10 kVA
Voltaje primario	220 V
Voltaje secundario	220 V
Taps	5
Servicios Auxiliares	
Potencia	2 kVA
Voltaje primario	220 V
Voltaje secundario	127 V



Figura 1.11. Transformador trifásico con servicios auxiliares

Transformadores en conexión delta abierto

Conformado por dos transformadores monofásicos con una capacidad individual de 2,5 kVA, el cual se encarga de abastecer de energía eléctrica al módulo de carga.

Tabla 1.4. Características del transformador en conexión delta abierto

Potencia	4,3 kVA
Voltaje primario	220 V

Voltaje secundario	220 V				
Taps primario	1	2	3	4	5
	210	215	220	225	230



Figura 1.12. Transformadores en conexión delta abierto

Autotransformador de tres devanados

El autotransformador de tres devanados permite establecer varios niveles de voltaje en el primario y dispone de una potencia de 5 kVA, el bobinado terciario del autotransformador fue diseñado en configuración delta con una potencia de 1 kVA.

Tabla 1.5. Características del autotransformador de tres devanados

Potencia primario	5 kVA
Voltaje primario	127 V
Potencia secundario	5 kVA

Voltaje secundario	220 V
Potencia terciario	1 kVA
Voltaje terciario	220 V
Conexión	YNynd1
Taps primario	1 2 3 4 5 230 225 220 215 211

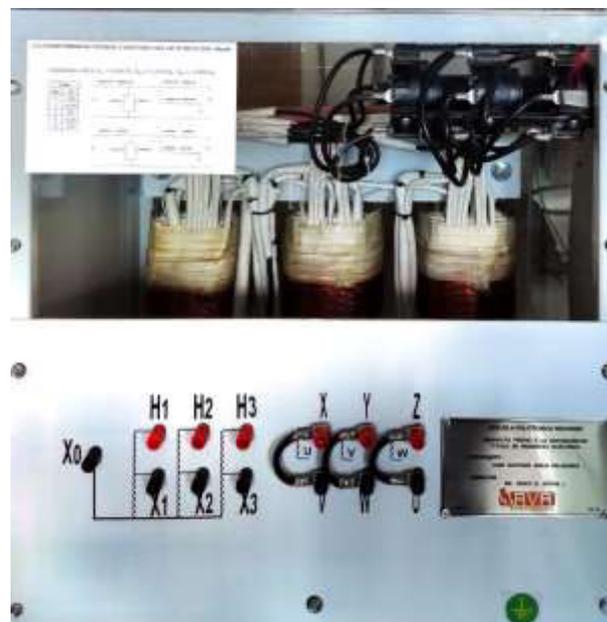


Figura 1.13. Autotransformador de tres devanados

Línea de transmisión no transpuesta

Línea de Transmisión (L/T) de doble circuito, modelo a escala de la L/T de 500 kV Coca Codo Sinclair – El Inga, considera la mitad de la longitud de la distancia real de la L/T.

Tabla 1.6. Características de la línea de transmisión no transpuesta

Bases reales	
V=500 kV	S=1000 MVA

Bases de laboratorio	
V=220 V	S=5 kVA
SIL	968,451 MW
Longitud	63 km



Figura 1.14. Línea de transmisión no transpuesta

Línea de transmisión transpuesta

Línea de Transmisión (L/T) de doble circuito, modelo a escala de la L/T de 500 kV, considera la mitad de longitud de la distancia real de la L/T Coca Codo Sinclair – El Inga.

Tabla 1.7. Características de la línea de transmisión transpuesta

Bases reales	
V=500 kV	S=1000 MVA
Bases de laboratorio	
V=220 V	S=5 kVA

SIL	968,451 MW
Longitud	63 km



Figura 1.15. Línea de transmisión transpuesta

Módulo de cargas

Módulo de cargas lineales y no lineales que permite el estudio de los sectores residenciales, comerciales e industriales y los efectos en las cargas frente a variaciones de voltaje y frecuencia en la red eléctrica.

Tabla 1.8. Elementos que conforman el módulo de carga

Cafetera	Calefactor	Lampara de mercurio
Aspiradora	Focos ahorradores	UPS (TV, radio, DVD, computador)
Aire acondicionado	Lámparas incandescentes	Focos led
Variador de velocidad	Calefactor	Lámparas fluorescentes
Refrigerador	Lampara de sodio	



Figura 1.16. Módulo de cargas

1.3.3.2 Grupo motor DC - generador sincrónico

Este grupo está formado por el motor de corriente continua que tiene la tarea de actuar como maquina motriz y simula el funcionamiento de una turbina en una central de generación eléctrica, el motor DC está acoplado mecánicamente mediante un matrimonio al generador sincrónico, el cual se encarga de producir energía eléctrica al momento que el motor inicia su movimiento de rotación, obteniendo de esta manera la transformación de energía mecánica en eléctrica [2].

1.3.3.2.1 Motor de corriente continua

La primera máquina que se utilizó en aplicaciones de potencia para transformar la energía eléctrica en energía mecánica rotativa fue el motor de corriente DC. Su funcionamiento está basado en la inyección de corriente continua, la cual se puede obtener mediante la

rectificación de corriente alterna o por generación de corriente continua que puede proceder de baterías o dinamos.

La función del motor de DC en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia es emular el comportamiento de una turbina, sea esta hidráulica o térmica, en la tabla mostrada a continuación se detalla sus características [2].

Tabla 1.9. Características del Motor DC [2]

Potencia [Hp]	10
Voltaje de Campo [V]	186
Voltaje de armadura [V]	130
Corriente nominal de campo [A]	5,15
Corriente nominal de armadura [A]	1,07
Tipo de conexión	Compuesto aditivo
Velocidad [rpm]	1200



Figura 1.17. Motor de corriente continua

1.3.3.2.2 *Generador sincrónico*

En las centrales de generación eléctrica los elementos esenciales para su funcionamiento son los generadores sincrónicos, donde se realiza el proceso de conversión de energía mecánica a energía eléctrica que se transmite a través de sus terminales hacia la carga.

Para iniciar su movimiento los generadores sincrónicos deben ser accionados por una turbina, ya sea para centrales hidroeléctricas, térmicas o mareomotrices, siendo la turbina un elemento fundamental para el funcionamiento de un generador.

El generador usado en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia que se encarga del abastecimiento de energía eléctrica tiene como características principales las mostradas en la siguiente tabla [2].

Tabla 1.10. Características del generador sincrónico [2]

Voltaje nominal	220 V
Corriente nominal	22,5 A
Potencia nominal	8,58 kVA
Frecuencia	60 Hz
Factor de potencia	0,87
Voltaje nominal de excitación	5 V
Corriente nominal de excitación en vacío	8,5 A
Corriente máxima de excitación	30 A

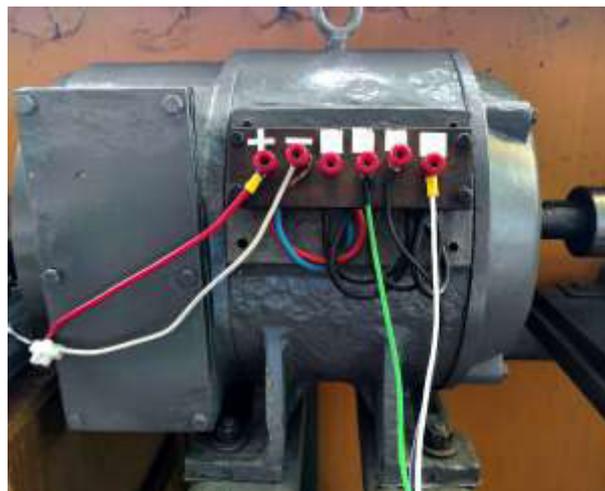


Figura 1.18. Generador sincrónico

1.3.4 SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

El sistema se basa en el control del voltaje y la corriente de los convertidores estáticos AC-DC, además el sistema debe ser capaz de controlar fallas permanentemente, tanto en software como en hardware.

Para el funcionamiento adecuado del control para el convertidor AC-DC, es necesaria la generación de pulsos en las compuertas de disparo de los tiristores, para lo cual se debe tener una correcta sintonización con la red eléctrica y de esta forma se obtiene un ángulo de disparo apropiado.

1.3.4.1 Método de control en la armadura

1.3.4.1.1 Regulación de voltaje de alimentación

Este es uno de los métodos más factibles y viables para ser utilizados, con el uso de elementos electrónicos de potencia (Rectificador AC/DC controlado) produciendo un voltaje constante en los terminales de la armadura y pudiendo variar el voltaje mediante controladores de ancho de pulso.

Este método tiene mayor ventaja ya que la caída de voltaje en la resistencia de armadura es muy pequeña y el cambio de voltaje con respecto a la velocidad son muy similares, por lo que la velocidad del motor se puede controlar mediante la variación de voltaje en las terminales de la armadura.

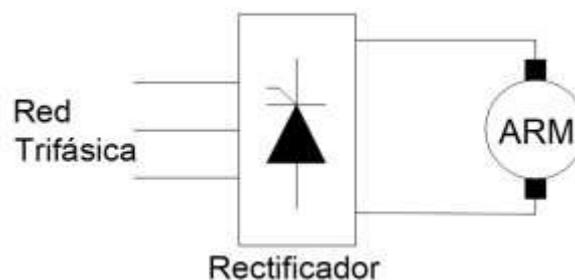


Figura 1.19. Control del voltaje de alimentación

1.3.4.1.2 Inserción de resistencias externas

El método contempla la inserción de una resistencia externa, y es muy común en el control de la velocidad para motores de excitación en serie, shunt y compuestos.

Para motores serie es muy aplicable ya que se puede obtener control a bajas velocidades y cargas ligeras.

En motores en derivación se puede alcanzar una mejor regulación cuando se trabaja con bajas velocidades.

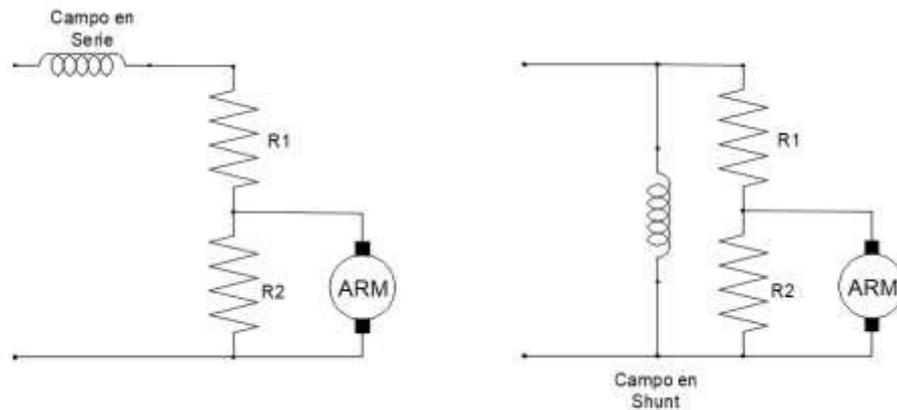


Figura 1.20. Control de devanado de armadura en serie y shunt respectivamente.

1.3.4.2 Método de control en el campo

Comúnmente se utiliza este tipo de control de velocidad cuando los devanados de campo excitados se encuentran separados o en derivación.

La corriente que se alimenta al campo es obtenida por medio de circuitos electrónicos de potencia (convertidores AC/DC), los cuales cambian con rapidez las corrientes de campo con respecto a la variación de las señales de control.[3]

El control a velocidades bajas y altas cargas es muy complicado y es un factor económico que limita su uso en motores de gran tamaño.

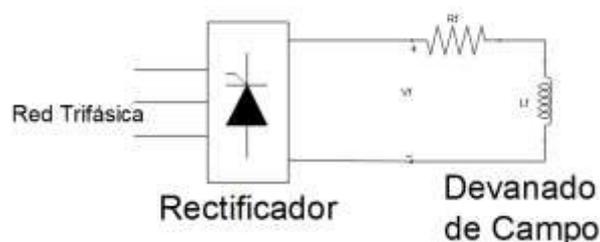


Figura 1.21. Control de devanado de campo.

1.3.5 CONVERSORES AC-DC

1.3.5.1 Rectificadores trifásicos controlados

El creciente uso de dispositivos electrónicos y máquinas eléctricas que basan su funcionamiento en el aprovechamiento de corriente continua ha hecho necesario el uso frecuente de circuitos de rectificación AC/DC.

Para su uso en la parte industrial donde frecuentemente se tiene redes trifásicas de energía se opta por la utilización de rectificadores trifásicos controlados, ya que estos tienen un rizado pequeño en la forma de onda y permiten la transmisión de grandes potencias a mayores cargas, en comparación con los rectificadores monofásicos.

1.3.5.1.1 Rectificador trifásico controlado de tres pulsos

Este tipo de rectificadores denominados de media onda no son usados con fines prácticos ya que las señales de alimentación tienen niveles de corriente continua, con alto grado de rizado.

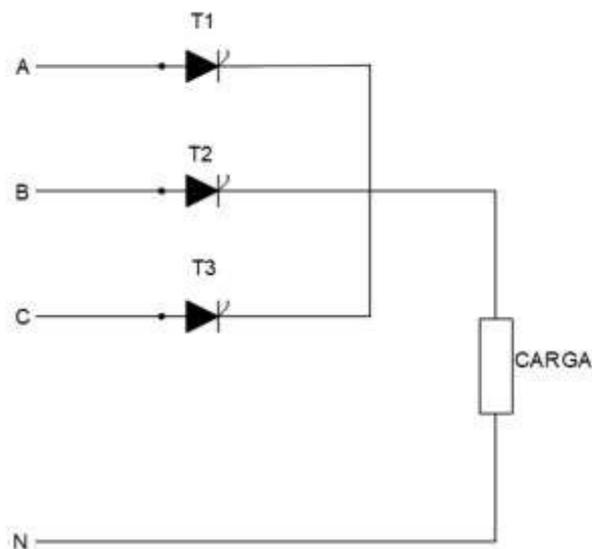


Figura 1.22. Rectificador trifásico controlado de tres pulsos

1.3.5.1.2 Rectificador trifásico controlado de seis pulsos

En la Figura 1.23. se muestra la tipología de un rectificador trifásico controlado de seis pulsos el cual se utiliza en motores alimentados con corriente continua o cargas de mayor demanda, su operación se determina en dos cuadrantes.

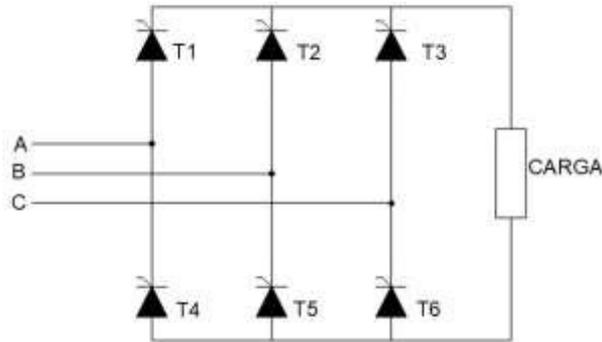


Figura 1.23. Rectificador trifásico controlado de seis pulsos.

La rectificación de la red trifásica en este conversor de seis pulsos de onda completa se realiza de la siguiente manera: el ramal que está compuesto por los tiristores T1 y T4 son los que rectifican la fase A, los tiristores del segundo ramal que está compuesto por los tiristores T2 y T4 rectifican la fase B y el ultimo ramal compuesto por los tiristores T3 y T6 rectifican la fase C.

La red trifásica de energía debe tener una secuencia positiva en este caso las fases se ordenan A, B y C. Cuando dos de estas fases se cruzan provocan una diferencia de potencial lo cual da como resultado que en este cruce se tenga un valor de cero voltios, denominando esta intersección como cruce por cero entre fases, desde el cual se toma la referencia para el ángulo de disparo.

El voltaje rectificado que se obtiene se mide con la polaridad, positivo en los cátodos de los tiristores T1, T2 y T3, mientras el terminal negativo se tiene en los ánodos de los tiristores T4, T5 y T6. La gráfica del voltaje rectificado se dibuja sobre las formas de onda compuestas entre fases, en la cual se puede observar los seis pulsos de conmutación en los tiristores completando un ciclo entero de la frecuencia de la red.

A continuación, se muestra el disparo de cada tiristor y la rectificación de las fases.

En la Figura 1.24. se rectifica el voltaje AB, se observa la conducción de corriente a través del tiristor T1 y T5. El tiristor T1 se encarga de rectificar la parte positiva de la onda de A, mientras T5 rectifica la parte negativa de onda de la fase B.

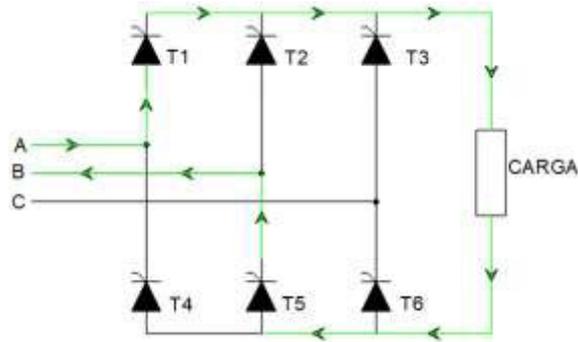


Figura 1.24. Rectificación del voltaje AB.

En la Figura 1.25. se rectifica el voltaje AC, se observa la conducción de corriente a través del tiristor T1 y T6. El tiristor T1 se encarga de rectificar la parte positiva de la onda de A, mientras T6 rectifica la parte negativa de onda de la fase C.

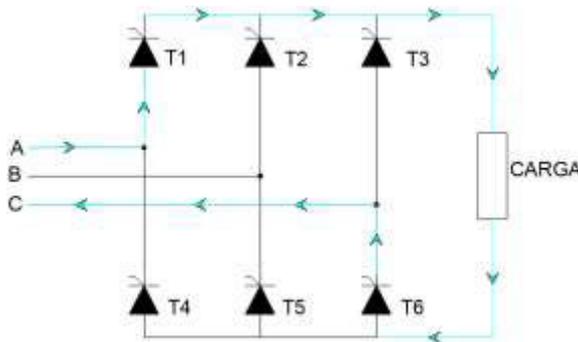


Figura 1.25. Rectificación del voltaje AC.

En la Figura 1.26. se rectifica el voltaje BC, se observa la conducción de corriente a través del tiristor T2 y T6. El tiristor T2 se encarga de rectificar la parte positiva de la onda de B, mientras T6 rectifica la parte negativa de onda de la fase C.

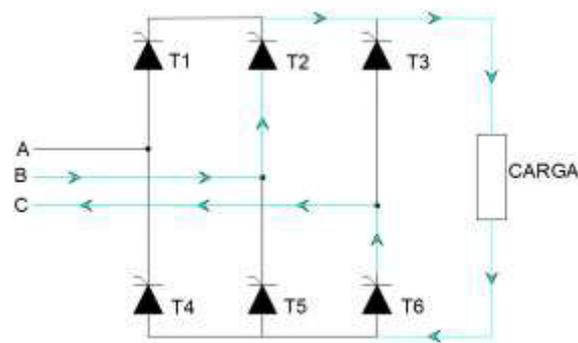


Figura 1.26. Rectificación del voltaje BC.

En la Figura 1.27. se rectifica el voltaje BA, se observa la conducción de corriente a través del tiristor T2 y T4. El tiristor T2 se encarga de rectificar la parte positiva de la onda de B, mientras T4 rectifica la parte negativa de onda de la fase A.

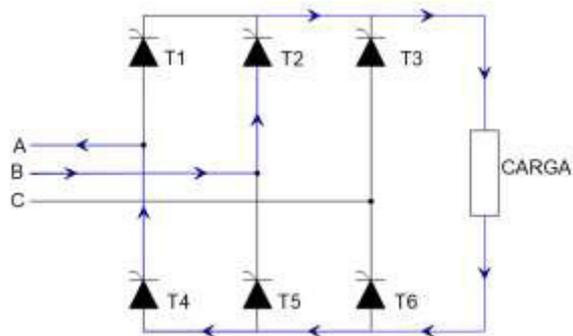


Figura 1.27. Rectificación del voltaje BA.

En la Figura 1.28. se rectifica el voltaje CA, se observa la conducción de corriente a través del tiristor T3 y T4. El tiristor T3 se encarga de rectificar la parte positiva de la onda de C, mientras T4 rectifica la parte negativa de onda de la fase A.

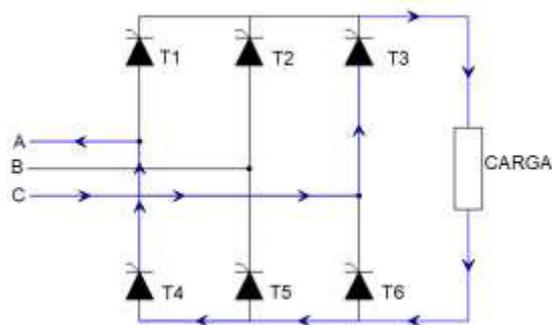


Figura 1.28. Rectificación del voltaje CA.

En la Figura 1.29. se rectifica el voltaje CB, se observa la conducción de corriente a través del tiristor T3 y T5. El tiristor T3 se encarga de rectificar la parte positiva de la onda de C, mientras T5 rectifica la parte negativa de onda de la fase B.

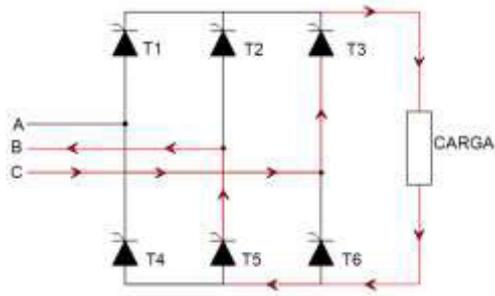


Figura 1.29. Rectificación del voltaje CB.

1.3.5.1.2.1 *Análisis de conducción continua*

El convertidor trifásico de seis pulsos controlado actúa como un rectificador si el ángulo de disparo se encuentra entre los valores de 0 a $\pi/2$ y si el ángulo de disparo está entre $\pi/2$ y π el convertidor actúa como un inversor sincrónico como consecuencia de tener una fuente negativa de voltaje en la carga, el tipo de carga en este caso es RL(-E) con la cual es posible variar el ángulo de disparo de 0 a π .

La corriente de cada tiristor que conforma el puente de rectificación controlado tiene un periodo de conducción de $2\pi/3$, el cual es independiente del ángulo de disparo del convertidor. En el análisis respectivo de las formas de onda tanto de voltaje como de corriente se ha de considerar la conducción continua en la carga y un tipo de carga RL(-E), en la Figura 1.30. se muestra el tipo de puente rectificador controlado de seis pulsos, encontrando en este, los voltajes y corrientes para el análisis de sus ondas.

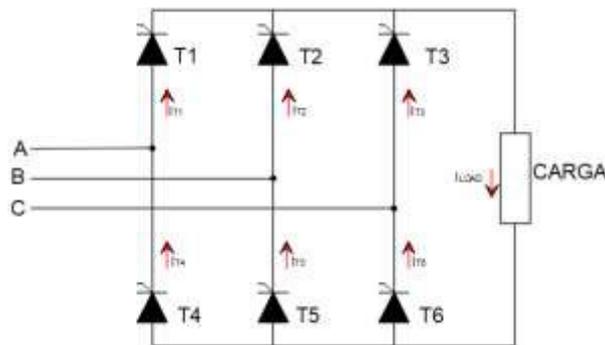


Figura 1.30. Corrientes y voltajes de Rectificador trifásico de seis pulsos.

En la siguiente Figura 1.31. se observa las formas de onda de voltaje de cada fase, el voltaje rectificado, la corriente de cada tiristor y la corriente en la carga para un ángulo de disparo α .

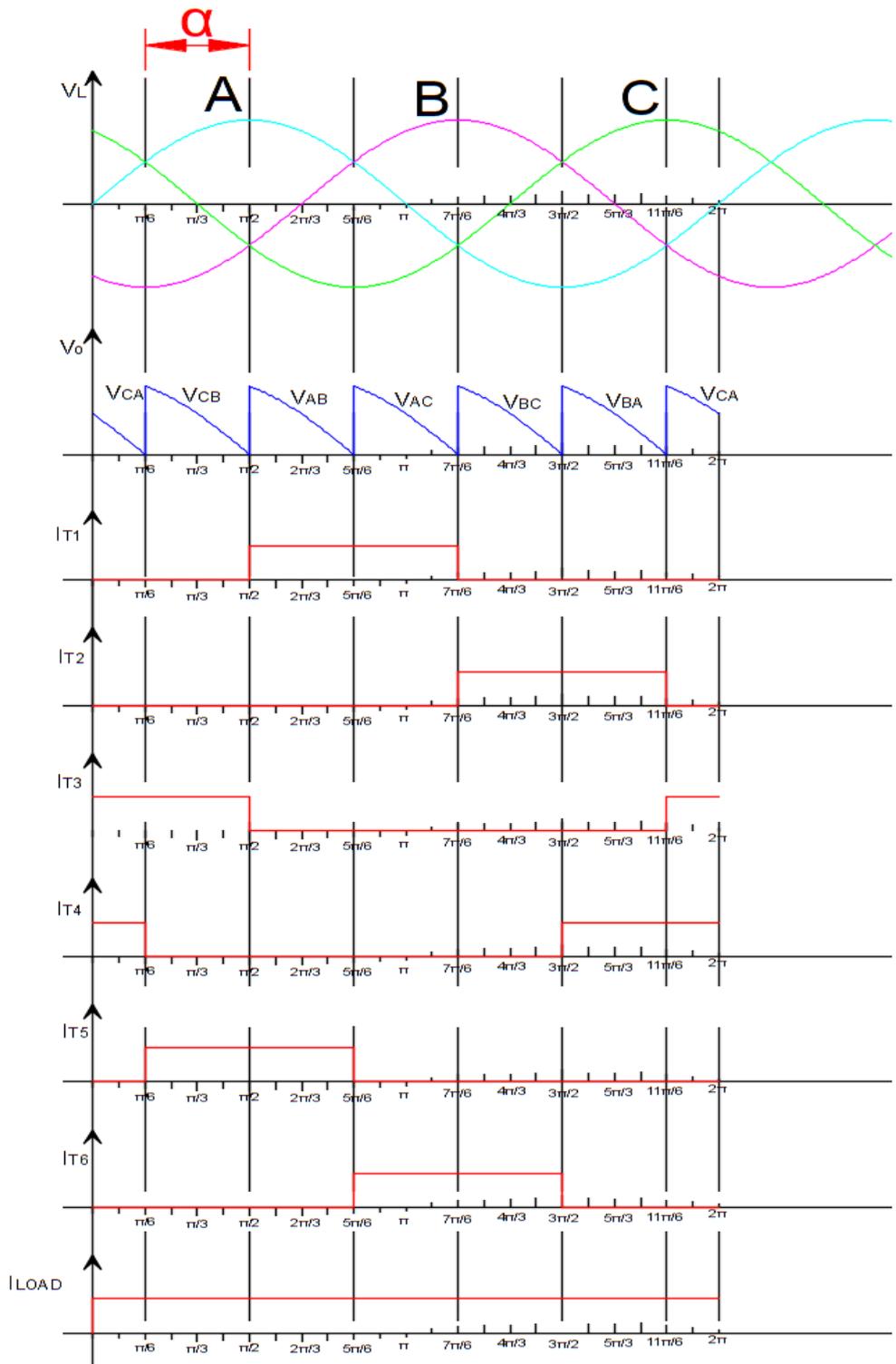


Figura 1.31. Formas de onda de corriente y voltaje del rectificador trifásico controlado de seis pulsos.

1.3.5.1.2.2 Características de voltaje

En la Figura 1.31. se aprecia la forma de onda del voltaje medio (V_o), la cual se obtiene de la definición de la ecuación (1.2).

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) d\omega t \quad (1.2)$$

Reemplazamos en la ecuación (1.2) el periodo, los límites para el rectificador trifásico controlado de seis pulsos es $\omega t = \frac{\pi}{6} + \alpha$.

$$V_{d\alpha} = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2} V_{FF} \cos(\omega t) d\omega t$$

$$V_{d\alpha} = \left[\frac{3 * \sqrt{2} V_{FF} \sin(\omega t) d\omega t}{\pi} \right]_{-\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + \alpha}$$

$$V_{d\alpha} = \left[\left(\frac{3 * \sqrt{2} V_{FF} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right)}{\pi} \right) - \left(\frac{3 * \sqrt{2} V_{FF} \sin\left(-\frac{\pi}{6} + \alpha\right)}{\pi} \right) \right]$$

$$V_{d\alpha} = \frac{3 * \sqrt{2} V_{FF}}{\pi} \left[\left(\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) * \cos(\alpha) + \sin(\alpha) * \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \right) - \left(\sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) * \cos(\alpha) + \sin(\alpha) * \cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) \right) \right]$$

$$V_{d\alpha} = \frac{3 * \sqrt{2} V_{FF}}{\pi} \left[\left(\frac{1}{2} \cos(\alpha) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \right) - \left(-\frac{1}{2} \cos(\alpha) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \right) \right]$$

$$V_{DC} = \frac{3 * \sqrt{2} V_{FF}}{\pi} \cos(\alpha)$$

Sabiendo que $V_{FF} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{max}$, obtenemos:

$$V_{d\alpha} = \frac{3 * \sqrt{2} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{max}}{\pi} \cos(\alpha)$$

$$V_{d\alpha} = \frac{3 * \sqrt{3} V_{max}}{\pi} \cos(\alpha) \quad (1.3)$$

La ecuación (1.3) permite obtener el voltaje de salida del rectificador trifásico controlado de onda completa de seis pulsos en función del ángulo de disparo α .

CONSIDERACIONES:

Anteriormente se mencionó que el puente rectificador actúa como convertidor y funciona en conducción continua cuando su ángulo de disparo se encuentra entre los valores de 0 a π y su carga es altamente inductiva, cumpliéndose estas condiciones la fuente suministra energía a la carga.

Además, en el caso de tener un ángulo de disparo entre $\pi/2$ y π los tiristores se polarizan inversamente, por lo se encuentran imposibilitados de conducir, y debido a esto la carga debe suministrar de energía (-E) necesaria para que los tiristores puedan disparar y entrar en conducción, de esta manera se cumple la condición para obtener conducción continua [4].

En la tabla 1.11. se puede observar los modos de operación del rectificador respecto a la carga que se tenga.

Tabla 1.11. Características del rectificador trifásico controlado de seis pulsos en la carga.

TIPO DE CARGA	ÁNGULO MAXIMO PARA ASEGURAR CONDUCCIÓN CONTINUA	ÁNGULO MAXIMO QUE SUMINISTRA DE VOLTAJE A LA CARGA	OBSERVACIONES
R	60°	120°	En 120° el voltaje en la carga es 0V
RL	90°	120°	Desde los 90° el voltaje en la carga es 0V
RLE	90°	-	El voltaje en la carga depende de E
RL(-E)	180°	180°	El voltaje en la carga depende de -E

1.3.5.1.2.3 Potencia de un rectificador de seis pulsos

El análisis de la potencia en la carga de un rectificador de seis pulsos se basa en la definición de la ecuación (1.4) que describe a la potencia activa.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V(t)I(t)dt \quad (1.4)$$

Remplazamos en la ecuación (1.4) el periodo, los límites para el rectificador trifásico controlado de seis pulsos es $\omega t = \frac{\pi}{6} + \alpha$.

$$P = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2} V_{FF} \cos(\omega t) * I_L d\omega t$$

$$P = \left[\frac{3 * \sqrt{2} V_{FF} \sin(\omega t) * I_L}{\pi} \right]_{-\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + \alpha}$$

$$P = \left(\frac{3\sqrt{2} V_{FF} * I_L}{\pi} \right) \left[\sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

$$P = \left(\frac{3\sqrt{2} V_{FF} * I_L}{\pi} \right) \left[\left(\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) * \cos(\alpha) + \sin(\alpha) * \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \right) - \left(\sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) * \cos(\alpha) + \sin(\alpha) * \cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) \right) \right]$$

$$P = \left(\frac{3\sqrt{2} V_{FF} * I_L}{\pi} \right) \left[\left(\frac{1}{2} \cos(\alpha) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \right) - \left(-\frac{1}{2} \cos(\alpha) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha) \right) \right]$$

$$P = \frac{3\sqrt{2} V_{FF} * I_L}{\pi} \cos(\alpha)$$

$$P = \frac{3\sqrt{3} V_{max} * I_L}{\pi} \cos(\alpha)$$

$$P = V_{d\alpha} I_L \quad (1.5)$$

Se obtiene la ecuación (1.5), la cual define la potencia activa en la carga del rectificador. Tenemos que la corriente es continua a la salida de la carga, pero el voltaje es variable y puede tener partes positivas o negativas, en la Figura 1.32. se aprecia el modo de operación de la carga, la cual se sitúa en dos cuadrantes.



Figura 1.32. Cuadrantes de operación del rectificador trifásico controlado de seis pulsos.

CONSIDERACIONES:

En la Figura 1.32. se observa que en el primer cuadrante de operación el ángulo de disparo está entre 0 y $\pi/2$ y la corriente como el voltaje son positivos, lo cual nos permite controlar cualquier tipo de carga, ya que la potencia activa puede ser controlada con la variación del ángulo de disparo, permitiendo de esta manera suministrar potencia hacia la carga desde la red eléctrica, concluyendo que la potencia activa suministrada por la red eléctrica debe ser igual a la potencia en la carga. El ángulo de disparo determina el desfase existente entre las ondas de voltaje y corriente de la red eléctrica.

En el segundo cuadrante de operación el ángulo de disparo se encuentra entre los valores de $\pi/2$ a π y producirá potencia si el tipo de carga es una RL(-E), ya como se vio en las consideraciones de voltaje, en este caso se tendría potencia negativa, lo que quiere decir que estaríamos entregando energía a la red eléctrica. Concluyendo que en esta condición el rectificador trabaja como inversor sincrónico [4].

1.3.5.1.2.4 *Cruce por cero*

Da seguimiento a las ondas de entrada de la red trifásica y halla el cruce de cada señal sinusoidal por la línea de referencia igual a cero,

Se genera una señal en el cruce por cero de la onda de voltaje provocando el retardo del ángulo de disparo en $\frac{\pi}{6} + \alpha$ en el gate del tiristor.

De esta manera se sincroniza la etapa de control con la señal de la red trifásica.

1.3.5.1.2.5 Rectificador trifásico controlado de doce pulsos

La tipología de este rectificador se muestra en la Figura 1.33. es aplicable en la transmisión de corriente continua en alto voltaje, los doce pulsos ayudan en la reducción de la componente ondulatoria en la salida en sus terminales.

Este tipo de rectificador está compuesto de dos puentes rectificadores controlados de seis pulsos, los cuales pueden ser conectados en serie o paralelo, la diferencia está dada por la referencia del ángulo de disparo, y dependerá de su aplicación.

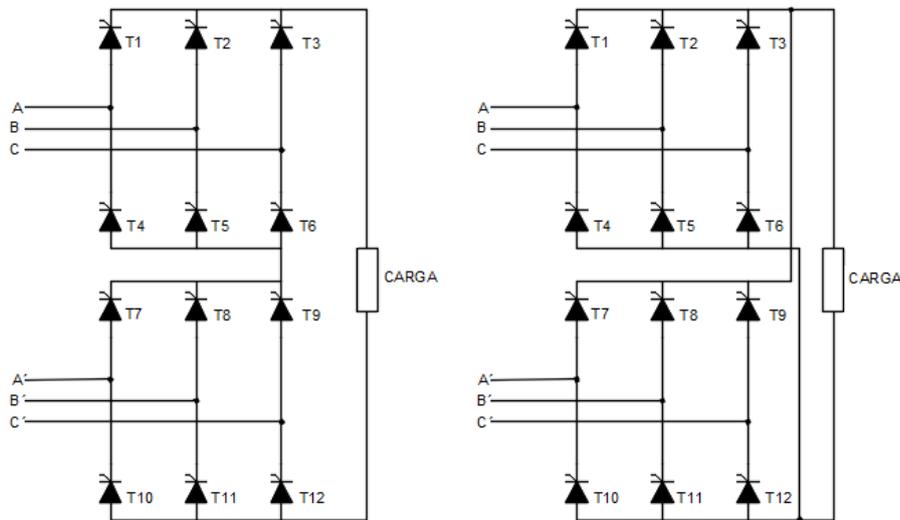


Figura 1.33. Rectificador trifásico controlado de doce pulsos: serie y paralelo respectivamente.

1.3.6 MICROCONTROLADORES

Es un circuito integrado que tiene todos los componentes de una microcomputadora como CPU, memoria RAM, memoria ROM, circuitos de entrada y salida y componentes para aplicaciones especiales, en base a sus abreviaturas micro por ser de un tamaño pequeño y controlador por ser usado para el control de elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos, entre otros.

Existen distintos tipos de microcontroladores los cuales tienen diferente tecnología por lo que cada uno de estos pueden tener su propio lenguaje de programación.

1.3.6.1 Tipos de microcontroladores

1.3.6.1.1 *Arduino*

Es un microcontrolador de código abierto, una placa sencilla compuesta de entradas y salidas tanto analógicas como digitales que apoya su funcionamiento en un entorno de desarrollo en lenguaje de programación Processing basado en Java.

Arduino permite la creación de proyectos electrónicos de una forma sencilla y eficaz.

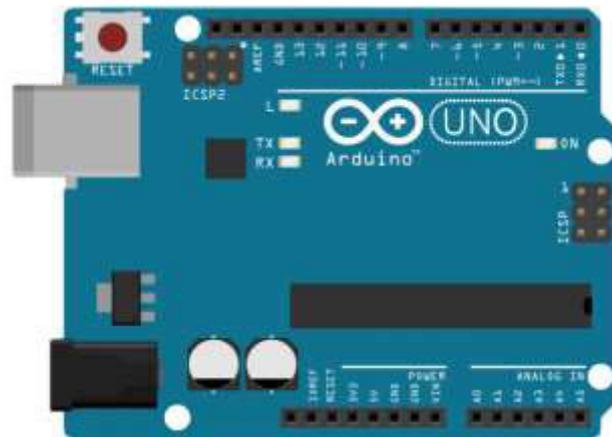


Figura 1.34. Tarjeta física electrónica de ARDUINO [14]

1.3.6.1.2 *Atmega*

Una familia de microcontroladores RISC del fabricante ATMEL, su arquitectura fue desarrollada en el Norwegian Institute of Technology, desde sus inicios fue diseñada para su desenvolvimiento eficaz en código C.

Los microcontroladores AVR son de alto rendimiento que permiten su operación mediante la carga y ejecución de instrucciones en base de un ciclo de reloj.

1.3.6.1.3 *STM*

Una plataforma que se define como aquella estructura, de software y/o hardware, sobre la cual algunas aplicaciones son capaces de ser ejecutadas. La serie STM32 es una familia de microcontroladores, desarrollados por STMicroelectronics. Las tarjetas STM32 utilizan los núcleos ARM RISC de 32 bits de ARM Holdings, tales como Cortex-M4F, Cortex-M3, Cortex-M0+ y Cortex-M0.

ARM son las siglas de Advanced RISC Machine. La arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer) es un tipo de diseño de CPU que se utiliza generalmente en microcontroladores. A continuación, se presentan algunas características:

- Instrucciones de tamaño fijo, mostradas en un reducido número de formatos.
- Disponen de muchos registros de propósito general.
- Ejecutan instrucciones en paralelo y reducen los accesos a memoria.

El procesador ARM Cortex TM-M4 es el último procesador incrustado, desarrollado por ARM, específicamente para hacer frente a los mercados de control de señales digitales que demandan un servicio eficiente y fácil de usar.

1.3.7 MODELOS DE TURBINAS A SIMULARSE EN EL LABORATORIO FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Los modelos de turbinas a ser simuladas y estudiadas son centrales de generación convencionales que fácilmente se pueden encontrar en un sistema eléctrico de potencia. Los modelos a simularse permiten contemplar varios escenarios en el control de la frecuencia del SEP.

1.3.7.1 Modelo hidráulico

Las centrales hidroeléctricas son uno de los grupos de mayor importancia, ya que estas centrales en la mayor parte de países del mundo aprovechan los caudales de ríos para la generación de energía eléctrica, además de ser centrales bases de generación.

En el modelamiento es de suma importancia analizar su rendimiento, comportamiento de las columnas de agua que alimentan a las turbinas de una central y el efecto de inercia que provoca el agua, ya que tienen tiempos muy lentos en la apertura y cierre de la válvula que alimentan a la turbina.

La potencia que se pueda aprovechar de una central hidroeléctrica es afectada por cada una de las variables y parámetros marcados en la Figura 1.35.

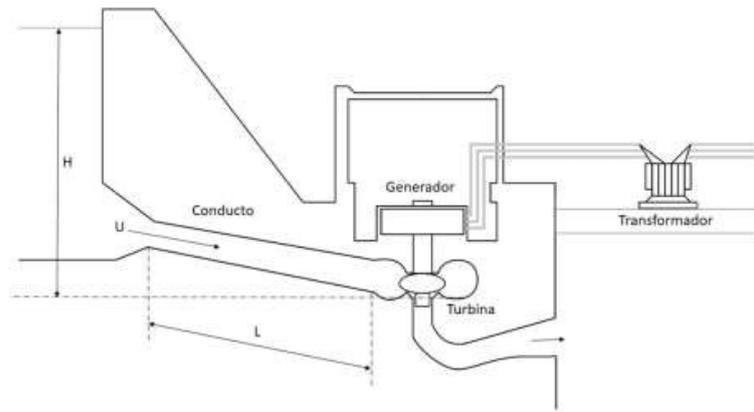


Figura 1.35. Esquema de una central hidroeléctrica

En el análisis para la representación de la turbina hidráulica se asume que el conducto de alimentación es inelástico y que el agua no se comprime. El sistema queda definido mediante las siguientes ecuaciones:

Se define a la velocidad del agua mediante la ecuación:

$$U = K_u P_v \sqrt{H} \quad (1.6)$$

Donde:

U: Velocidad del agua

K_u : Constante de proporcionalidad

P_v : Posición de la válvula o compuerta

\sqrt{H} : Altura hidráulica respecto a la turbina

Se linealiza la ecuación anterior y se obtiene:

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial P_v} \Delta P_v$$

Se normaliza la ecuación tomando como punto inicial de operación de reposo

$$(U_0 = K_u P_{v0} \sqrt{H_0})$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta H}{2H_0} + \frac{\Delta P_v}{P_{v0}} \quad (1.7)$$

$$\overline{\Delta U} = \frac{1}{2} \overline{\Delta H} + \overline{\Delta P_v}$$

Se tiene la ecuación de la potencia mecánica de la turbina la cual es proporcional al producto del flujo y la presión.

$$P_m = K_p H U \quad (1.8)$$

Donde:

K_p : Constante de proporcionalidad

Linealizamos y normalizamos la ecuación (1.8), teniendo como punto inicial

$$(P_{m0} = K_p H_0 U_0)$$

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m0}} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0} \quad (1.9)$$

Se sustituye $\frac{\Delta U}{U_0}$ en la ecuación (1.9) y obtenemos lo siguiente:

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m0}} = \frac{3 \Delta H}{2 H_0} + \frac{\Delta P_v}{P_{v0}}$$

O si se sustituye $\frac{\Delta H}{H_0}$ en la ecuación (1.9), se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m0}} = 3 \frac{\Delta U}{U_0} - 2 \frac{\Delta P_v}{P_{v0}}$$

Aprovechando la segunda ley de Newton, definimos que la aceleración de la columna de agua sufre cambios respecto a la presión.

$$(\rho L A) \frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho a_g) \Delta H \quad (1.10)$$

Donde:

L: Longitud del conducto

ρ : Densidad del agua

A: Área de entrada

a_g : Aceleración gravitacional

ρLA : Masa del agua en el conducto

Se divide la ecuación (1.10) para las condiciones iniciales ($A\rho a_g H_0 U_0$) y se obtiene:

$$\frac{LU_0}{a_g H_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta U}{U_0} \right) = - \frac{\Delta H}{H_0} \quad (1.11)$$

Aparece el término T_w el cual define el tiempo que se requiere para acelerar la columna de agua desde el reposo hasta una velocidad U_0 .

T_w varía entre 0.5 a 4 segundos y puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$T_w = \frac{LU_0}{a_g H_0} \quad (1.12)$$

Combinando la ecuación (1.11) y (1.12), tenemos la siguiente expresión:

$$T_w \frac{d\overline{\Delta U}}{dt} = -\overline{\Delta H}$$

De la combinación de la ecuación normalizada de la velocidad del agua y la ecuación normalizada de la altura del agua respecto a la turbina, tenemos la siguiente expresión:

$$T_w \frac{d\overline{\Delta U}}{dt} = 2(\overline{\Delta P_v} - \overline{\Delta U})$$

A la ecuación anterior se aplica la transformada de Laplace y se obtiene:

$$T_w s \Delta U = 2(\Delta P_v - \Delta U)$$

De la ecuación de potencia mecánica determinada sustituimos ΔU en la ecuación anterior y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_v} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad (1.13)$$

La ecuación (1.13), es la que representa la función de transferencia de una turbina hidráulica, en la Figura 1.36. se expresa en diagrama de bloques [5].

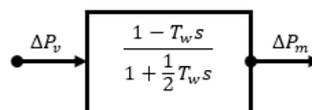


Figura 1.36. Modelo de la turbina hidráulica

1.3.7.2 Modelo térmico

1.3.7.2.1 Modelo térmico a vapor

La turbina térmica que será estudiada en el laboratorio es la turbina a vapor la cual almacena vapor a altas temperaturas y presiones que una vez inyectada en la cámara de la turbina provoca el movimiento de la misma. El funcionamiento de las turbinas a vapor básicamente es causado por la producción de calor mediante un reactor nuclear o la quema de combustibles fósiles que permitan generar energía mecánica rotativa.

Para el modelado y estudio se analiza la turbina térmica sin recalentamiento. La potencia mecánica de esta turbina cambia en función de la apertura de la válvula que controla el flujo de vapor hacia la cámara de la turbina, en el modelado se tiene en cuenta el retraso que implica la apertura de la válvula y la cantidad de vapor que se envía hacia la turbina. En la Figura 1.37. se muestra el esquema básico de una turbina térmica sin recalentamiento.



Figura 1.37. Esquema de una turbina térmica sin recalentamiento

Esta turbina normalmente se la modela con una función de transferencia de primer orden que toma en cuenta los cambios de posición de apertura o cierre de la válvula con respecto a la potencia mecánica.

$$G = \frac{1}{1 + T_V s} \quad (1.14)$$

A continuación, en la fig. se muestra el modelo de la turbina térmica simple.

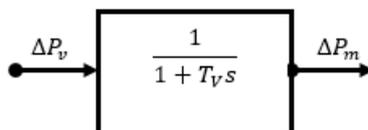


Figura 1.38. Modelo de la turbina térmica sin recalentamiento

Donde:

ΔP_v : Cambio de la posición de la válvula o compuerta.

ΔP_m : Cambio de la potencia mecánica

T_v : Constante de tiempo de la cámara de vapor entre los valores de 0.2 a 0.5 s.

1.3.7.2.2 Modelo térmico a gas

Son turbomáquinas cuyo fluido de trabajo es un gas, el cual es quemado directamente. Basa su funcionamiento en motores de combustión interna que requieren de una fuente externa de energía para su puesta en marcha. Es común que este tipo de turbinas describan el ciclo termodinámico de Brayton.

Este sistema permite la entrada de aire atmosférico que es comprimido para elevar su presión.

Posteriormente, el aire pasa a través de una cámara de combustión en la que se dispersa y quema combustible. Este gas a alta presión y temperatura se expande en la turbina generando un par mecánico aprovechable por el generador. [12]

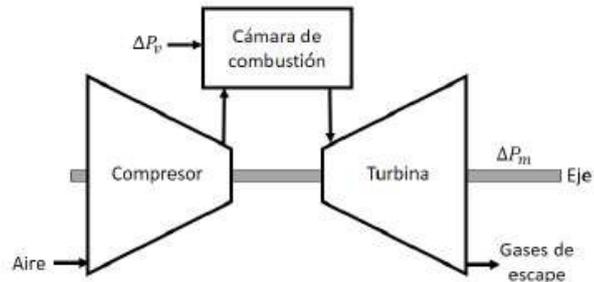


Figura 1.39. Esquema de una turbina de gas.

El modelado de la turbina de gas es similar al de una turbina de vapor sin recalentamiento. El tiempo de respuesta de las turbinas de gas modernas es algo menor que el del resto de turbinas térmicas.

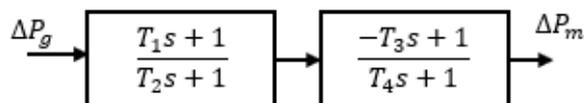


Figura 1.40. Modelo de la turbina térmica a gas

2. DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD

2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

2.1.1 MOTOR COMPOUND

Se diseña el GOV para el motor de corriente continua del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia, el cual tiene las siguientes características de funcionamiento en vacío:

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas del motor de corriente continua del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia, para obtener la velocidad sincrónica del generador

Potencia [Hp]	10
Voltaje de Campo [V]	190
Voltaje de armadura [V]	140
Corriente nominal de campo [A]	1,5
Corriente nominal de armadura [A]	5
Tipo de conexión	Compuesto aditivo
Velocidad [rpm]	1200

Los datos mostrados en la Tabla 2.1, muestran que el GOV debe regular la velocidad de rotación del motor de corriente continua en un valor constante de 1200 rpm, para de este modo lograr que el generador sincrónico que esta mecánicamente acoplado, genere voltajes de frecuencia constante de 60Hz ante cualquier perturbación dentro del sistema. Para la etapa de potencia los elementos se han dimensionado con la corriente máxima de 30A [2].

2.1.2 TARJETA CON MICROCONTROLADOR STM32

La tarjeta STM32F407G es un microcontrolador con capacidad de almacenamiento de 32 bits de un alto rendimiento, bajo costo y consumo de energía, contiene un núcleo tipo ARM Cortex-M4 permitiendo la ejecución mejorada de algoritmos de control, facilidad de uso, mejor eficiencia del código y reducción del tiempo de ejecución.

El lenguaje de programación que usa este microcontrolador es C/C++ y es amigable con la programación en bloques del software MATLAB con apoyo de la librería Waijung, el cual permite el funcionamiento de la tarjeta.

2.1.2.1 Características

La tarjeta STM32F4DISCOVERY tiene las siguientes características

- Microcontrolador STM32F407G con 1MB de memoria flash, 192 KB de RAM y un encapsulado LQFP100.
- ST-LINK/V2 incorporado con selector usar el kit con un ST-LINK/V2 independiente (con conector SWD para programación y depuración).
- Fuente de alimentación: puede ser a través de un cable USB o una fuente de alimentación externa de 5V.
- Sensor de movimiento ST MEMS LIS302DL, acelerómetro con salida digital de 3 ejes.
- Sensor de audio ST MEMS MP45DT02, micrófono digital omnidireccional.
- Ocho LED's:
 - LD1 (rojo/verde) para comunicación USB
 - LD2 (rojo) alimentación 3,3 V.
 - Cuatro LED's de usuario: LD3 (naranja), LD4 (verde), LD5 (rojo) y LD6 (azul).
 - 2 LED's USB OTG: LD7 (verde), VBus y LD8 (rojo).
- Dos pulsadores (Usuario y Reset)
- USB OTG con conector micro-AB

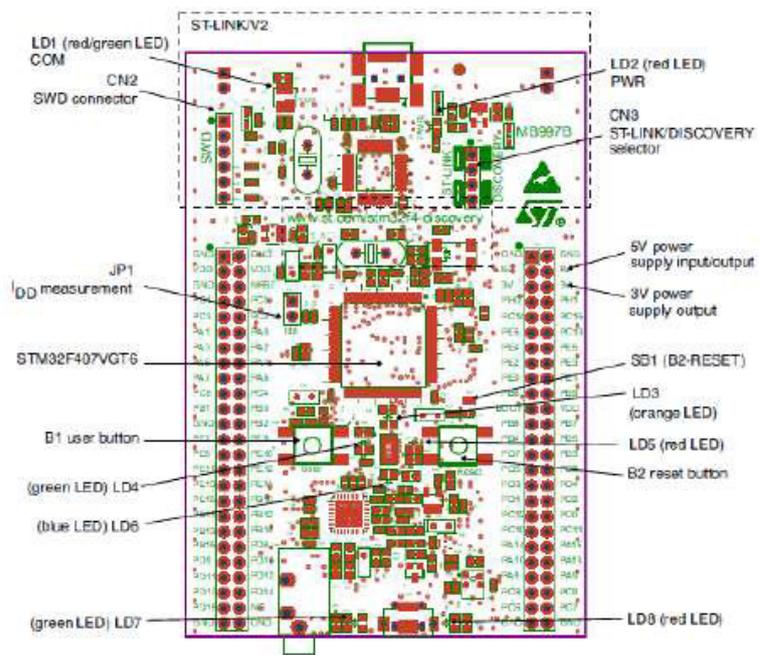


Figura. 2.1. Diseño esquemático de la tarjeta STM32F4DISCOVERY



Figura. 2.2. Tarjeta Física STM32F4DISCOVERY

2.2 DISEÑO DE HARDWARE

2.2.1 ETAPA DE CONTROL

2.2.1.1 Circuito de disparo de tiristores

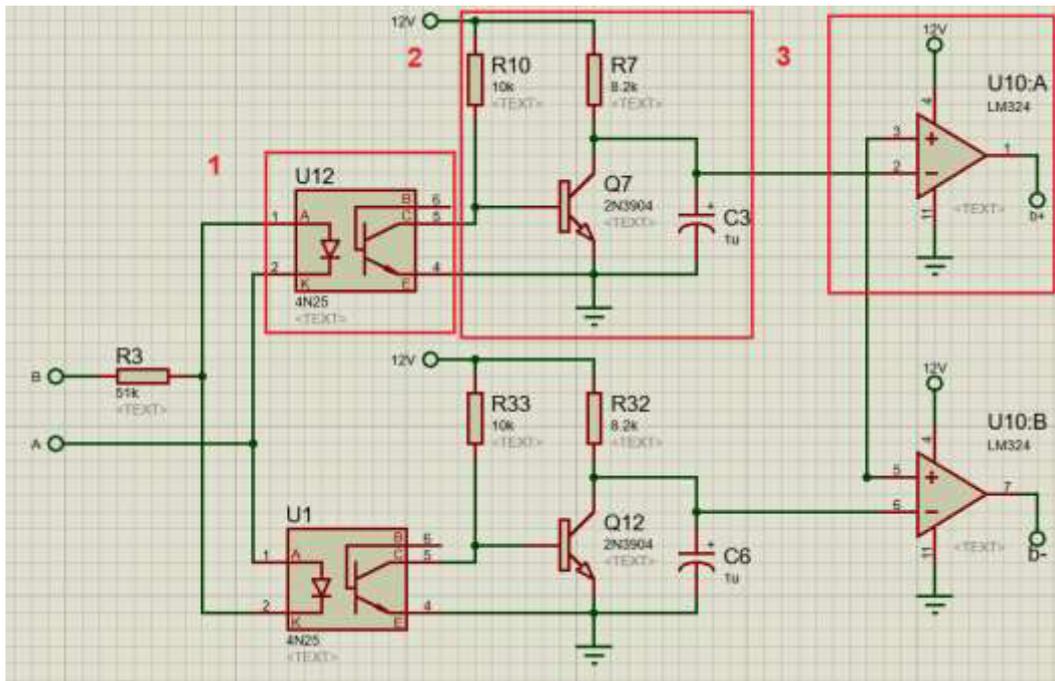


Figura. 2.3. Circuito de disparo de tiristores para el voltaje AB

A continuación, se describe el funcionamiento del circuito de la parte superior de la Figura 2.3.

1. El opto acoplador detecta el cruce por cero del ciclo positivo de la onda de voltaje AB y genera un pulso de la misma duración que el ciclo positivo de la onda de voltaje.
2. El transistor, la resistencia y el capacitor forman un circuito integrador que genera un diente de sierra a partir del pulso obtenido del circuito detector de cruce por cero de la onda de voltaje.
3. El amplificador operacional está configurado en modo comparador, el mismo que compara la señal del diente de sierra y el voltaje de referencia proveniente del DAC de la

tarjeta de control STM32, para posteriormente generar el pulso de ancho variable que se conecta a la compuerta para el disparo del tiristor.

La parte inferior de la Figura 2.3. tiene similar funcionamiento que la anteriormente descrita, operando durante el ciclo negativo de la onda de voltaje AB.

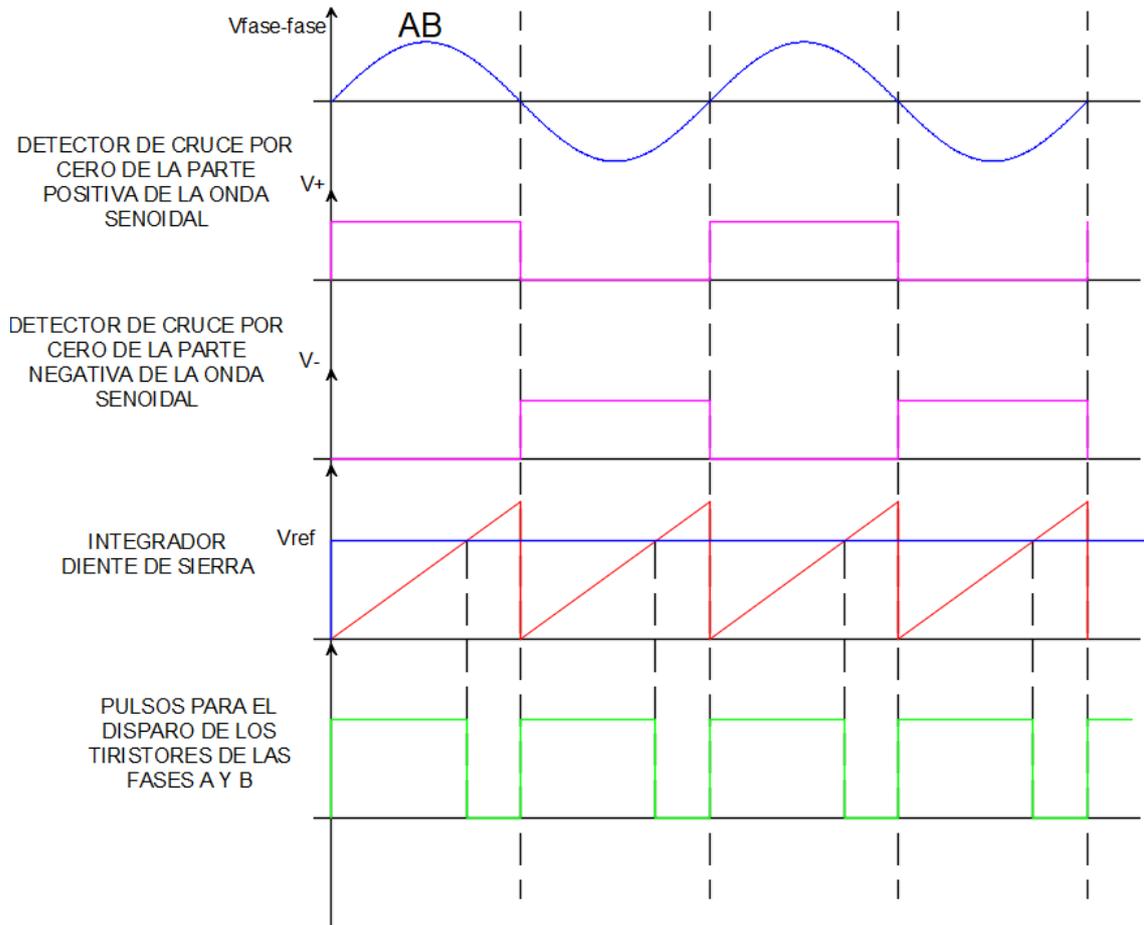


Figura 2.4. Formas de onda del circuito de disparo de tiristores para el voltaje AB.

El funcionamiento de los circuitos de las Figuras 2.5. y 2.6. es el mismo que el de la Figura 2.3. y genera señales similares a las de la Figura 2.4., para el disparo de los tiristores de los voltajes BC y AC correspondientemente.

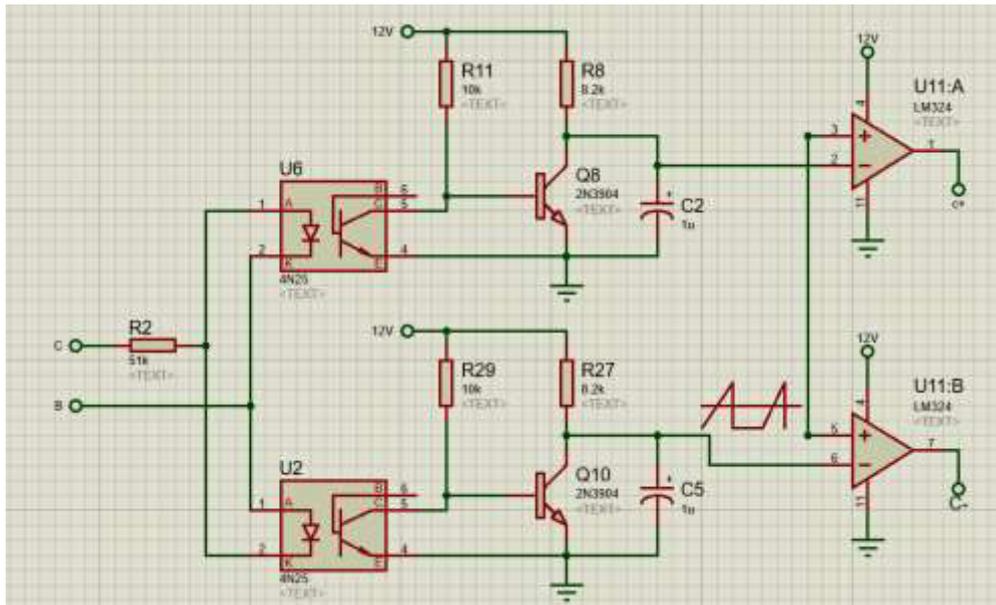


Figura. 2.5. Circuito de disparo de tiristores para la onda de voltaje BC

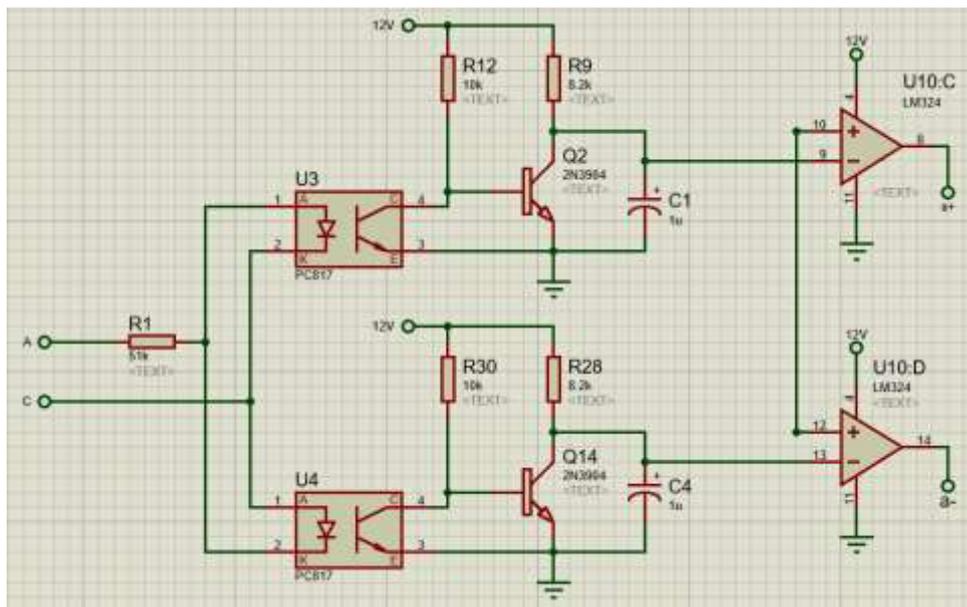


Figura. 2.6. Circuito de disparo de tiristores para la onda de voltaje AC

2.2.1.2 Sensor de voltaje

Para medir el voltaje de la armadura del motor de corriente continua, se debe realizar el acondicionamiento de la señal de voltaje para que pueda ser procesada por la tarjeta STM32. El acondicionamiento de la señal es realizado mediante el circuito mostrado en la Figura 2.7., el cual usa un optoacoplador para reducir el rango de voltaje de 0 a 5 V.

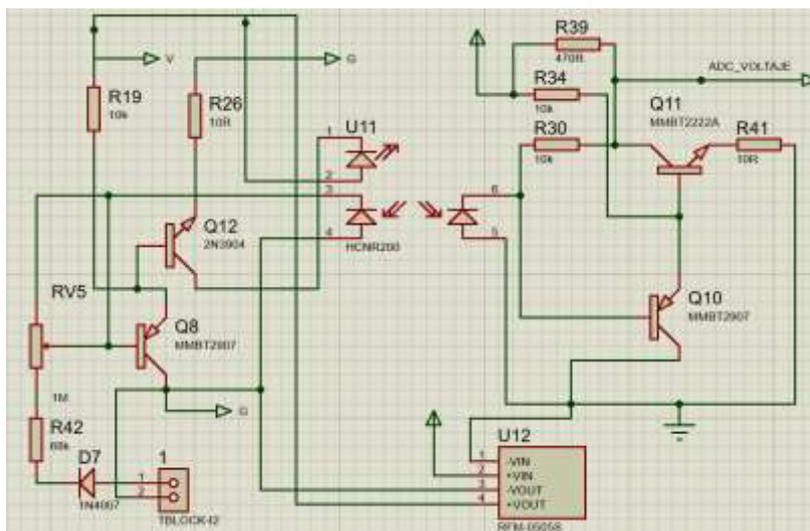


Figura 2.7. Circuito sensor de voltaje

En el circuito mostrado en la Figura 2.7. Se utiliza un divisor de voltaje, para reducir la entrada a la tarjeta STM32 a un rango de 0 a 5 V. Además, se usa un circuito optoacoplador integral de carácter lineal HCNR200 que aísla los voltajes provenientes de la armadura del motor y el voltaje que ingresa a la tarjeta STM32, luego se procesa la señal obtenida del sensor dentro de la tarjeta STM32 para obtener la medida del voltaje de armadura del motor de corriente continua.

2.2.1.3 Sensor de corriente

La medición de la corriente de armadura del motor de corriente continua se realiza mediante el uso del sensor análogo ACS758, se acondiciona la señal a niveles de electrónica digital y finalmente el procesamiento en la tarjeta STM32 para obtener la medición de la corriente.



Figura 2.8. Sensor análogo de corriente ACS758

A continuación, se muestran las especificaciones del sensor de corriente ACS758:

Tabla 2.2. Características sensor de corriente ACS758

Voltaje de operación	3,3 V – 5 V
Voltaje pico de medición	3000 V (AC), 500 V (DC)
Rango de medición de corriente	50 A
Sensibilidad	40 mV/A
Temperatura de operación	- 40 a 150 °C

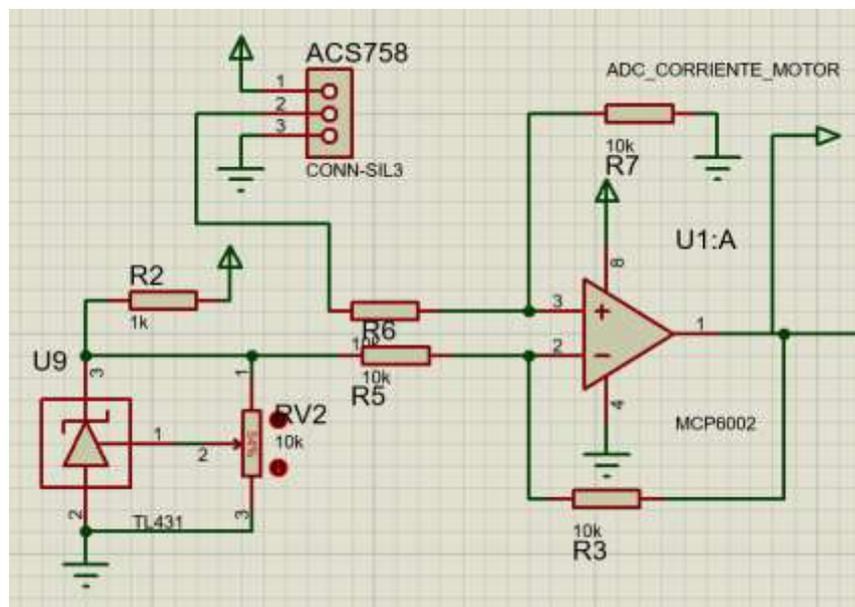


Figura 2.9. Circuito para medición de corriente

El circuito mostrado en la figura 2.9., acondiciona el voltaje obtenido del sensor análogo ACS758 mediante el uso de un amplificador operacional en modo diferencial, este acondicionamiento se debe realizar debido a que el sensor de corriente provee voltajes de entre 3,3 y 5 V. La obtención de la señal de voltaje que se procesa en la tarjeta STM32 viene dada por la resta de la señal que brinda el sensor ACS758 y el voltaje de referencia de 3,3 V que se fija mediante el uso del regulador variable de voltaje TL431 y la resistencia variable conectada al mismo.

Para obtener el valor real de la corriente de armadura del motor de corriente continua se realiza el procesamiento que se describirá posteriormente en la tarjeta STM32.

2.2.1.4 Encoder rotativo incremental

Para que el GOV regule la velocidad de la máquina motriz se debe tener una medición de la velocidad de rotación suficientemente exacta, por lo cual se ha utilizado un encoder rotativo incremental.

A continuación, se muestra las especificaciones del encoder rotativo incremental utilizado:

Tabla 2.3. Características del encoder rotativo incremental

Marca	Selet
Modelo	SI063-63-BS-100-EAP-6-CR-8.E58
Voltaje de alimentación	6 a 28 VDC
Canales	A+B
Resolución	100 pulsos
Diámetro del eje	8 mm
Peso	300 g

Se utiliza un encoder rotativo incremental, que mide la velocidad de rotación del eje del motor de corriente continua, ya que se encuentra acoplado al mismo mediante un soporte metálico ubicado sobre el motor.

Se provee de alimentación al encoder mediante una fuente de 12V DC, y la señal que brinda el encoder está compuesta de dos canales A y B que miden el número de pulsos según la velocidad de rotación del motor de corriente continua.



Figura 2.10. Encoder rotativo incremental

La medición de la velocidad de rotación es la señal de entrada a la tarjeta de control STM32, para luego del procesamiento de la señal, lograr regular la velocidad del motor en 1200 rpm para que el generador eléctrico acoplado mecánicamente genere voltajes a frecuencia constante a 60 Hz.

2.2.1.5 Pantalla Nextion

Se utiliza la pantalla Nextion como interfaz hombre - maquina (HMI), en el módulo del GOV del motor de corriente continua.

A continuación, se muestra las características de la pantalla Nextion:

Tabla 2.4. Características de la pantalla Nextion

Modelo	NX4832T035
Resolución	480x320
Tipo	TFT con panel táctil resistivo
Interfaz	TTL de 4 pines
Memoria flash	16 M
Área visual	73,44 mm (largo) x 48,96 mm (ancho)
Brillo ajustable	0 – 180 nit
Consumo	5 V 145 mA



Figura 2.11. Pantalla Nextion NX4832T035

2.2.2 ETAPA DE POTENCIA

2.2.2.1 Campo

2.2.2.1.1 Rectificador AC/DC no controlado

El rectificador AC/DC convierte un voltaje alterno en voltaje continuo, el rectificador no controlado usa la configuración de puente con diodos rectificadores, capaz de rectificar el voltaje de onda sinusoidal y convertirlo en voltaje continuo.

2.2.2.1.1.1 Generalidades

El puente rectificador consiste en cuatro diodos que convierten la onda sinusoidal en una señal positiva de la onda, en este caso se convierte una red bifásica alterna por lo que rectifica y toma los picos de las ondas positivas teniendo un rizado constante, obteniendo de esta manera voltaje continuo para abastecer de energía al campo del motor. El voltaje con que se alimenta al motor es de 190 V de corriente continua y una corriente aproximada de 1.5 A.

Por los parámetros establecidos se utiliza el siguiente puente rectificador que se muestra en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Puente Rectificador

2.2.2.1.1.2 Especificaciones Técnicas

- Tipo de puente: Monofásico.
- Tipo de encapsulado: KBPC.
- Tipo de diodo: Conexión de silicio.
- Corriente directa media de pico (I_f): 50 A.
- Voltaje repetitivo inversa de pico (V_{rrm}): 1000 V.
- Voltaje máximo de entrada al puente (V_{rms}): 700V.
- Voltaje máximo de bloqueo (V_{dc}): 1000 V.
- Máxima corriente de sobrevoltaje (I_{fsm}): 400 A.
- Temperatura de trabajo: -65°C a 150°C .

2.2.2.2 Armadura

2.2.2.2.1 Rectificador AC/DC controlado

Este tipo de rectificadores sustenta su funcionamiento en la aplicación de SCR's. Los SCR's son dispositivos electrónicos que requieren del control del ángulo de fase, estos elementos se bloquean naturalmente.

Este rectificador se alimenta de una red trifásica de voltaje alterno, pasa por los SCR's los cuales son disparados y permiten la rectificación, convirtiendo de esta manera el

voltaje alterno en voltaje continuo, este tipo de rectificadores controlados permiten tener control de los niveles de voltaje en la salida de los terminales del rectificador.

2.2.2.2.1.1 Generalidades

La alimentación requerida para el motor de corriente continua para que mantenga una velocidad constante de 1200 rpm, es de 140 V y una corriente aproximada de 4 A en vacío, para lo cual se usa un rectificador trifásico controlado de seis pulsos, de esta manera se obtiene un voltaje continuo rectificado que permite el aumento o disminución de los niveles de voltaje y corriente en la armadura del motor.

El rectificador a usar debe cumplir varias características: poder soportar transitorios muy fuertes, como los provocados al momento del arranque motor y por la demanda de carga exigida en el generador, ya que esto provocará en el motor aumento de niveles de corriente y voltaje en los terminales de la armadura, las corrientes que existen al encender el motor son muy elevadas y los dispositivos electrónicos de potencia deben tener la capacidad de soportar estos eventos, por lo que se procede a utilizar el módulo de tiristores que se muestra en la Figura 2.13., para formar el puente rectificador de seis pulsos.



Figura 2.13. Módulo de Tiristores.

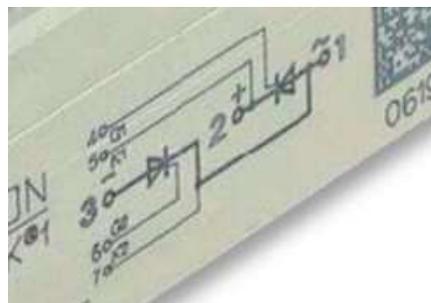


Figura 2.14. Diagrama de conexión del módulo

2.2.2.2.1.2 *Especificaciones Técnicas*

- Tipo de módulo SCR: Conectado en serie SCRs
- Corriente de disparo de puerta máxima I_{gt} : 150 mA.
- Corriente I_t promedio: 106 A.
- Corriente estado conductor I_t (rms): 180 A.
- Pico corriente transitoria: 2.25 kA.
- Corriente de retención I_h máximo: 250 mA.
- Voltaje de disparo de puerta máximo V_{gt} : 3 V
- Temperatura de trabajo máximo: 130°C.

2.2.3 DISEÑO DE SOFTWARE

2.2.3.1 **Software de control**

El software de control contempla la programación de bloques para la tarjeta de control STM32, la misma que regula la velocidad de rotación del motor de corriente continua.

El diagrama de control toma en cuenta los distintos tipos de control PI que se pueden simular, además de las variables de protección que se han utilizado asociadas a fallas de funcionamiento del sistema como, sobrecorriente, sobrevoltaje, error de campo y error de fase.

En la figura 2.15. se muestra el diagrama de control del GOV para la maquina motriz del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Dentro del diagrama de flujo están consideradas las siguientes variables de control y operación: A (Tipo de control PI), B (Encendido/Apagado), F (Error Fase), B7 (Error de campo), E6 (Sobrevoltaje).

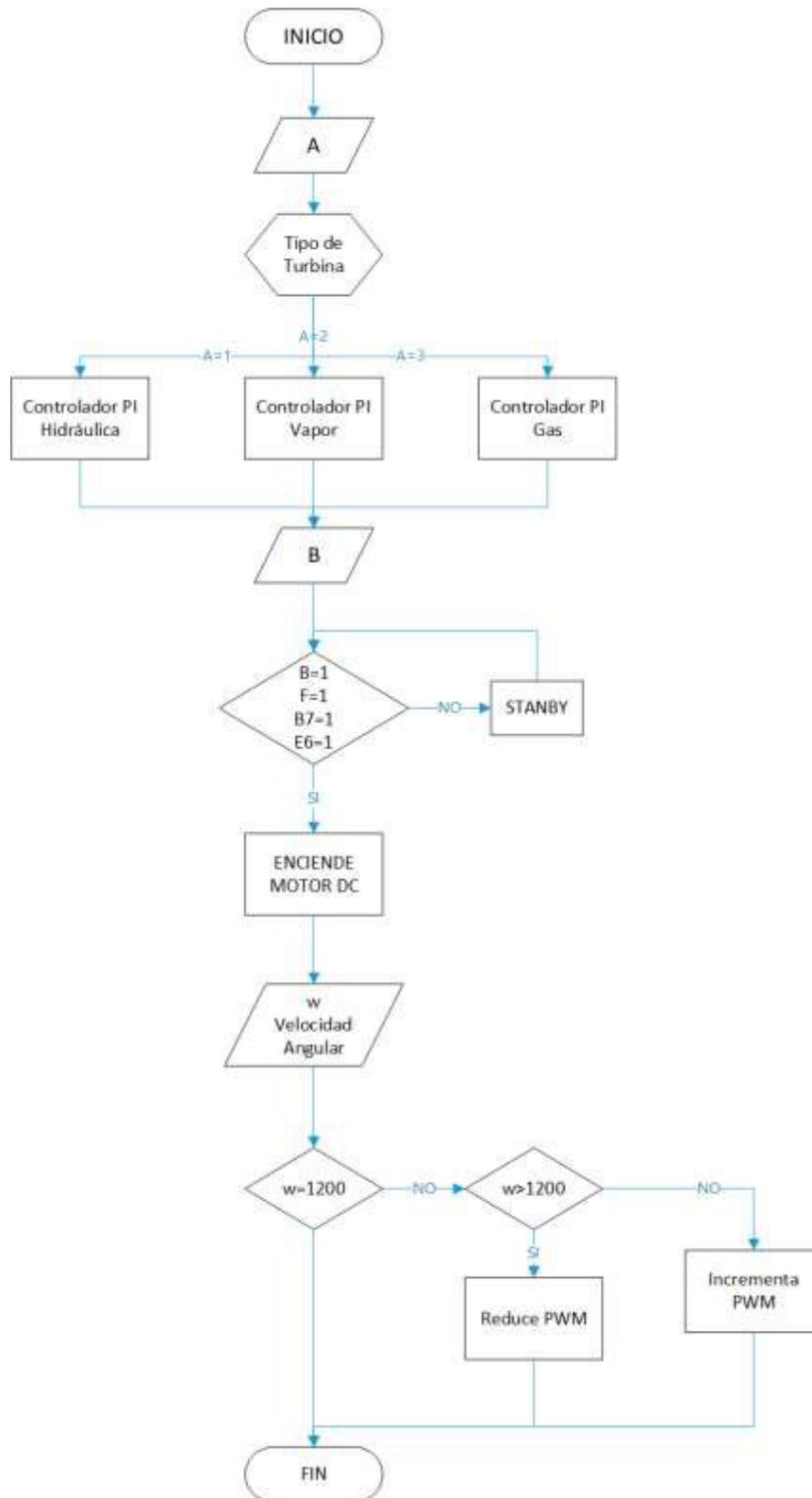


Figura 2.15. Diagrama de Flujo GOV

2.2.3.1.1 Funciones de control PI

El control PI, también denominado control de acción proporcional e integral (PI), es de los más usados a nivel industrial ya que se acoplan a todos los procesos realizables en la industria.

Los controladores PI, trabajan de la siguiente manera, primero actúa instantáneamente el regulador proporcional, mientras que el regulador integral actúa en un intervalo de tiempo.

Los valores de P e I, son modificables en una función de transferencia según las necesidades del sistema o del usuario.

En el presente proyecto se procederá encontrar los valores de P e I para las funciones de transferencia de una turbina hidráulica, térmica a vapor y térmica a gas a ser simuladas.

2.2.3.1.2 Característica hidráulica

La función de transferencia a considerar se la puede apreciar en la Figura 1.36., la cual muestra la característica de este tipo de turbina, basa su comportamiento en la apertura de la válvula que permite el ingreso de agua hacia la turbina provocando un cambio de potencia mecánica.

La variación producida es simulada en el software MATLAB R2015b y se puede observar en la Figura 2.16., el comportamiento de la turbina a simular para el presente proyecto.

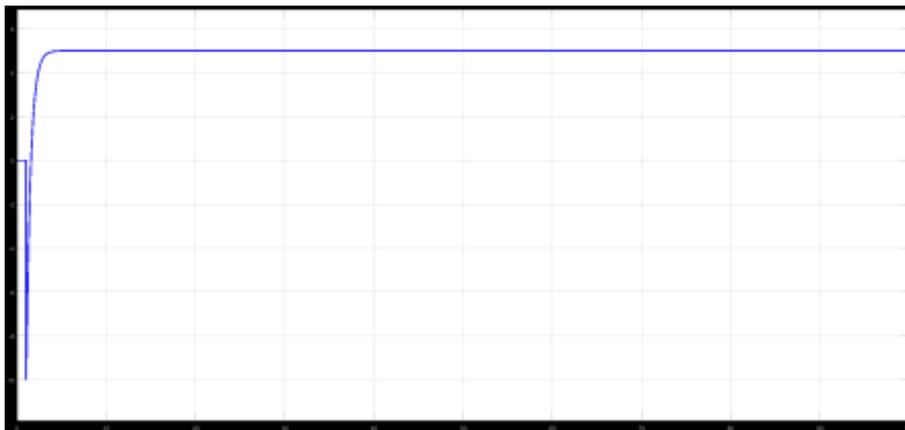


Figura 2.16. Respuesta de la función de transferencia de la turbina hidráulica.

El T_w para el ensayo es de 2 [s], para la obtención de la respuesta se aplica un escalón unitario en la posición de la válvula, en la apertura de la válvula se observa el cambio

de la potencia mecánica la cual se reduce inicialmente por la inercia del agua que provoca una pérdida de presión, luego de este transitorio la turbina va alcanzando estabilidad hasta llegar a la potencia mecánica esperada.

2.2.3.1.2.1 Sintonización

Para poder obtener un similar comportamiento de la turbina con la función de transferencia se la trata con la herramienta Tuned del software MATLAB R2015b y de esta manera poder obtener los valores del PI a ser colocados para simular cada función de transferencia.

En la Figura 2.17. se puede observar el tratamiento realizado a la función de transferencia, la cual está representada en línea entrecortada, mientras la curva tratada con Tuned se muestra en línea continua, la función tiene la posibilidad de mejorar en su tiempo de respuesta, esta puede ser más lenta o rápida. Siempre se debe mantener similar forma de la curva y en lo posible evitar empeorar la función de transferencia.

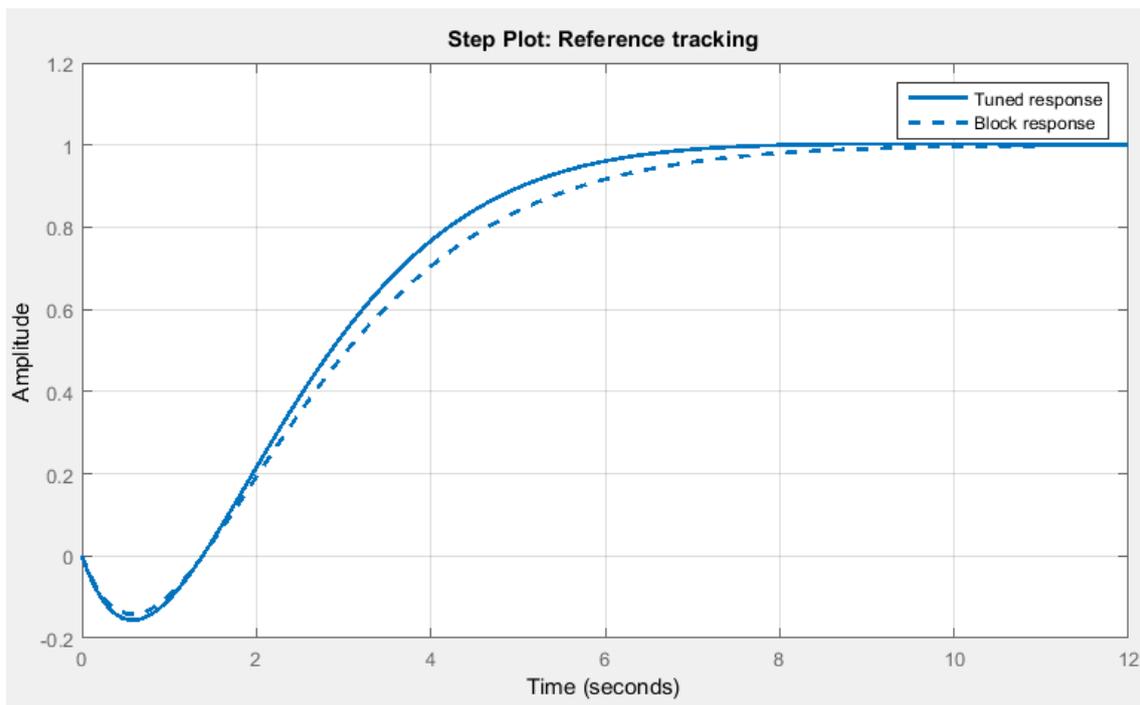


Figura 2.17. Tratamiento de la función de transferencia de la turbina hidráulica

Una vez tratada la función de transferencia de la turbina hidráulica, se obtienen los parámetros del controlador como se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Parámetros para el PI de la turbina hidráulica

Turbina Hidráulica		
	Tuned	Función de Transferencia
P	0,023976	0
I	0,013049	0,27998

2.2.3.1.3 Característica térmica a Vapor

La turbina a simular se aprecia en la Figura 1.38., esta central funciona gracias al almacenamiento de vapor a altas temperaturas y presiones, una vez que exista la apertura de la válvula que permite el flujo de vapor hacia la turbina, provocara el cambio de potencia mecánica como se puede apreciar en la simulación realizada en el software MATLAB R2015b.

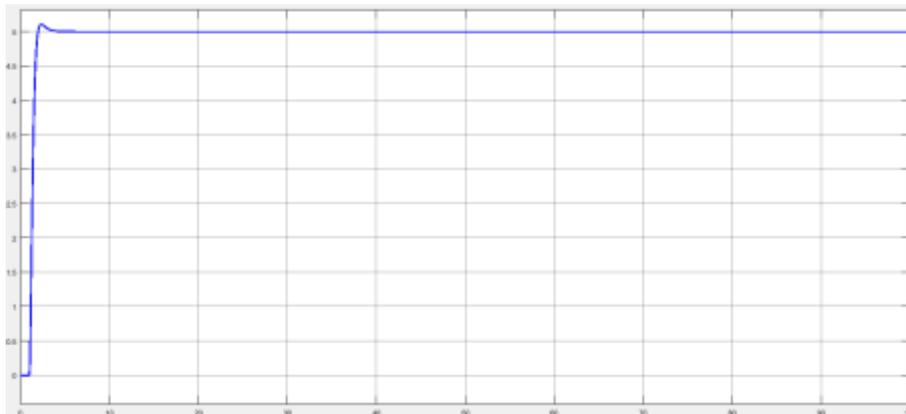


Figura 2.18. Respuesta de la función de transferencia de la turbina térmica a vapor

El valor de T_v usado para esta simulación es de 0,5 [s], en la obtención de la respuesta se aplica un escalón unitario en la posición de la válvula, la potencia mecánica cambia directamente con la apertura de la válvula.

2.2.3.1.3.1 Sintonización

La función de transferencia de la turbina térmica a vapor se la trata con la herramienta Tuned de software MATLAB R2015b y permite obtener los valores de P e I.

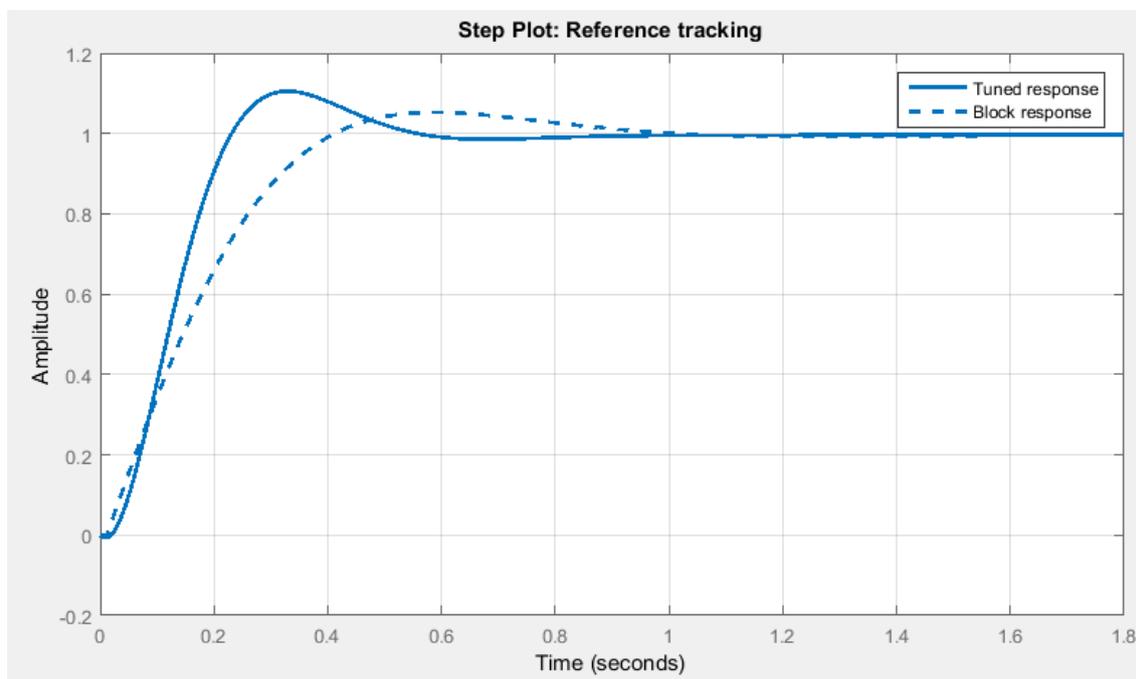


Figura 2.19. Tratamiento de la función de transferencia de la turbina térmica a vapor
 Tratada la función de transferencia de la turbina térmica a vapor, se obtiene los parámetros del controlador como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Parámetros para el PI de la turbina térmica a vapor

Turbina Térmica a Vapor		
	Tuned	Función de Transferencia
P	0,0292479724774384	0
I	0,0961618491067087	0,11017

2.2.3.1.4 Característica térmica a Gas

La turbina térmica a gas tiene un funcionamiento similar a una turbina a vapor, el cambio es el tiempo de respuesta, ya que es un poco lenta a diferencia del resto de turbinas térmicas.

La térmica a gas funciona por la quema de combustible fósil, el gas a altas temperaturas y presiones fluye hacia la turbina generando movimiento de la turbina y produciendo potencia mecánica que es aprovechada por el generador.

La función de transferencia se muestra en la Figura 1.40. y es simulada en el software MATLAB R2015b y se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 2.20.

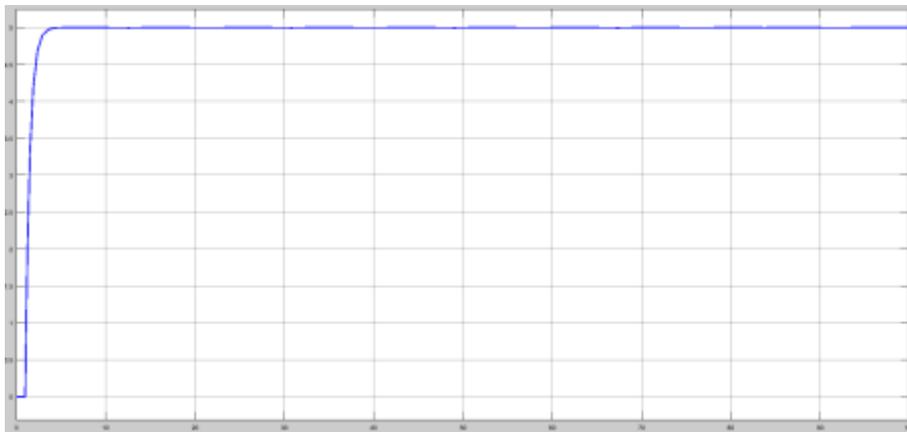


Figura 2.20. Respuesta de la función de transferencia de la turbina térmica a gas

Los valores tomados para la simulación de la función de transferencia son los siguientes:

$T1=0,6$ [s], $T2=0,5$ [s], $T3=0,01$ [s] y $T4=0,24$ [s], para esta función se aplica un escalón unitario y se obtiene la respuesta de la turbina.

2.2.3.1.4.1 Sintonización

De igual forma que se ha realizado para las turbinas anteriores para obtener los parámetros de P e I, esta función de transferencia es tratada con la herramienta Tuned del software MATLAB R2015b y se obtienen los datos mostrados en la Tabla 2.7. y la sintonización en la Figura 2.21.

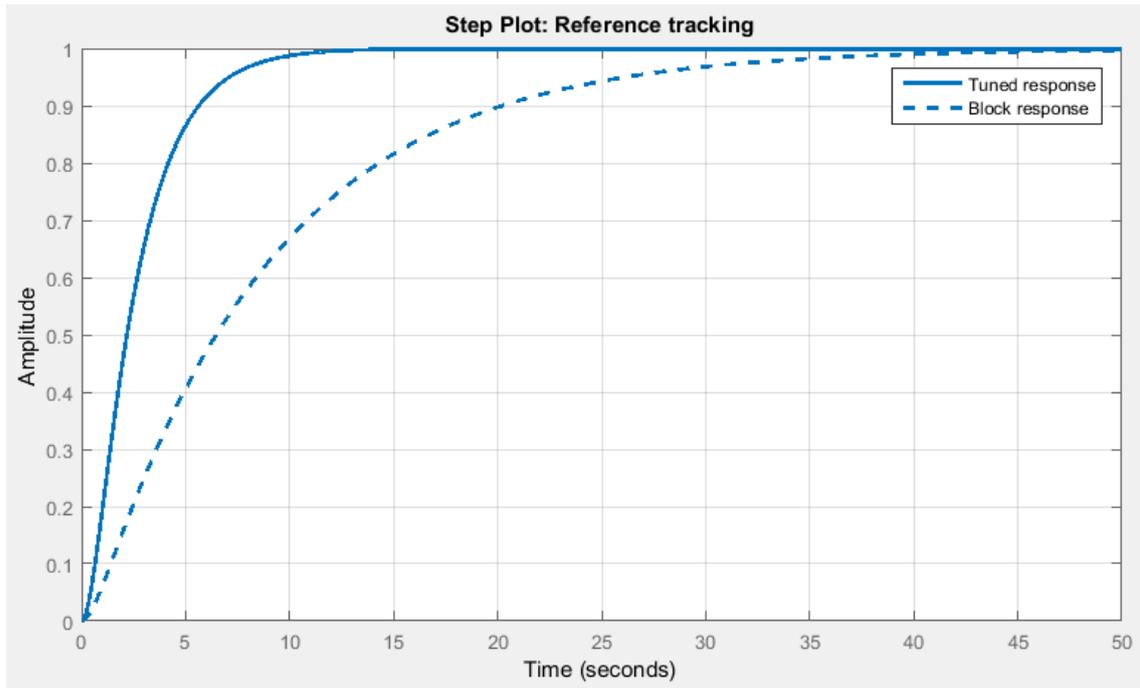


Figura 2.21. Tratamiento de la función de transferencia de la turbina térmica a gas

Tabla 2.7. Parámetros para el PI de la turbina térmica a gas

Turbina Térmica a Gas		
	Tuned	Función de Transferencia
P	0,021989	2,04976952000736
I	0,016526	6,65551180821384

2.2.3.2 Software de medición

2.2.3.2.1 Medición de velocidad angular

Para la medición de la velocidad angular se utiliza el encoder rotacional SELET SI063, que genera la señal de entrada al bloque para lectura del encoder dentro del software MATLAB.

La señal que genera el encoder está compuesta por los canales A y B, los cuales están conectados a los pines A8 y E11 de la tarjeta STM32.

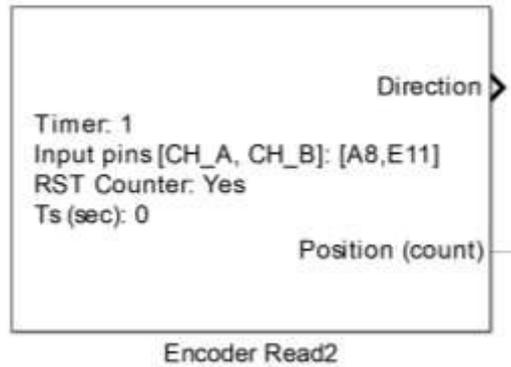


Figura. 2.22. Bloque de lectura del encoder

La señal de salida del bloque de lectura del encoder muestra valores en bits, por lo cual, para mostrar la medida real de la velocidad angular de rotación, se debe realizar el procesamiento matemático de la señal.

Tabla 2.8. Tabla de datos en bits y velocidad angular real de la máquina motriz.

Datos Velocidad angular	
Bits	rpm
3764	270
3755	260
3491	550
3432	640
3310	760
3232	830
3210	850
3045	1030
3038	1040
2984	1110
2926	1180
2845	1260

Los valores reales de velocidad angular se obtuvieron mediante el uso de un tacómetro analógico.

Mediante el uso de los datos en bits y reales correspondientes a la velocidad angular, se realiza un gráfico en Excel el cual nos muestra la relación lineal que existe entre el valor en bits y el valor real.

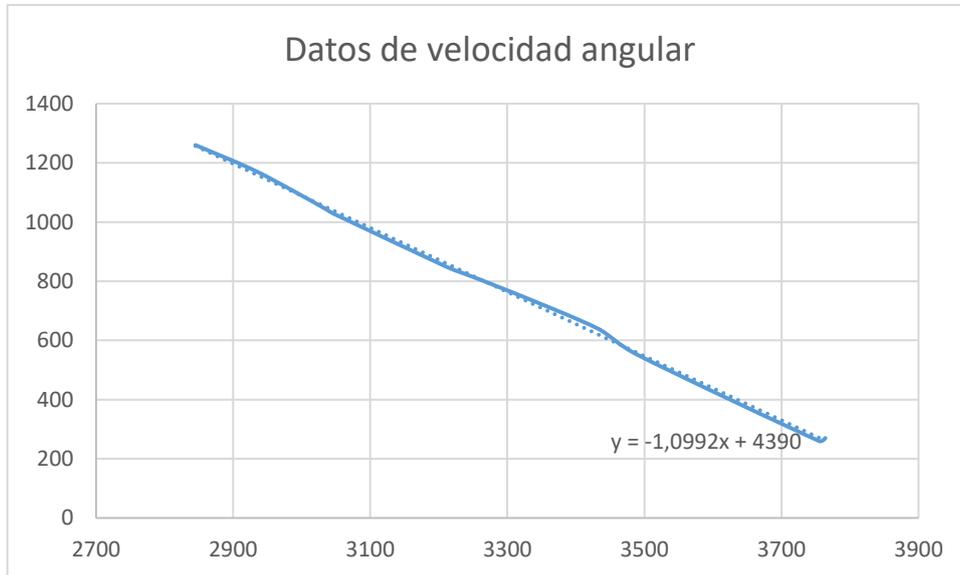


Figura 2.23. Datos en bits vs Datos reales (velocidad angular)

Luego de obtener gráficamente la relación, se obtiene la ecuación matemática que se utiliza dentro de MATLAB, mediante el uso de Excel se realiza la aproximación lineal de la tendencia de los datos y además se muestra la ecuación matemática resultante que define la relación lineal del valor en bits y los valores reales de velocidad angular.

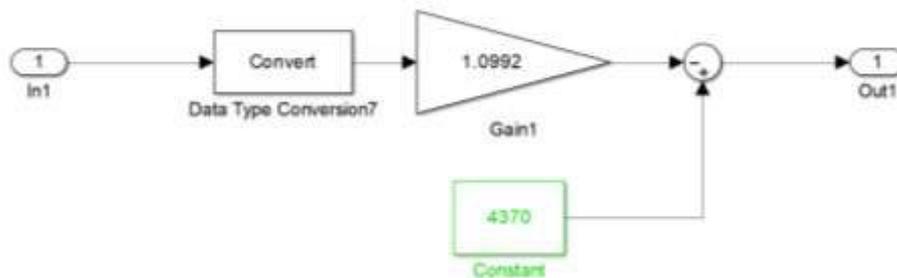


Figura 2.24. Representación de la ecuación en MATLAB para velocidad angular

Habiendo obtenido la ecuación que relaciona los valores en bits y reales de la velocidad angular, se realiza su ingreso al archivo en MATLAB que posteriormente será enviado a la

tarjeta de control STM32, para mostrar el valor real de la velocidad angular en la pantalla de la interfaz gráfica del GOV.

2.2.3.2.2 Medición de voltaje

La señal de voltaje de la maquina motriz se obtiene del circuito optoacoplador integral lineal HCNR200 y el divisor de voltaje alimentado por el voltaje de armadura. El pin PA1 de la tarjeta STM32 obtiene la lectura en bits del voltaje del motor y el bloque de lectura ingresa los datos al archivo de MATLAB para realizar el correspondiente procesamiento.

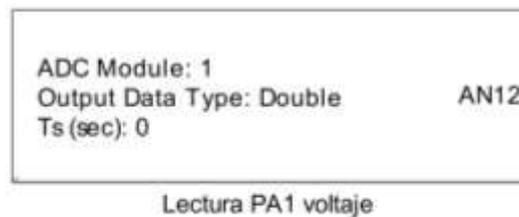


Figura. 2.25. Bloque de lectura de Voltaje

Para hallar la ecuación que relaciona el valor de voltaje en bits y el valor real, se determina los valores reales de voltaje de la armadura usando un voltímetro digital.

Tabla. 2.9. Datos en bits y datos reales de voltaje del motor de corriente continua

Bits	V [V]
95	141,1
124	142
193	144,3
285	148,8
351	151,9
373	152,7

En Excel se realiza el gráfico de los datos en bits y reales del voltaje del motor de corriente continua, el mismo que muestra que existe variación lineal entre los datos en bits y reales, por lo que se obtiene la ecuación lineal de tendencia de los datos.

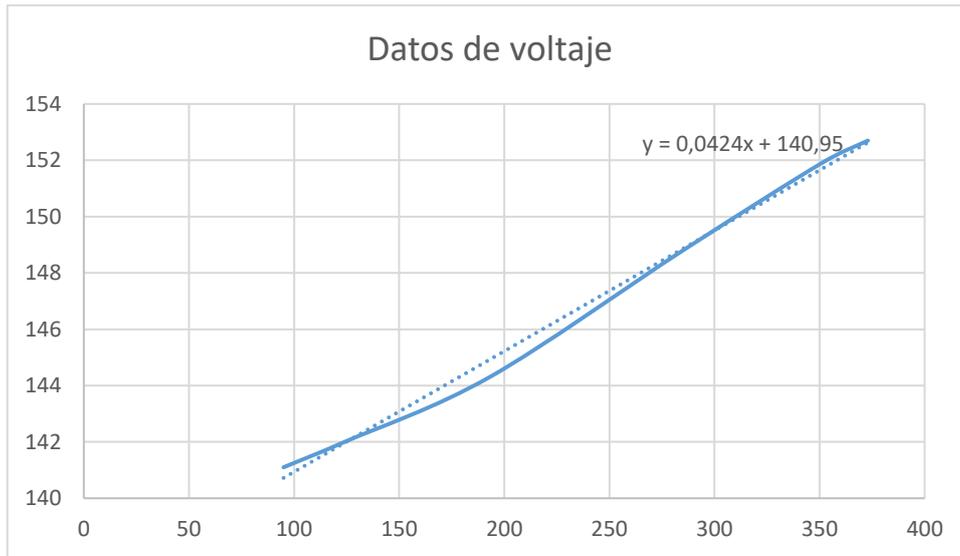


Figura 2.26. Datos en bits vs datos reales (Voltaje)

La ecuación que se obtuvo anteriormente para los datos de voltaje del motor de corriente continua se añade al archivo de MATLAB mediante el diagrama bloques mostrado a continuación.

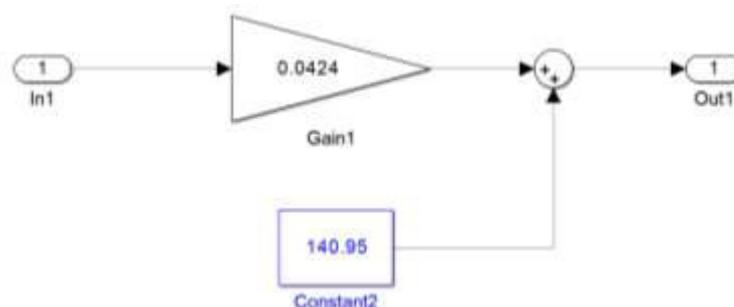


Figura 2.27. Representación de la ecuación en MATLAB para Voltaje

Luego del tratamiento matemático de los datos de voltaje, se obtiene el valor real de voltaje del motor de corriente continua, el cual se muestra en la interfaz gráfica a la salida de la tarjeta de control STM32.

2.2.3.2.3 Medición de corriente

La señal de corriente del motor de corriente continua se obtiene del sensor ACS758. El pin PC2 de la tarjeta STM32 obtiene la lectura en bits de la corriente del motor y el bloque de lectura ingresa los datos al archivo de MATLAB para realizar el correspondiente procesamiento.

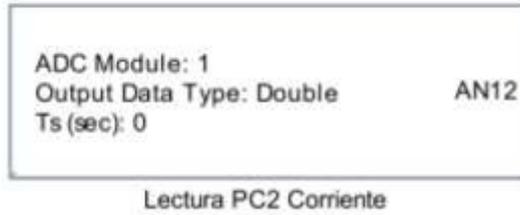


Figura. 2.28. Bloque de lectura de Corriente

Para poder encontrar la relación matemática que existe entre los valores en bits y los valores reales de corriente, se ha obtenido los datos reales mediante el uso de la pinza amperimétrica digital.

Tabla. 2.10. Datos en bits y datos reales de la corriente del motor de corriente continua

Bits	I [A]
95	4,55
124	5,31
193	7,49
285	10,22
351	11,76
373	12,72

En Excel se realiza el gráfico de los datos en bits y reales de la corriente del motor de corriente continua, el mismo que muestra que existe variación lineal entre los datos en bits y reales, por lo que se obtiene la ecuación lineal de tendencia de los datos.

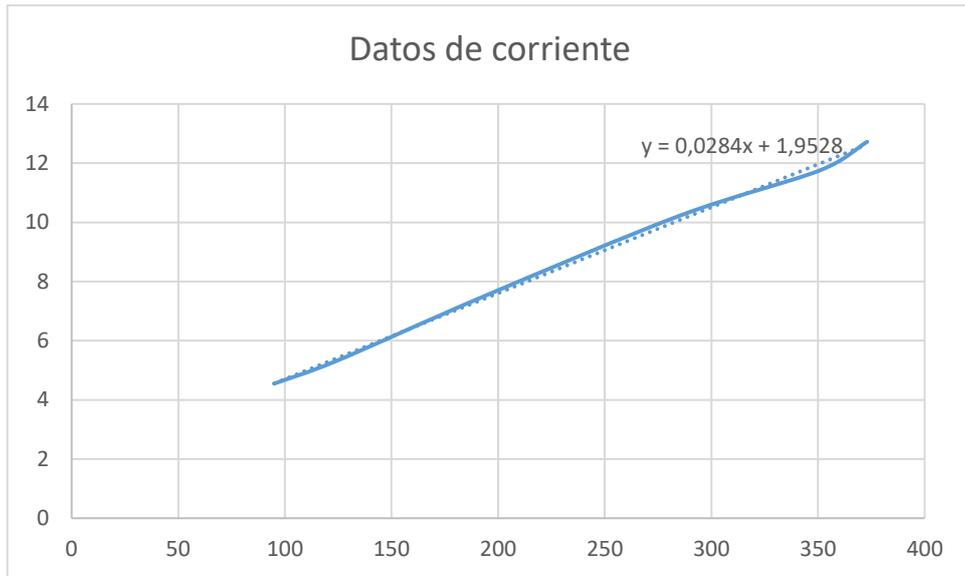


Figura 2.29. Datos en bits vs datos reales (Corriente)

La ecuación que se obtuvo anteriormente para los datos de corriente del motor de corriente continua se añade al archivo de MATLAB mediante el diagrama bloques mostrado a continuación.

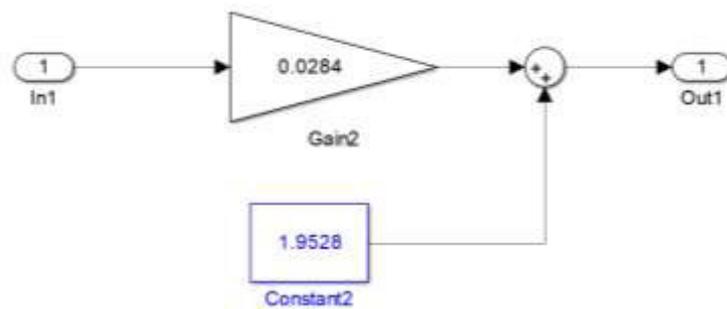


Figura 2.30. Representación de la ecuación en MATLAB para Corriente

Luego del tratamiento matemático de los datos de corriente, se obtiene el valor real de corriente del motor de corriente continua, el cual se muestra en la interfaz gráfica a la salida de la tarjeta de control STM32.

2.2.3.3 Limitadores y protecciones

2.2.3.3.1 Sobrevoltaje

La protección de sobrevoltaje utiliza el valor de voltaje real de la armadura del motor de corriente continua, el cual mediante la comparación con el set point definido por el usuario crea una señal de error cuando el voltaje excede el límite, apagando el sistema controlado por el GOV. La señal de error es 1 para funcionamiento normal y cambia a 0 cuando el voltaje excede el límite permitido. El límite de voltaje este definido en 200 V.

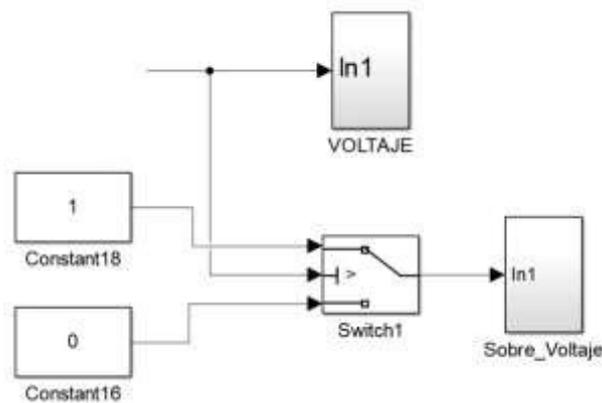


Figura 2.31. Diagrama de bloques Sobrevoltaje

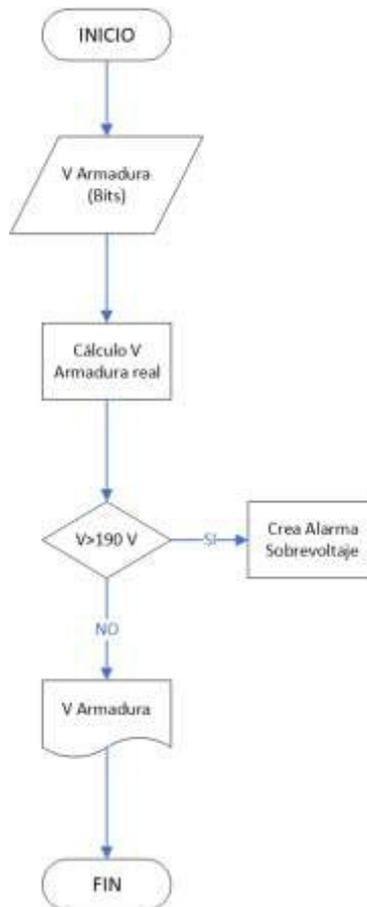


Figura 2.32. Diagrama de flujo Sobrevoltaje

En la Figura 2.33. se puede observar que la medición de voltaje cuenta con un valor umbral ajustable de voltaje de armadura, el cual al ser superado crea una señal de error de funcionamiento que hace que la maquina motriz detenga su funcionamiento para evitar daños al sistema eléctrico y electrónico del regulador de velocidad.

2.2.3.3.2 Sobrecorriente

La protección de sobrecorriente utiliza el valor real de corriente en la armadura del motor de corriente continua, el mismo que compara con el set point definido por el usuario creando una señal de error cuando la corriente excede el límite, apagando inmediatamente el sistema. La señal de error es 1 para funcionamiento normal y cambia a 0 cuando la corriente sobrepasa el límite definido. El límite de corriente este definido en 30 A.

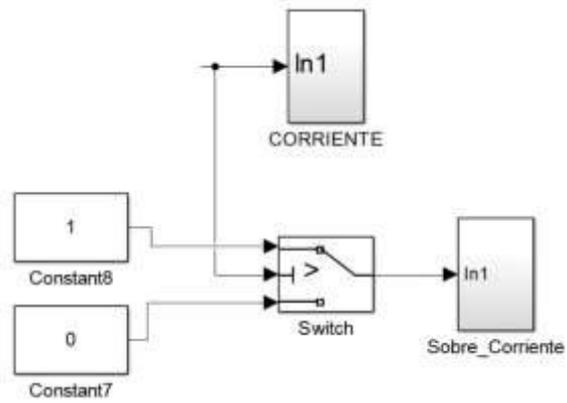


Figura 2.33. Diagrama de bloques Sobrecorriente

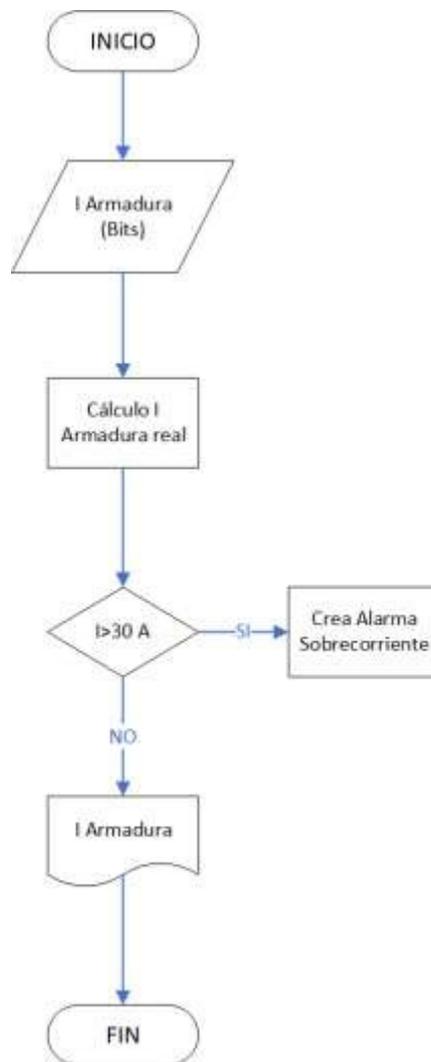


Figura 2.34. Diagrama de flujo Sobrecorriente

En la Figura 2.34. se puede observar que la medición de corriente cuenta con un valor umbral ajustable de corriente de armadura, el cual al ser superado crea una señal de error de funcionamiento que hace que la maquina motriz detenga su funcionamiento para evitar daños al sistema eléctrico y electrónico del regulador de velocidad.

2.2.3.3.3 Campo

El error de campo basa su funcionamiento en el estado del puerto B de la tarjeta de control STM32. El puerto B permanece en estado cerrado en funcionamiento normal cuando existe voltaje de campo y cambia a estado abierto cuando hay ausencia de voltaje de campo en la máquina motriz. La falla de campo crea una señal de error en la variable B7, la cual impide el encendido del sistema si no existe voltaje de campo, o si el error se presenta durante el funcionamiento normal del sistema, apaga inmediatamente la maquina motriz.

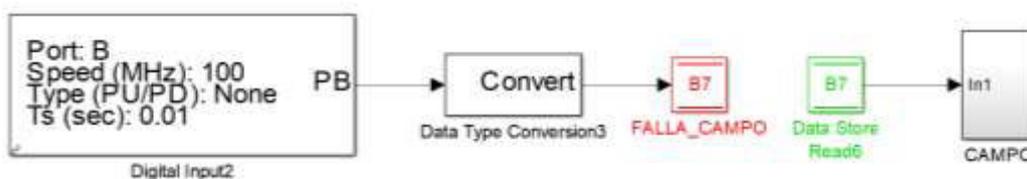


Figura 2.35. Diagrama de bloques error de campo

2.2.3.3.4 Fase

El error de fase funciona dependiente del estado del puerto C de la tarjeta de control STM32. El puerto C permanece en estado cerrado en funcionamiento normal cuando el estado de las tres fases de alimentación es correcto y cambia a estado abierto cuando hay ausencia de voltaje en alguna de las fases de alimentación de la máquina motriz. La falla de fase crea una señal de error en la variable F, la cual impide el encendido del sistema si no existe voltaje de alimentación de las tres fases del sistema y si el error se presenta durante el funcionamiento normal de la máquina motriz, apaga inmediatamente el sistema.

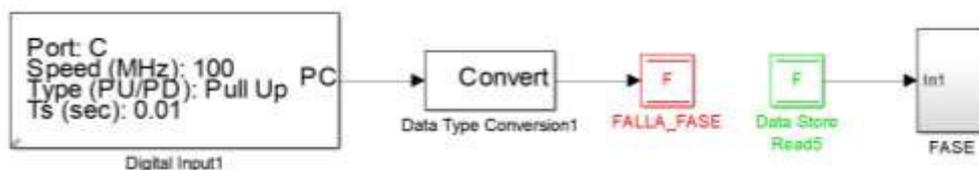


Figura 2.36. Diagrama de bloques error de fase

2.2.3.4 Interfaz gráfica



Figura. 2.37. Interfaz gráfica GOV

Dentro de la interfaz gráfica se muestra los tres modos de funcionamiento del GOV (Hidro, Vapor y Gas) entre los cuales se escoge mediante el botón MODO.

El bloque correspondiente a las alarmas del sistema muestra el estado de los limitadores y protecciones del GOV, los cuales permiten o impiden el encendido del sistema en condiciones normales, o apagan el sistema cuando existe algún indicador de funcionamiento incorrecto del campo, las fases del sistema o cuando se exceden los límites de corriente o voltaje de la armadura del motor de corriente continua.

Habiendo elegido el modo de funcionamiento y cuando el estado de los limitadores y protecciones sea el correcto, el botón ON_OFF permite el encendido y apagado del sistema.

En la interfaz gráfica también se puede visualizar en tiempo real la medición de la velocidad angular, voltaje y corriente de armadura de la máquina motriz.

2.2.3.5 Adquisición de datos

Para la adquisición de datos de la velocidad angular del motor se utilizará la interfaz de Visual Basic 6.0, dentro de la cual se muestra: el tipo de turbina simulada, la velocidad angular en tiempo real además de los botones de inicio y stop que permiten generar un archivo de Excel que contendrá los datos de velocidad angular en rpm del motor de corriente continua.



Figura. 2.38. Interfaz gráfica Visual Basic

El bloque mostrado en la siguiente figura corresponde al archivo de MATLAB, el mismo que habilita el puerto serial de la tarjeta STM32, permitiendo obtener los valores de velocidad angular y el tipo de turbina que se encuentra simulando dentro del GOV.

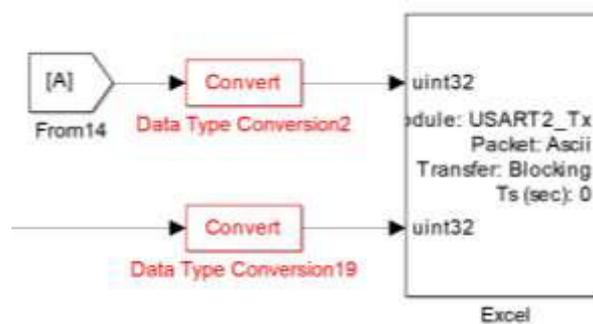


Figura. 2.39. Interfaz gráfica Visual Basic

El bloque cuenta con dos entradas al bloque, la variable que mide la velocidad angular de la maquina motriz y la variable [A] que determina el tipo de turbina que se está simulando.

2.2.4 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD

En esta etapa se obtiene los parámetros de voltaje, corriente y velocidad nominal del motor de corriente continua, en condiciones de vacío y a plena carga, con las condiciones obtenidas se procede a la construcción de circuitos indispensables para el Sistema Automático de Regulación de Velocidad. Los valores adquiridos de voltaje y corriente

permiten obtener elementos electrónicos y electrónicos de potencia para realizar las etapas de control y potencia.

2.2.4.1 Elementos constitutivos de la etapa de control

Dentro de la construcción de la etapa de control se describen el circuito de disparo para los tiristores del puente rectificador controlado y el circuito donde se conectará la tarjeta de control STM32.

2.2.4.1.1 Circuito de disparo de tiristores

El circuito de disparo de tiristores se encarga de detectar el cruce por cero de las ondas de voltaje del sistema trifásico de alimentación, para después dependiendo de la potencia que requiera el motor ir regulando el voltaje de alimentación hacia la armadura, mediante el disparo coordinado de los seis tiristores que forman el puente de tiristores. La placa del circuito tiene las señales de disparo para los seis tiristores del rectificador controlado (A+, B+, C+, A-, B-, C-) y la conexión común Co del puente rectificador. El circuito de disparo además cuenta con la conexión de 12V que requieren los tiristores para su disparo.

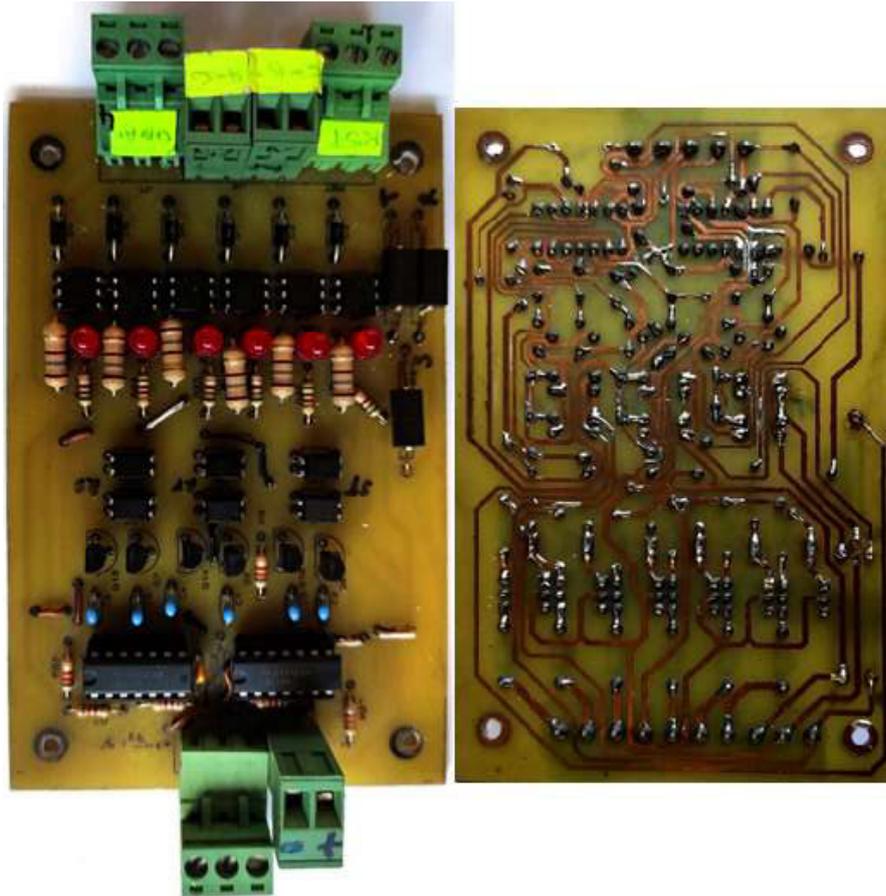


Figura 2.40. Circuito de disparo de tiristores

2.2.4.1.2 *Circuito para tarjeta de control STM32*

Este circuito tiene la función de servir como base para la tarjeta de control STM32, además de ser el circuito de conexión entre las señales de medición y control del motor, y la tarjeta STM32. El circuito tiene como entradas las señales de velocidad que brinda el encoder rotativo, las mediciones de voltaje de armadura, corriente de armadura y señales de protección de voltaje y corriente. Y como salidas cuenta con la señal de control que regula el disparo de los tiristores y la conexión a la interfaz gráfica que muestra los datos de funcionamiento de la maquina motriz.

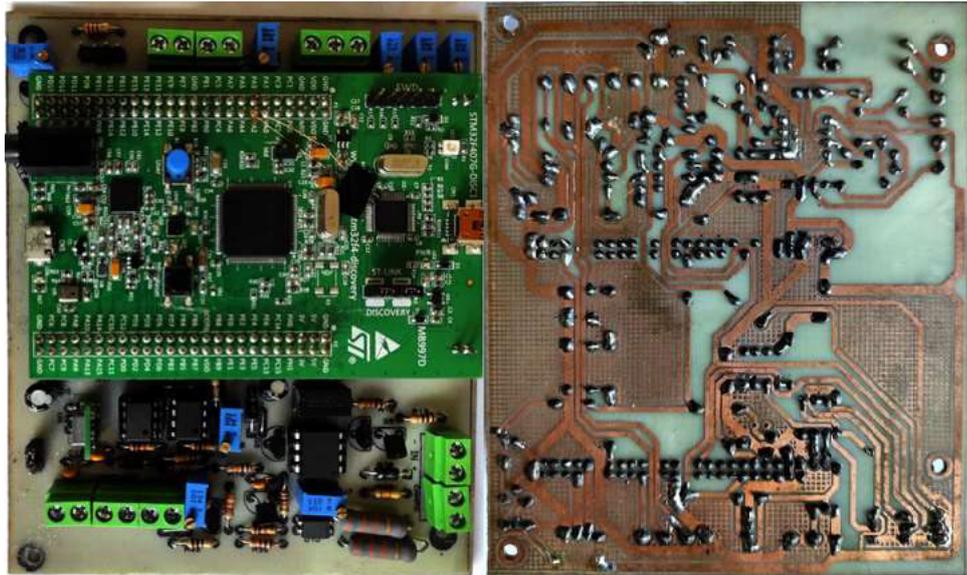


Figura 2.41. Circuito para tarjeta de control STM32

2.2.4.1.3 *Sensor de voltaje*

Para la medición del voltaje de armadura se utiliza el circuito optoacoplador integral de carácter lineal HCNR200, el sensor de voltaje se ubica sobre la placa de control de la tarjeta STM32 y se conecta a la tarjeta mediante las pistas del circuito impreso.

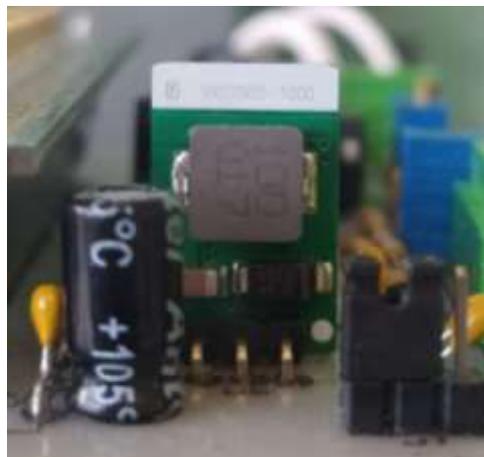


Figura 2.42. Sensor de voltaje de armadura

La señal de voltaje se reduce a escala 5V para poder ser interpretada por la tarjeta de control, y posteriormente el dato se muestra en la interfaz gráfica del regulador de velocidad.

2.2.4.1.4 *Sensor de corriente*

La medición de corriente de armadura en el motor se la realiza mediante el uso del sensor análogo ACS758, el cual mide la corriente y transmite la señal a la tarjeta de control STM32, para luego de su tratamiento matemático determinar el valor real de la corriente que circula en la armadura de la maquina motriz.

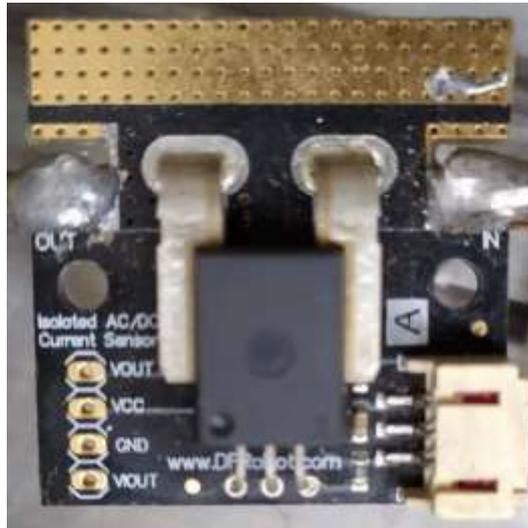


Figura 2.43. Sensor de corriente

2.2.4.1.5 *Encoder rotativo incremental*

El encoder rotativo se coloca sobre el eje del motor de corriente continua por lo que es indispensable la construcción de un soporte que se sujeta a la armadura de la máquina para de este modo garantizar la correcta colocación del encoder durante el funcionamiento de la maquina motriz.



Figura 2.44. Estado inicial de la Armadura y eje de la Máquina Motriz

El soporte metálico está compuesto de un acople metálico que se atornilla sobre el eje del motor para unirse al encoder, postes metálicos circulares y la placa metálica circular sobre la cual se coloca el encoder rotativo.

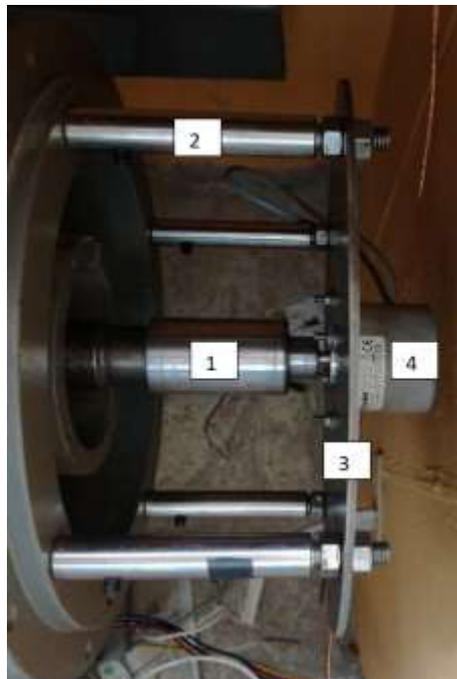


Figura 2.45. Montaje Encoder Rotativo Incremental

Tabla 2.. Partes del montaje para el encoder rotativo incremental

1	Acople Eje Motor – Encoder
2	Postes de sujeción
3	Lámina metálica circular
4	Encoder rotativo

2.2.4.1.6 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica está compuesta por la pantalla Nextion, tipo LCD táctil de 3,5 pulgadas y la tarjeta STM32 que brinda los datos de funcionamiento de la máquina motriz.

La interfaz gráfica muestra las mediciones de velocidad angular del motor, el voltaje y corriente de armadura, además del estado de las protecciones de voltaje y corriente con las que cuenta el GOV.

La interfaz gráfica es una terminal bidireccional de recepción y entrega de datos, ya que en la misma se elige el tipo de turbina que se simula y se da la señal ON/OFF que hará que el motor funcione mediante la acción del regulador de velocidad.



Figura 2.46. Montaje de la interfaz gráfica

La conexión de la pantalla se realiza mediante 4 pines hacia la tarjeta de control de la STM32, dos de los pines servirán de alimentación a la pantalla y los dos pines restantes

son usados para el envío y recepción de datos, desde y hacia el regulador de velocidad correspondientemente.

2.2.4.2 Elementos constitutivos de la etapa de potencia

En esta sección se describen los componentes de la etapa de potencia del regulador de velocidad, tomando en cuenta los circuitos que alimentaran el campo y la armadura del motor de corriente continua.

2.2.4.2.1 Rectificador AC/DC no controlado (Campo)

Dentro del sistema de regulación de velocidad de la maquina motriz se requiere alimentar el campo del motor de corriente continua, por lo que se utilizó un puente de diodos no controlado KBPC5010, el cual recibe voltaje de dos fases 220 V, y lo rectifica para obtener voltaje continuo de 190 V para el campo.

El montaje se lo realiza sobre el armazón del GOV que sirve además de disipador de calor para los elementos electrónicos.



Figura 2.47. Puente rectificador monofásico no controlado

2.2.4.2.2 Rectificador AC/DC controlado (Armadura)

La alimentación de la armadura del motor se la realiza mediante la construcción de un puente de tiristores totalmente controlado. El puente de tiristores está compuesto de tres

módulos semiconductores comerciales, cada uno de los cuales cuenta con dos tiristores en su interior.

La conexión principal de alimentación de voltaje trifásico proviene de la red conectada a las borneras colocadas sobre la armazón del GOV, cada módulo de tiristores requiere de dos señales de disparo para cada una de las compuertas de los tiristores que se encuentran en su interior, formando en conjunto el puente rectificador de seis pulsos completamente controlado.

Las terminales de corriente continua del puente de tiristores se conectan a las borneras sobre el armazón del GOV, las cuales son conectadas a la armadura del motor. Cabe recalcar que al tratarse de corriente continua se debe tomar en cuenta al momento de realizar las conexiones la polaridad de cada terminal que será conectado a la armadura.

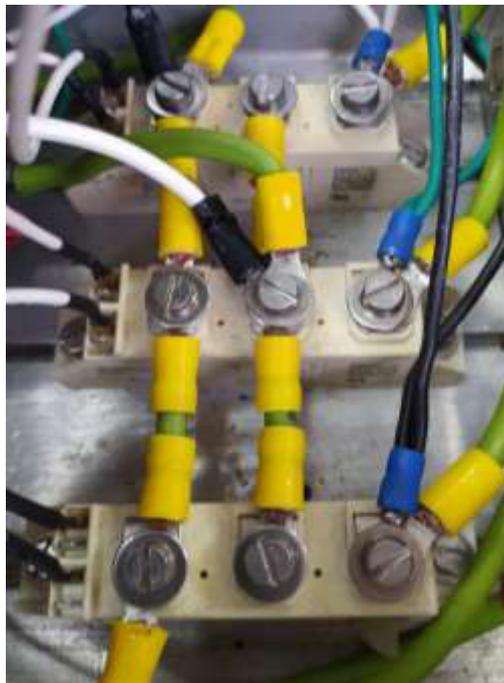


Figura 2.48. Puente rectificador trifásico controlado de seis pulsos

2.2.4.3 Construcción del módulo para el GOV

El módulo del regulador de velocidad está construido sobre un armazón de aluminio y acrílico que garantiza la suficiente solidez para el módulo, para una segura utilización.

Las conexiones de voltaje trifásico hacia el módulo se realizan utilizando conectores de perno partido de cobre para garantizar una correcta conexión y evitar el calentamiento de los conductores durante el funcionamiento del GOV.



Figura 2.49. Conexión trifásica del GOV

Las salidas de alimentación del regulador de velocidad para el campo y armadura del motor de corriente continua están constituidas por terminales de cobre de tipo perno partido, y se debe tener en cuenta para su conexión la polaridad de los terminales ya que se trata de voltaje continuo.

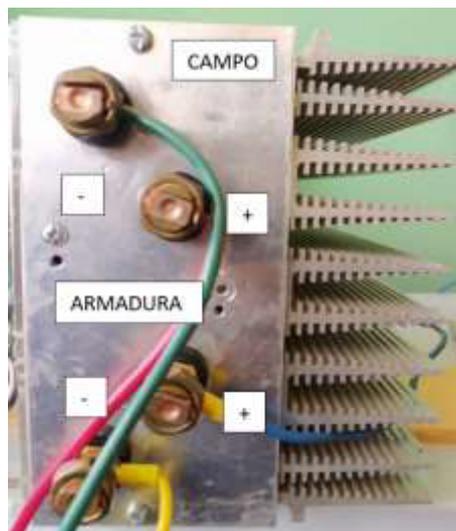


Figura 2.50. Terminales para Campo y Armadura del GOV

El módulo del regulador de velocidad cuenta con un conector de seis pines colocado sobre el armazón de acrílico, el cual cuenta con 4 conductores correspondientes al encoder rotativo y 2 conductores de alimentación de 12V DC hacia la placa de control del GOV.



Figura 2.51. Conexión de alimentación y encoder del GOV

A continuación, se muestra la figura correspondiente al módulo del GOV con sus respectivos componentes.

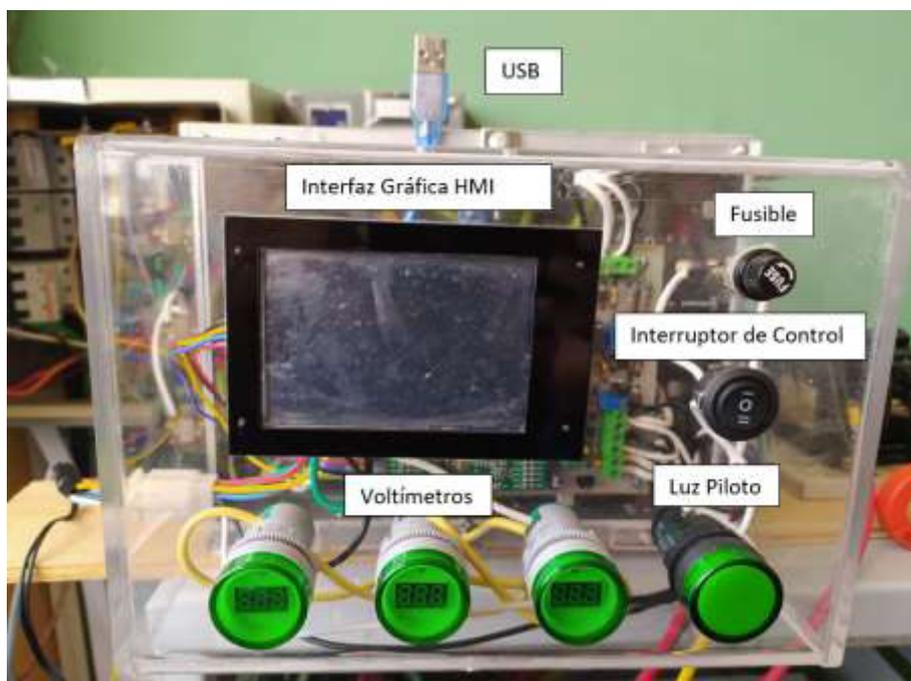


Figura 2.52. Módulo regulador de velocidad GOV

El módulo GOV consta de tres medidores digitales de voltaje fase – fase, luz piloto del circuito de control, fusible de protección para la tarjeta de control, interruptor del circuito controlador, la interfaz gráfica que será el punto de interacción entre el usuario y el regulador de velocidad y los conectores laterales de tipo perno partido para las conexiones de campo y armadura del motor, y la alimentación trifásica de entrada del GOV.

3. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Terminada la construcción y calibración del Regulador Automático de Velocidad para condiciones de variación de carga en los terminales del generador sincrónico, se inician las pruebas de funcionamiento en condiciones de vacío (motor de corriente continua acoplado al eje con el generador), a plena carga (generador sincrónico en funcionamiento), salidas y entradas abruptas de carga e ingreso en paralelo con la E.E.Q,

Las pruebas de funcionamiento han permitido que los controladores de las diferentes turbinas mantengan la frecuencia en 60 Hz, ante variaciones de carga en la red o en el caso de salidas o entradas abruptas de cargas, y estabilizar la frecuencia en los tiempos establecidos por cada función de transferencia de las turbinas usadas.

Para verificar el funcionamiento eficiente del regulador, se realizan diversas pruebas a cada uno de los modelos de turbinas a ser simuladas.

3.1 REGULACIÓN DE VELOCIDAD CON TURBINA HIDRÁULICA

El control de la frecuencia es punto sustancial en la generación de energía eléctrica, las variaciones de frecuencia deben ser corregidas automáticamente durante todo el proceso mejorando la confiabilidad y operatividad de una central. Los controladores de tipo PI tienen un amplio espectro de aplicación a nivel experimental, comercial e industrial, por lo que se decidió emplearlo en el diseño del sistema de regulación de velocidad del presente proyecto.

El controlador de la turbina hidráulica está facultado para corregir las variaciones de frecuencia que aparecen cuando existen alteraciones de carga en el transcurso del tiempo, el controlador simula de forma más cercana los efectos que se podrían suscitar en una central real, para corregir la frecuencia y establecerla a condiciones normales de 60 Hz.

Para la verificación y eficiencia del regulador, se realizan diversas pruebas a cada uno de los modelos de turbinas a ser simuladas.

3.1.1 PRUEBA EN VACÍO

Esta prueba se la realiza encendiendo el motor de corriente continua acoplado mediante su eje al generador sincrónico, y observar que el motor llegue a la velocidad de 1200 rpm y se mantenga constante a esta velocidad, lo cual nos indica que se tiene una frecuencia de 60 Hz.

En la Figura 3.1., se observa el encendido del motor de corriente continua hasta alcanzar la velocidad de 1200 rpm, la cual se mantiene constante en el transcurso del tiempo de la prueba.

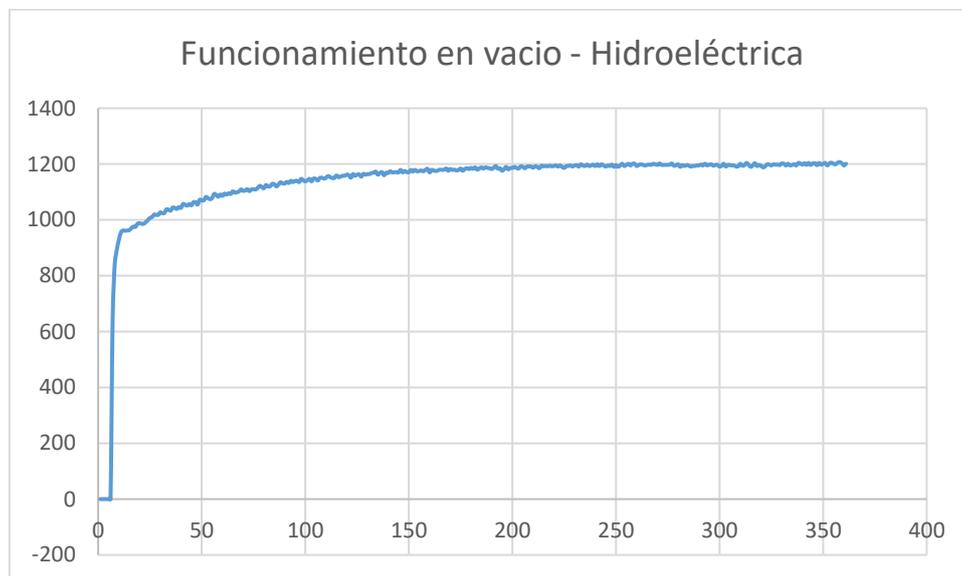


Figura 3.1. Funcionamiento de la turbina hidráulica.

3.1.2 PRUEBA CON PASOS DE CARGA

Esta prueba inicia con el arranque del motor de corriente continua en vacío hasta llegar a frecuencia nominal, paso seguido se conecta la excitatriz del generador sincrónico, el cual abastece de energía eléctrica para alimentar las cargas, se usó el módulo de carga resistiva del Laboratorio de Maquinas Eléctricas.

Mediante los equipos de medición necesarios se debe asegurar que los niveles generados de voltaje sean adecuados para abastecer la carga.

El control de la frecuencia del grupo motor – generador estará a cargo del sistema de regulación de velocidad, el cual mantendrá la frecuencia en rangos admisibles para la operación del sistema, que en el caso ecuatoriano es de 60 Hz.

De acuerdo a la Regulación de CONELEC – 006/00, permite la operación de un generador en un rango de frecuencia admisible entre 59 y 61 Hz sin límite de tiempo.

Para operar en Regulación Primaria de Frecuencia (RPF), el generador se debe encontrar dentro de la banda de frecuencia de referencia en operación normal de 60 Hz +/- 0,15 Hz, cumpliendo este requisito no tendrá ningún tipo de limitación para operar.

En la Figura 3.2. se aprecia la franja de frecuencia que se obtiene del regulador operando en condiciones normales y cumple lo estipulado por CONELEC, para la operación normal del generador, el rango de frecuencia que se tiene es de +/- 0,15 Hz respecto a la frecuencia nominal, lo cual permite al generador poder participar en la RPF y generar energía eléctrica sin límite de tiempo.

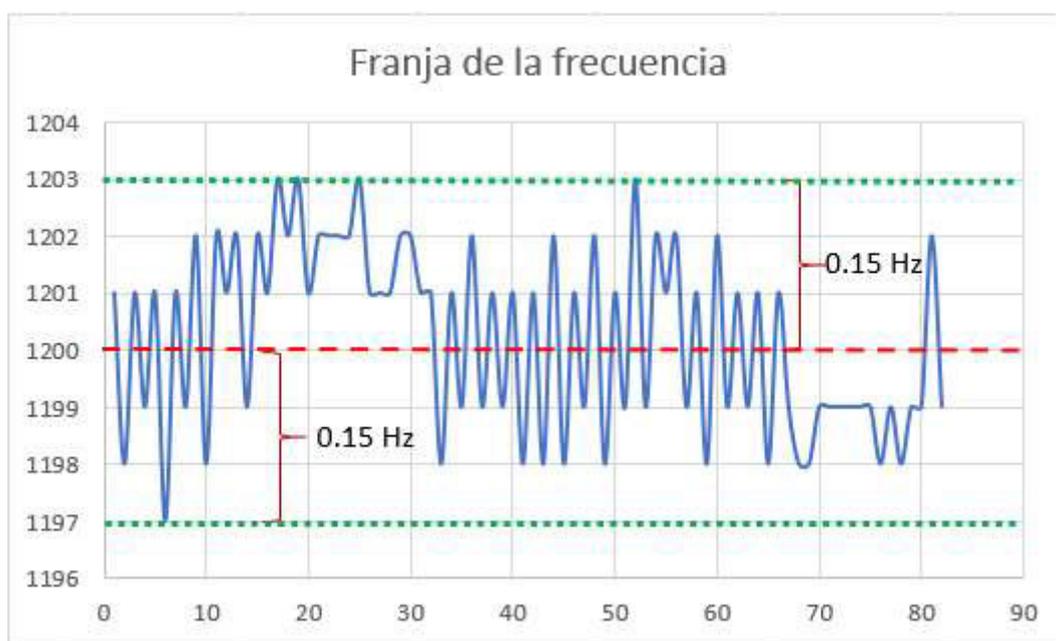


Figura 3.2. Franja de frecuencia en operación normal

En la Figura 3.3., se puede apreciar el ingreso y salida de carga, esta prueba se realizó con cuatro pasos de carga, y se puede observar que, tras cada paso realizado, la frecuencia eléctrica vuelve a su valor nominal.

Inicialmente se dan los pasos de ingreso de carga y se puede evidenciar como la velocidad disminuye, por lo que el controlador de la turbina hidráulica actúa y lleva al grupo motor – generador a frecuencia nominal, una vez efectuados todos los pasos de carga, se realiza la desconexión de carga pudiendo observar claramente un aumento de la velocidad y como en el caso de ingreso de carga el controlador actúa, para que el sistema pueda volver a frecuencia nominal.

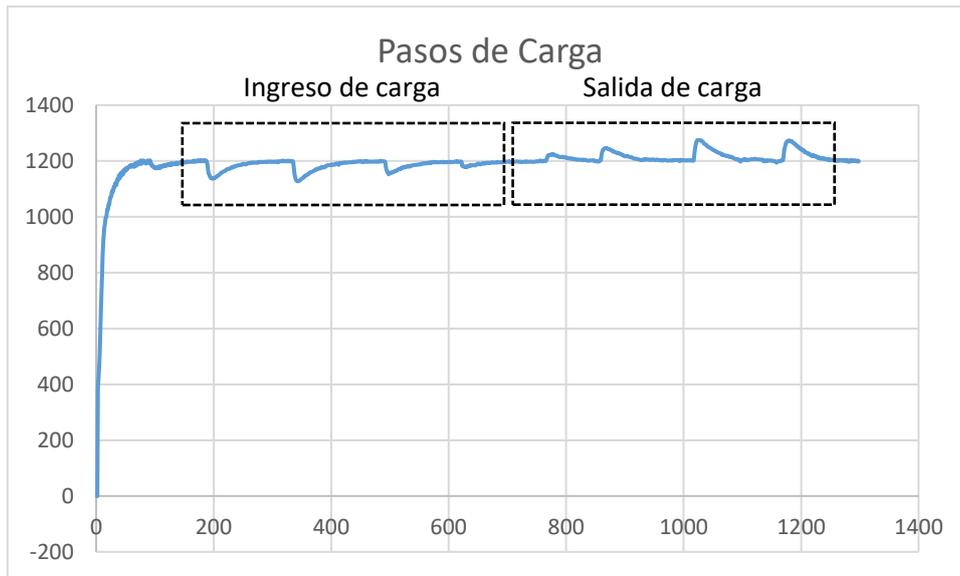


Figura 3.3. Pasos de carga con la turbina hidráulica

3.1.3 PRUEBA DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN ABRUPTA DE CARGA

En la realización de esta prueba se procede a la conformación del SEP completo que está compuesto por los transformadores LTC, PST, transformador trifásico con servicios auxiliares, transformador delta abierto, las líneas de transmisión transpuesta y no transpuesta y el módulo de carga.

Una vez realizado el armado del SEP como se muestra en la Figura 3.4., se inicia la generación por parte del grupo motor – generador el cual se encarga del abastecimiento de energía eléctrica, la misma que atravesará las líneas de transmisión y los transformadores con el fin de energizar al módulo de carga.

Para las pruebas de conexión y desconexión se energiza todas las cargas del módulo, se observa que los niveles de voltaje y frecuencia sean estables y se procede a la apertura o cierre abrupto de la carga.

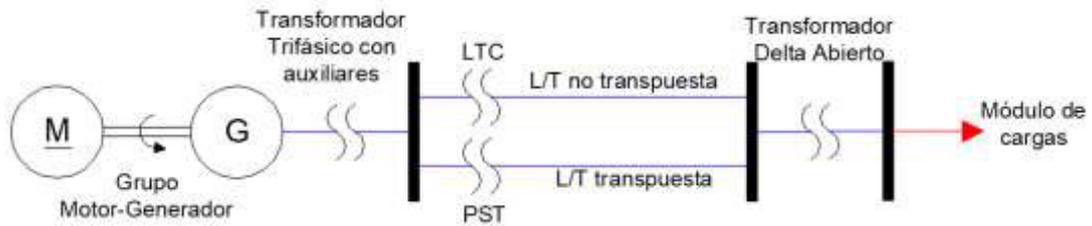


Figura 3.4. Conformación del SEP

3.1.3.1 Desconexión abrupta de carga

Una de las primeras pruebas a efectuarse es la desconexión de carga, esta prueba se la realiza después de haber verificado que los niveles de voltaje sean adecuados y que la frecuencia con la que está trabajando el sistema sea estable.

Una vez que se apertura la protección del módulo de carga, en la Figura 3.5., se visualiza el aumento de velocidad que sobrepasa los 1400 rpm e inmediatamente actúa el sistema de regulación de velocidad que tiene el objetivo de llevar al grupo motor – generador a velocidad nominal y de esta manera mantener una frecuencia constante de 60 Hz, es notorio en la gráfica mostrada que la velocidad del grupo regresa a la velocidad de 1200 rpm, luego de haberse provocado el rechazo de carga.

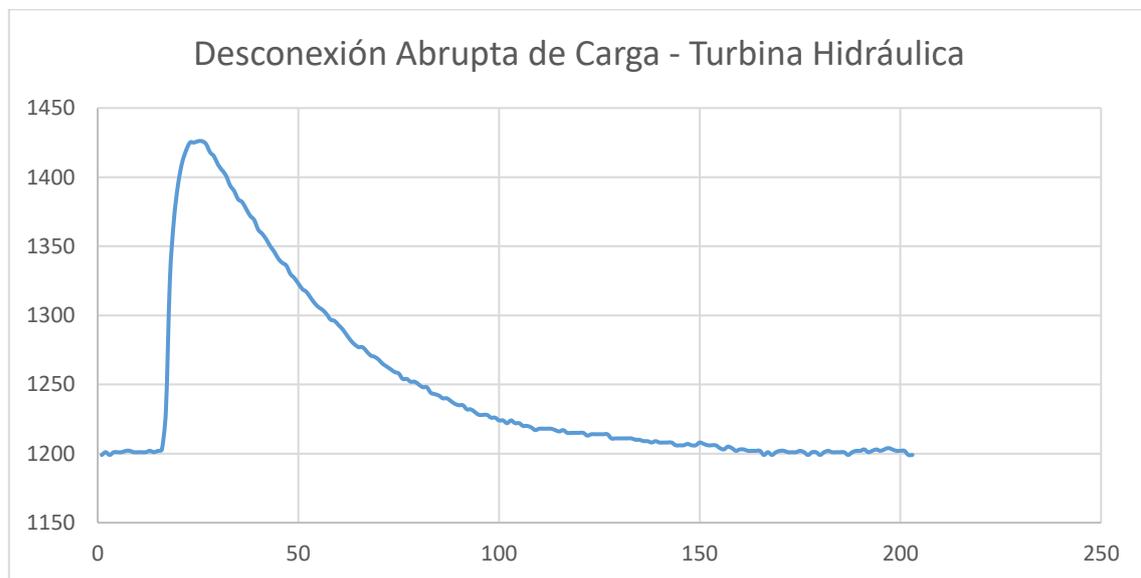


Figura 3.5. Desconexión abrupta de carga con la turbina hidráulica

3.1.3.2 Conexión abrupta de carga

La prueba de conexión abrupta de carga se la realiza después de haberse efectuado la prueba de rechazo de carga, en esta prueba la velocidad del sistema disminuye durante un intervalo de tiempo, en este tiempo el sistema de regulación de velocidad actúa incrementando gradualmente la velocidad hasta llegar a su valor nominal de 1200 rpm, una vez regulada la velocidad nominal el sistema se considera en estado estable ya que ha llegado a la frecuencia nominal de 60 Hz y durante el tiempo se mantendrá, a menos que existan perturbaciones en el sistema, en la Figura 3.6. se aprecia la disminución de velocidad provocada al momento de introducir al sistema la carga y como la velocidad se recupera para estabilizar la frecuencia del sistema.

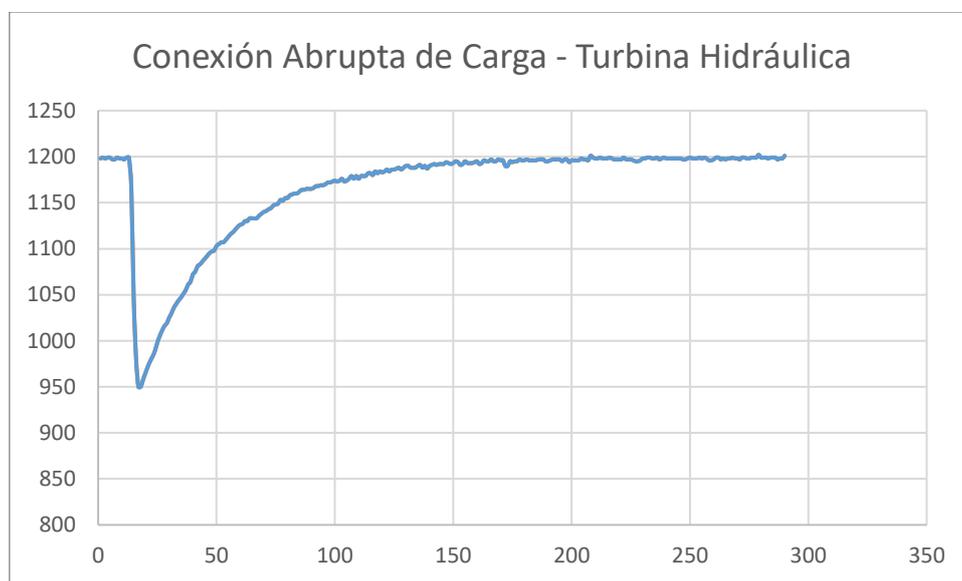


Figura 3.6. Desconexión abrupta de carga con la turbina hidráulica

3.1.4 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO

La prueba de ingreso en paralelo se la realizó conectando el grupo motor – generador a la barra de la E.E.Q, y con la carga completa conectada, el efecto no fue muy notorio, ya que, al tener nuestro centro de generación como sistema de prueba, el mismo fue absorbido por la barra de la E.E.Q.

El grupo motor – generador se mantuvo entregando potencia a la barra de la E.E.Q y manteniendo la frecuencia del sistema estable, en esta prueba se realizó perturbaciones con las cargas conectadas, sin lograr efectos en el grupo, ya que al ser la barra de la E.E.Q robusta estos efectos fueron totalmente anulados.

En la Figura 3.7. se aprecia una pequeña perturbación al momento de ingresar en paralelo, la cual fue corregida por el sistema de regulación de velocidad.

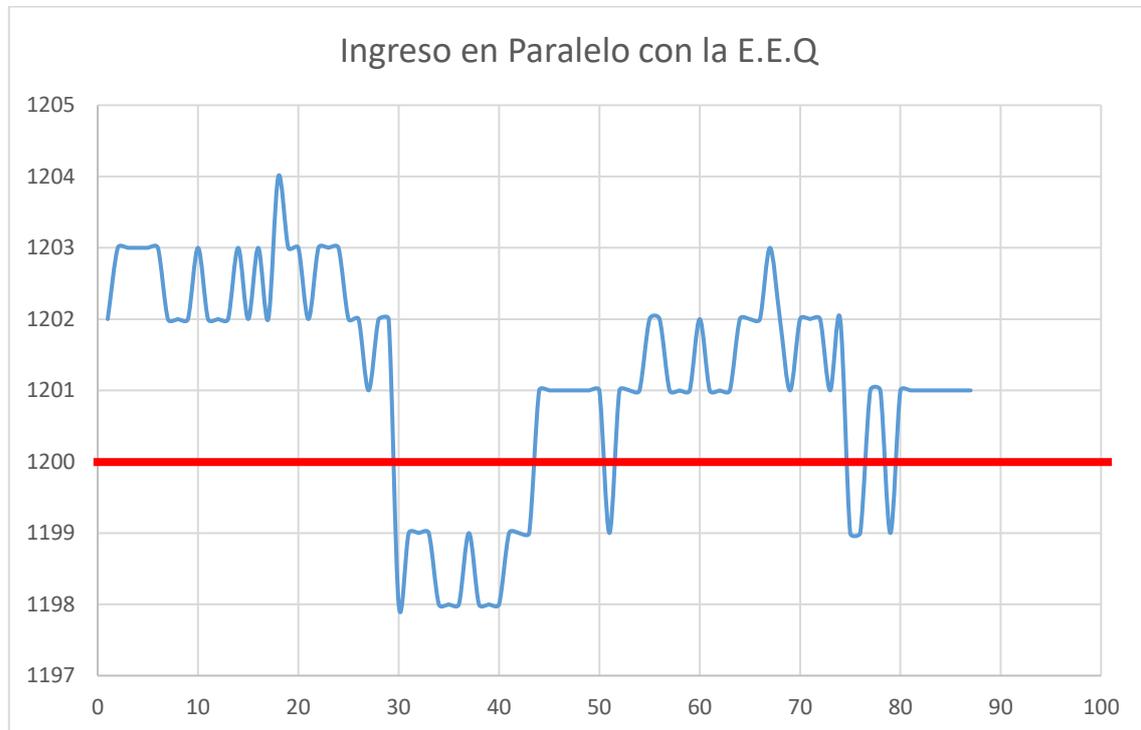


Figura 3.7. Ingreso en paralelo con la barra de la E.E.Q

3.1.5 SALIDA DE PARALELISMO

Se aprecia la salida del paralelismo del grupo motor - generador de la barra de la E.E.Q en la Figura 3.8., observando la existencia de una perturbación más notoria a diferencia de la prueba de ingreso en paralelo.

Este efecto es producto de que el grupo se encontraba entregando potencia y al momento de la desconexión de la barra de la E.E.Q, el grupo sufrió tal perturbación. Para controlar el efecto de variación de velocidad el sistema de regulación de velocidad corrige inmediatamente este efecto y procede a llevar el grupo a frecuencia nominal.

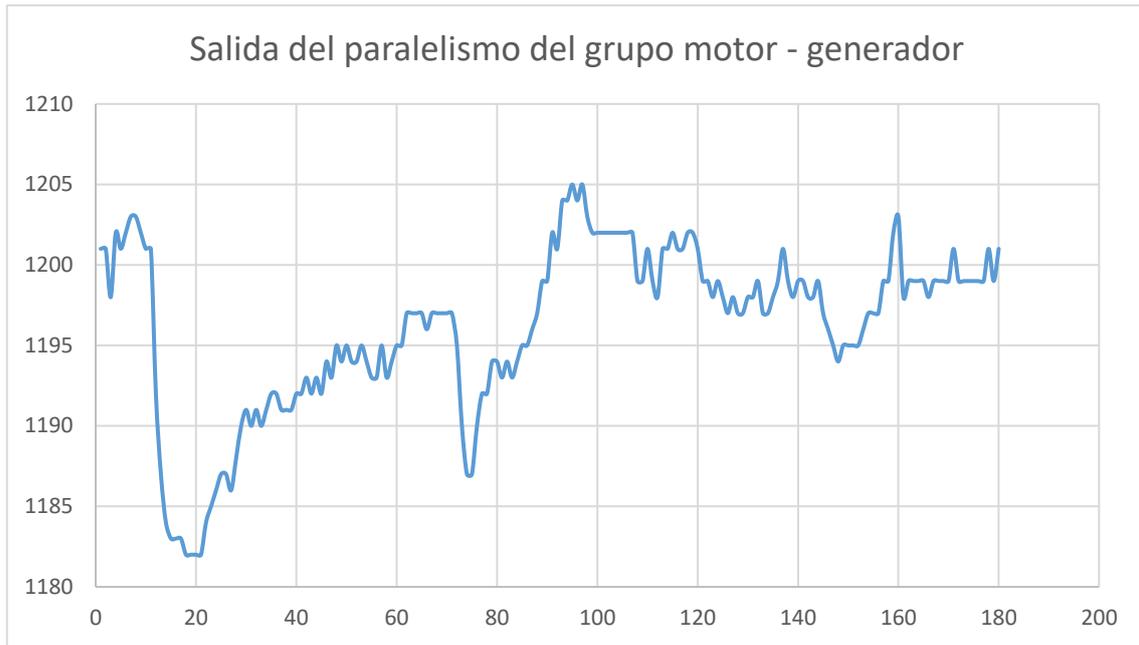


Figura 3.8. Salida del grupo motor – generador del paralelismo.

3.1.6 PARÁMETROS DINÁMICOS DEL GRUPO MOTOR - GENERADOR CON LA TURBINA HIDRÁULICA

La obtención de estos parámetros se la realiza con las pruebas de rechazo de carga y decaimiento de la velocidad del grupo motor – generador

3.1.6.1 Rechazo de carga

Para la prueba de rechazo de carga se desconecta el módulo de carga cuando el sistema se encuentra funcionando en condiciones nominales, mediante lo cual se obtiene la curva que nos permite conseguir la variación de velocidad angular ($\Delta\omega$) y el intervalo de tiempo (Δt).

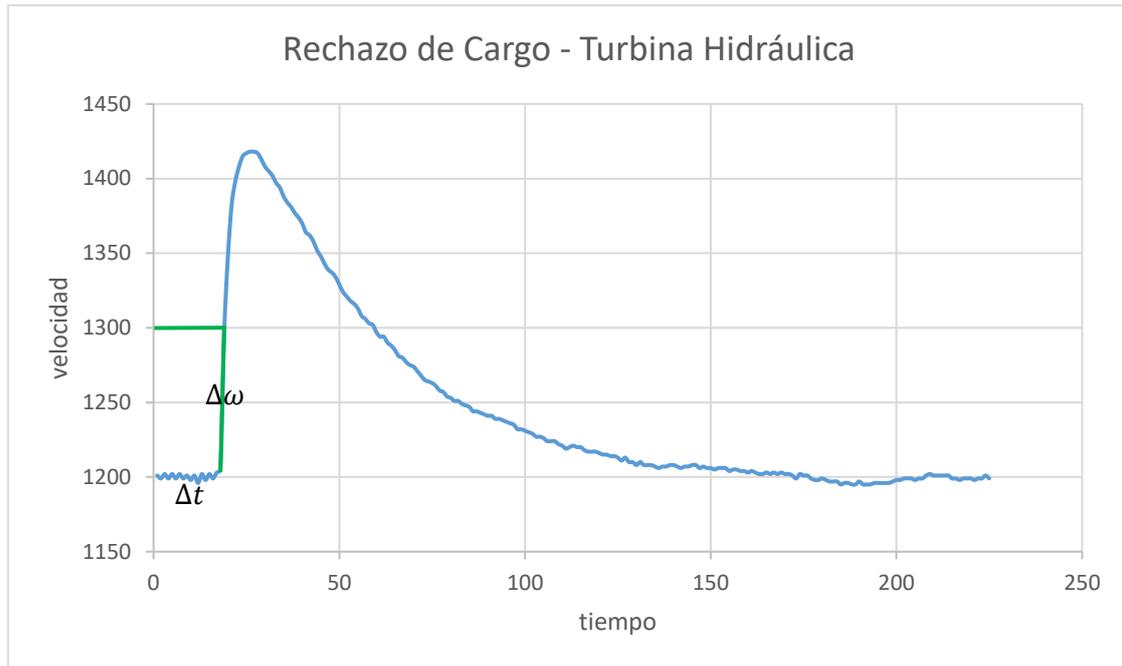


Figura 3.9. Rechazo de Carga con la turbina hidráulica.

En la Figura 3.9. se muestra la curva de rechazo de carga la cual se debe analizar en toda su parte lineal para obtener los valores de $\Delta\omega$ y Δt .

Con ayuda del método de los dos vatímetros y el equipo de medición FESTO se logra obtener la potencia eléctrica generada en el instante que se realiza la desconexión del módulo de carga.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.1., estos permiten calcular la constante de inercia (H) del grupo motor - generador.

Tabla 3.1. Parámetros de velocidad, tiempo y potencia con la turbina hidráulica.

Parámetros con la turbina hidráulica		
Velocidad inicial (ω_0)	1203 [rpm]	
Velocidad final (ω_f)	1300 [rpm]	
Variación de velocidad ($\Delta\omega$)	97 [rpm]	0,08083 [pu]
Velocidad sincrónica (ω_s)	1200 [rpm]	1,0 [pu]

Dato inicial (Di)	17	
Dato final (Df)	20	
Variación de tiempo (Δt)	0,9 [s]	
Potencia eléctrica (P_e)	3046,9090 [w]	0,307799 [pu]
Potencia base (S_B)	9899 [VA]	

Determinación de la variación del tiempo (Δt) con la ecuación 3.1:

$$(\Delta t) = (Df - Di) * t_a \quad (3.1)$$

Donde:

t_a : tiempo de adquisición de datos ($t_a=0,3$ [s])

$$\Delta t = (20 - 17) * 0,3$$

$$\Delta t = 0,9 \text{ [s]}$$

Para el cálculo H nos ayudamos de la Ecuación 3.2:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} + D_\omega = P_m - P_e \quad (3.2)$$

Se considera la no existencia de pérdida de potencia mecánica y eléctrica, y obtenemos:

$$\frac{2H}{\omega_s} * \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = P_m [P_m = P_e(t = 0)]$$

De la Ecuación 3.1 se despeja H y se obtiene la siguiente ecuación:

$$H = \frac{P_m * \omega_s * \Delta t}{2 * \Delta\omega} \quad (3.3)$$

En la Ecuación 3.3 se reemplaza los valores de parámetros y se obtiene el valor de H.

$$H = \frac{0,307799 * 1 * 0,9}{2 * 0,08083}$$

$$H = 1,7136 \text{ [s]}$$

3.1.6.2 Decaimiento de la velocidad

La prueba de decaimiento de velocidad, se la realiza apagando en su totalidad el grupo motor – generador, esto permite obtener la curva de decaimiento de la velocidad, con el análisis de la curva se consigue los datos de 10 % de la velocidad y el intervalo de tiempo antes que el grupo se detenga en su totalidad, con los parámetros obtenidos, se posibilita determinar el valor de la constante de amortiguamiento (D) del grupo motor - generador.

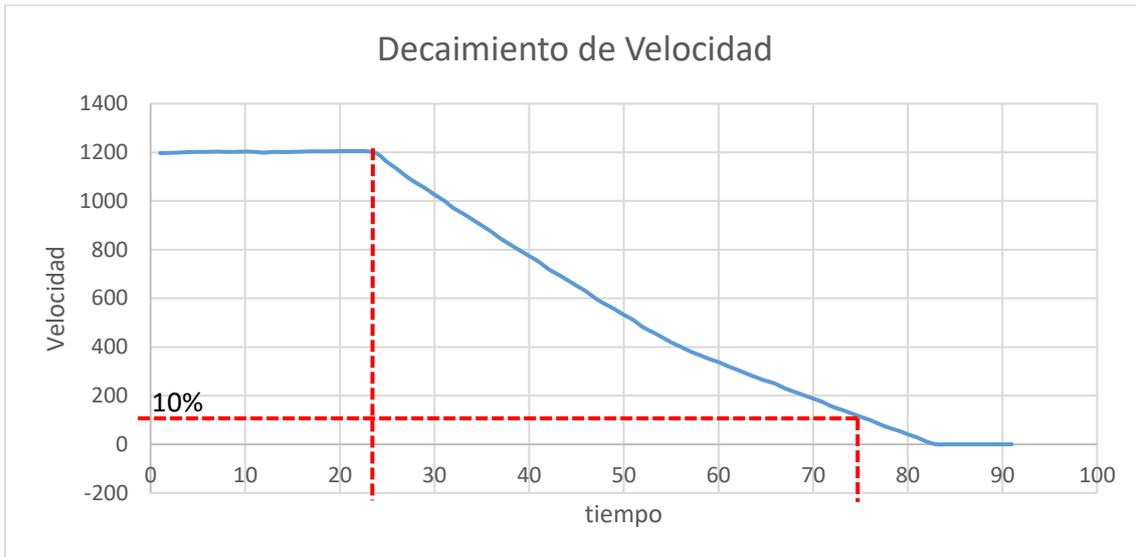


Figura 3.10. Decaimiento de la velocidad.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.2., permiten la determinación del valor D del generador.

Tabla 3.2. Parámetros de velocidad, tiempo y potencia con la turbina hidráulica.

Parámetros		
Velocidad de 10% (ω_1)	113 [rpm]	0,09417 [pu]
Velocidad inicial (ω_0)	1200 [rpm]	1,0 [pu]
Dato inicial (Di)	24	
Dato final (Df)	75	
Variación de tiempo (Δt)	15,3 [s]	

Para el cálculo de la variación del tiempo (Δt) se lo realiza con la Ecuación 3.1

Para el cálculo D nos ayudamos de la Ecuación 3.4:

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

$$\omega(t) = \omega_0 * e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

Conociendo el valor de ω_0 , obtenemos ω_1

$$\omega_1 = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

A la ecuación se aplica propiedad de logaritmos y se obtiene:

$$\ln \omega_1 = -\frac{t}{\tau}$$

$$\tau = -\frac{\Delta t}{\ln \omega_1} = \frac{2 * H}{D}$$

Se despeja D y se obtiene la siguiente ecuación:

$$D = -\frac{2 * H * \ln \omega_1}{\Delta t} \quad (3.5)$$

En la Ecuación 3.5 se reemplaza los valores de parámetros y se obtiene el valor de D.

$$D = -\frac{2 * 1,7136 * \ln 0,09417}{15,3}$$

$$D = 0,5292 \text{ [pu]}$$

Con las pruebas descritas, se ha logrado determinar los valores de H y D del grupo motor - generador con la simulación de la turbina hidráulica.

3.2 REGULACIÓN DE VELOCIDAD CON TURBINA TÉRMICA A VAPOR

El controlador de la turbina térmica a vapor cumple con el objetivo de corregir las variaciones de frecuencia que aparecen cuando existen alteraciones en la barra de carga en el transcurso del tiempo, el controlador simula de forma más cercana los efectos que se

podrían suscitar en una central térmica real, para corregir la frecuencia y establecerla a condiciones normales de 60 Hz.

Para verificar la eficiencia del funcionamiento del regulador de velocidad con la implementación de la función de transferencia de la turbina térmica a vapor, se realiza las respectivas pruebas a continuación detalladas.

3.2.1 PRUEBA EN VACÍO

La prueba en vacío se la realiza al grupo motor – generador, en este caso se enciende al motor de corriente continua el cual se encuentra acoplado al eje con el generador trifásico sincrónico, al motor se lo debe hacer llegar a la velocidad nominal de 1200 rpm, requerida por el generador para mantener una frecuencia estable de 60 Hz.

En la Figura 3.11., se visualiza el encendido del motor de corriente continua hasta llegar a la velocidad de 1200 rpm, de esta manera se aprecia el actuar del regulador de velocidad, el cual se encargará de mantener dicha velocidad.

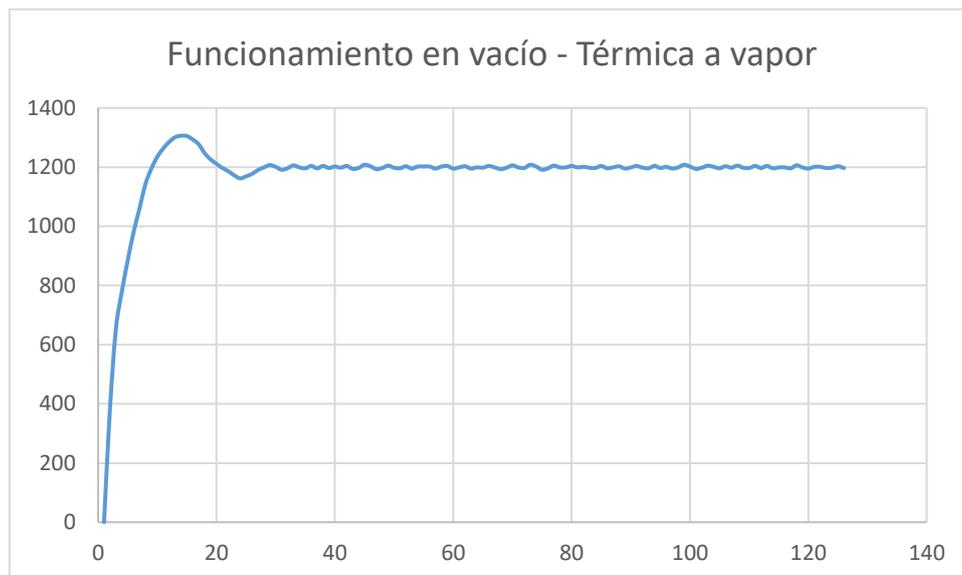


Figura 3.11. Funcionamiento de la turbina térmica a vapor.

3.2.2 PRUEBA CON PASOS DE CARGA

En la realización de esta prueba se debe llegar a la velocidad de giro que nos permite mantener una frecuencia eléctrica nominal, una vez conseguido establecer el parámetro de la frecuencia se procede a energizar la excitatriz del generador y controlar los niveles

de voltaje con los que se abastecerá al módulo de cargas resistivas usadas para esta prueba.

En la Figura 3.12., se puede apreciar el ingreso y salida de carga, esta prueba se realizó con cuatro pasos de carga, y se puede observar que tras cada paso efectuado la frecuencia eléctrica vuelve a su valor nominal.

Inicialmente se dan los pasos de ingreso de carga y se puede evidenciar como la velocidad disminuye, por lo que el controlador de la turbina térmica a vapor actúa y lleva al grupo motor – generador a frecuencia nominal, una vez efectuados todos los pasos de carga, se realiza la desconexión de carga donde se observa claramente un aumento de la velocidad y como en el caso de ingreso de carga el controlador actúa y el sistema vuelve a frecuencia nominal.

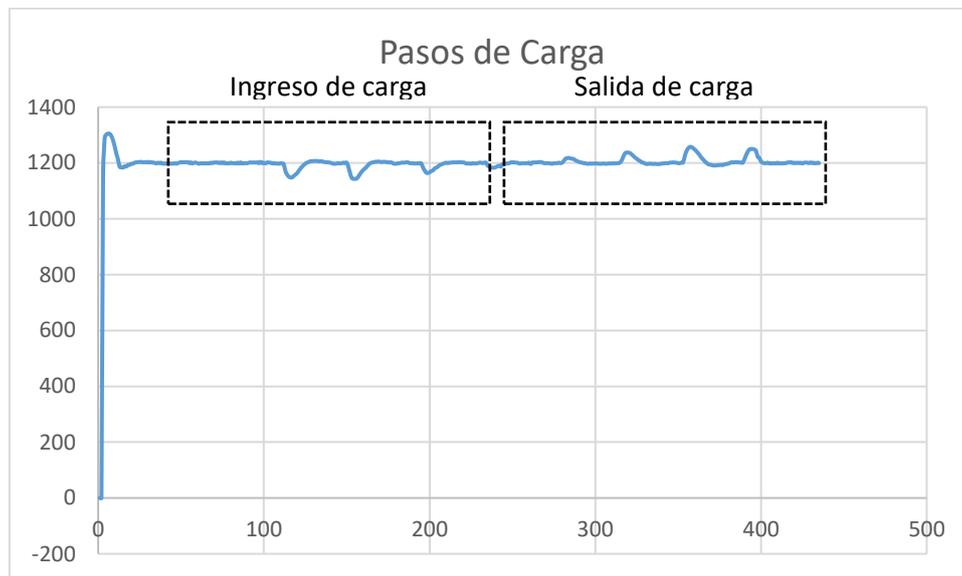


Figura 3.12. Pasos de carga con la turbina térmica a vapor

3.2.3 PRUEBA DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN ABRUPTA DE CARGA

En la realización de esta prueba se procede a la conformación del SEP completo que está compuesto por los transformadores LTC, PST, transformador trifásico con servicios auxiliares, transformador delta abierto, las líneas de transmisión transpuesta y no transpuesta y el módulo de carga.

En las pruebas de conexión y desconexión se energiza todas las cargas del módulo del Laboratorio físico de SEP, se observa que los niveles de voltaje y frecuencia sean estables y se procede a la apertura o cierre abrupto del módulo de carga.

3.2.3.1 Desconexión abrupta de carga

Una de las primeras pruebas a realizarse es la desconexión de carga, esta prueba se la realiza después de haber verificado que los niveles de voltaje sean adecuados y que la frecuencia con la que está trabajando el sistema se encuentre estable.

Una vez que se apertura la protección del módulo de carga, en la Figura 3.13., se aprecia el aumento de velocidad cercano a los 1400 rpm, y una pequeña disminución de velocidad a consecuencia de la actuación del controlador del sistema de regulación de velocidad que lleva al grupo motor – generador a velocidad nominal, y de esta manera se mantiene una frecuencia constante de 60 Hz, es notorio en la gráfica mostrada que la velocidad del grupo regresa a la velocidad de 1200 rpm, luego de haberse provocado esta perturbación con la prueba de rechazo de carga.

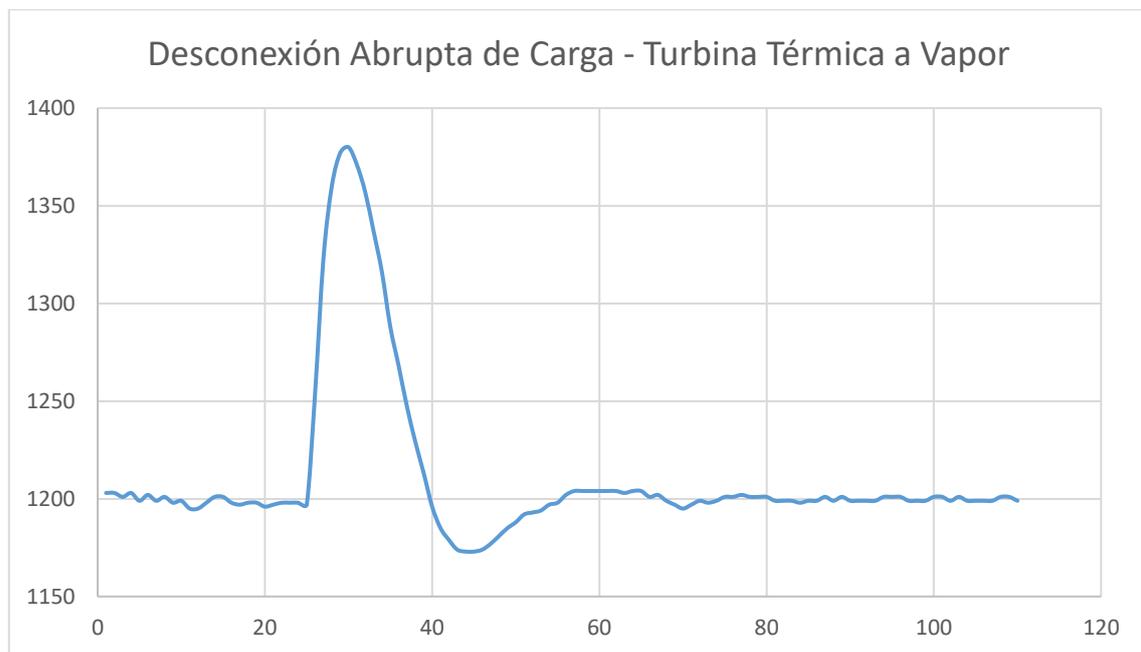


Figura 3.13. Desconexión abrupta de carga con la turbina térmica a vapor

3.2.3.2 Conexión abrupta de carga

Esta prueba se la realiza una vez efectuada la prueba de desconexión abrupta de carga y que el grupo motor -generador ha regresado a condiciones nominales y normales que

permitan el abastecimiento de energía eléctrica al sistema, una vez llegado a las condiciones adecuadas se procede a ejecutar la prueba de conexión abrupta de carga, en esta prueba se aprecia una disminución considerable de la velocidad, el controlador del sistema de regulación de velocidad detecta esta variación en la velocidad y actúa inmediatamente incrementando gradualmente la velocidad hasta establecerla en la velocidad nominal de 1200 rpm y de esta manera mantiene al sistema dentro de la frecuencia nominal de 60 Hz.

En la Figura 3.14., se aprecia el decremento de velocidad y como el regulador actúa en un intervalo de tiempo para restablecer la velocidad a condiciones normales para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico.

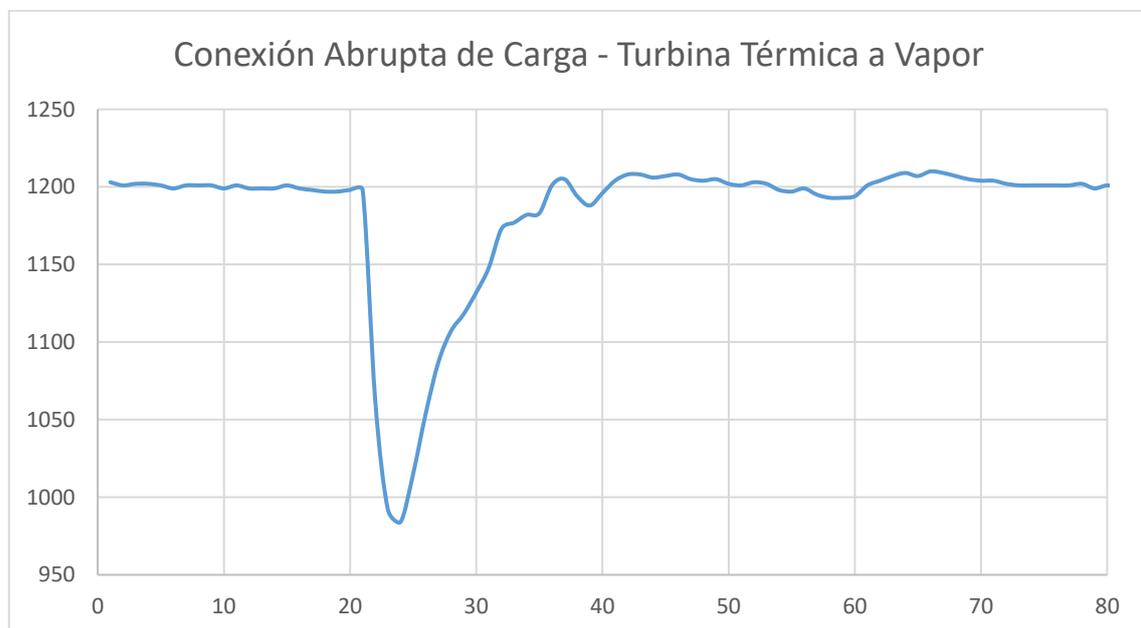


Figura 3.14. Desconexión abrupta de carga con la turbina térmica a vapor

3.2.4 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO

El ingreso en paralelo del grupo motor - generador simulando la turbina térmica a vapor con el SEP completo y la barra de la E.E.Q, el efecto del ingreso tiene una perturbación muy leve y en un intervalo de tiempo muy corto, el efecto no es muy notorio a consecuencia que la barra de la E.E.Q es robusta y la generación producida por nuestra planta es muy leve a diferencia de la barra de la E.E.Q.

Una vez que el grupo se encuentra conectada en la barra de E.E.Q se aprecia la estabilidad del sistema manteniendo la frecuencia nominal, voltajes estables y sin existir perturbaciones al momento de conectar o desconectar carga del sistema

En la Figura 3.15., se aprecia una pequeña perturbación que muestra el ingreso en paralelo del grupo con la barra de la E.E.Q, se aprecia una perturbación mínima de decremento de velocidad, pero rápidamente compensado por el sistema de regulación de velocidad.

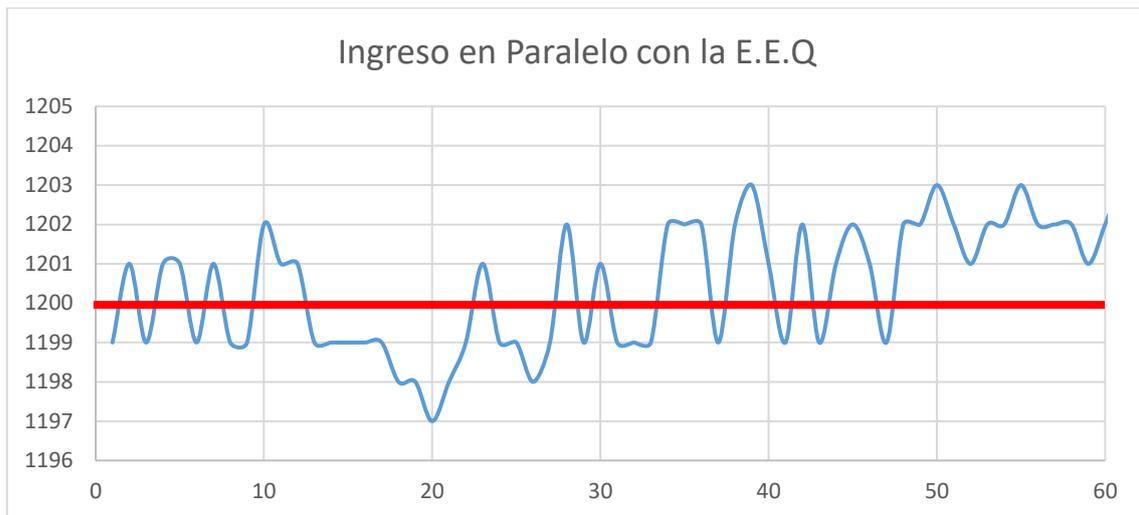


Figura 3.15. Ingreso en paralelo con la barra de la E.E.Q

3.2.5 SALIDA DE PARALELISMO

Al grupo motor – generador operando con la función de transferencia de la turbina térmica a vapor se realiza la salida de paralelismo con la barra de la E.E.Q y se puede observar en la Figura 3.16., una perturbación notoria, en la cual al momento de desconectarnos de dicha barra provoca un decaimiento en la velocidad por lo que el sistema de regulación de velocidad actúa una vez detectado el cambio en la velocidad del grupo, haciendo que la velocidad vuelva a condiciones nominales, como se puede ver en la gráfica.

El efecto del decaimiento de la velocidad del grupo es producto de que en ese instante la planta se encontraba entregando potencia a la barra de la E.E.Q, por tal motivo se produce este transitorio, pero es superado en un intervalo de tiempo y regresa a condiciones nominales en velocidad y frecuencia.

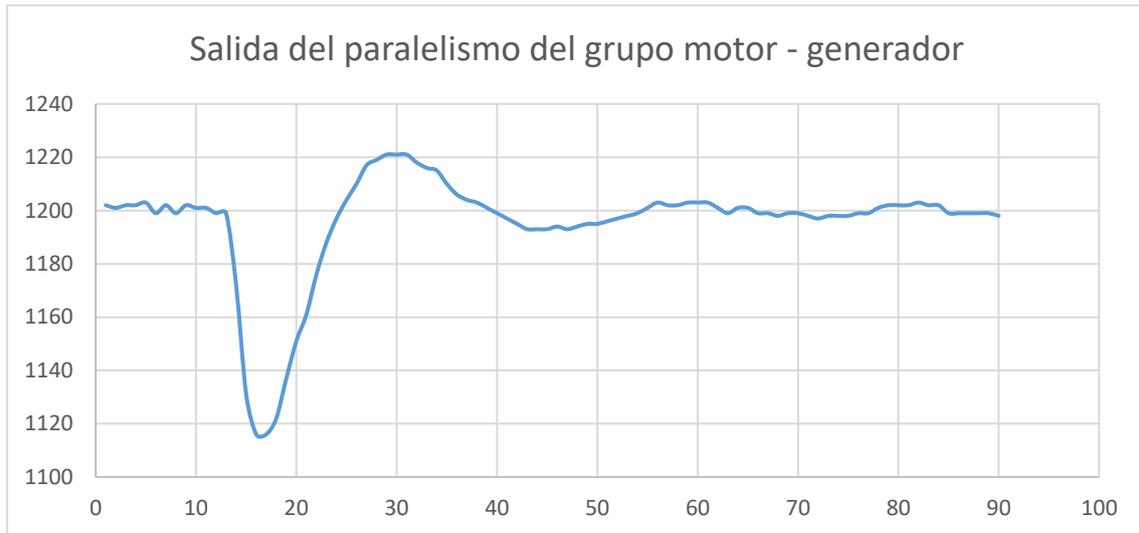


Figura 3.16. Salida del grupo motor – generador del paralelismo.

3.2.6 PARÁMETROS DINÁMICOS DEL GRUPO MOTOR - GENERADOR CON LA TURBINA TÉRMICA A VAPOR

La obtención de estos parámetros se lo realiza con las pruebas de rechazo de carga y decaimiento de la velocidad del grupo motor – generador

3.2.6.1 Rechazo de carga

Para la prueba de rechazo de carga se desconecta el módulo de carga cuando el sistema se encuentra funcionando en condiciones nominales de voltaje y frecuencia, obteniendo la curva que nos permite determinar la variación de velocidad angular ($\Delta\omega$) y el intervalo de tiempo (Δt).

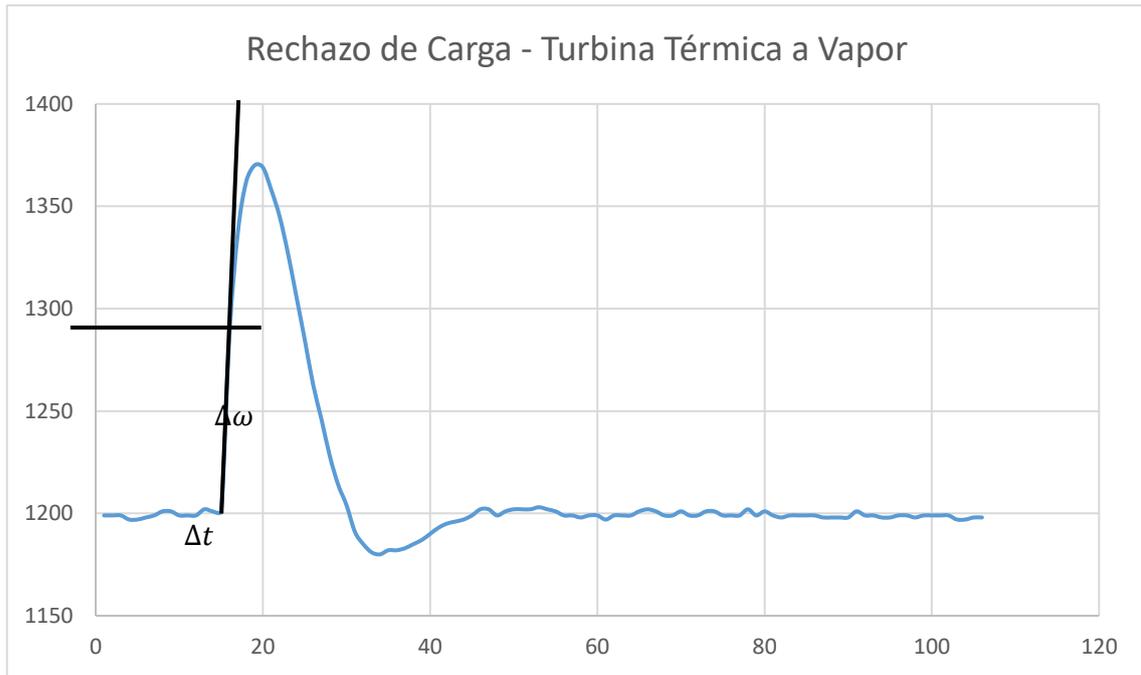


Figura 3.17. Rechazo de Carga con la turbina térmica a vapor

En la Figura 3.17., se muestra la curva de rechazo de carga a la cual se la debe tratar en toda su parte lineal que permite obtener la $\Delta\omega$ y Δt .

Con ayuda del método de los vatímetros y el equipo de medición FESTO se logra obtener la potencia de eléctrica generada.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.3., estos permiten calcular la constante de inercia (H) del grupo motor - generador.

Tabla 3.3. Parámetros de velocidad, tiempo y potencia con la turbina térmica a vapor.

Parámetros con la turbina térmica a vapor		
Velocidad inicial (ω_0)	1201 [rpm]	
Velocidad final (ω_f)	1287 [rpm]	
Variación de velocidad ($\Delta\omega$)	86 [rpm]	0,0717 [pu]
Velocidad sincrónica (ω_s)	1200 [rpm]	1,0 [pu]
Dato inicial (D_i)	15	

Dato final (Df)	16	
Variación de tiempo (Δt)	0,3 [s]	
Potencia eléctrica (P_e)	3133,2727 [w]	0,3165 [pu]
Potencia base (S_B)	9899 [VA]	

Para el cálculo H nos ayudamos de la Ecuación 3.3, en la cual se reemplaza los valores y obtener el valor H .

Se considera la no existencia de pérdida de potencia mecánica y eléctrica, y obtenemos:

$$H = \frac{0,3165 * 1 * 0,3}{2 * 0,0717}$$

$$H = 0,6621 \text{ [s]}$$

3.2.6.2 Decaimiento de la velocidad

La prueba de decaimiento de velocidad, se la realiza apagando en su totalidad el grupo motor – generador. Esto permite obtener la curva de decaimiento de la velocidad, con el análisis de la curva se consigue los datos del 10% de la velocidad nominal y el intervalo de tiempo antes que el grupo se detenga en su totalidad, con los parámetros obtenidos, se posibilita determinar el valor de la constante de amortiguamiento (D) del grupo motor - generador.

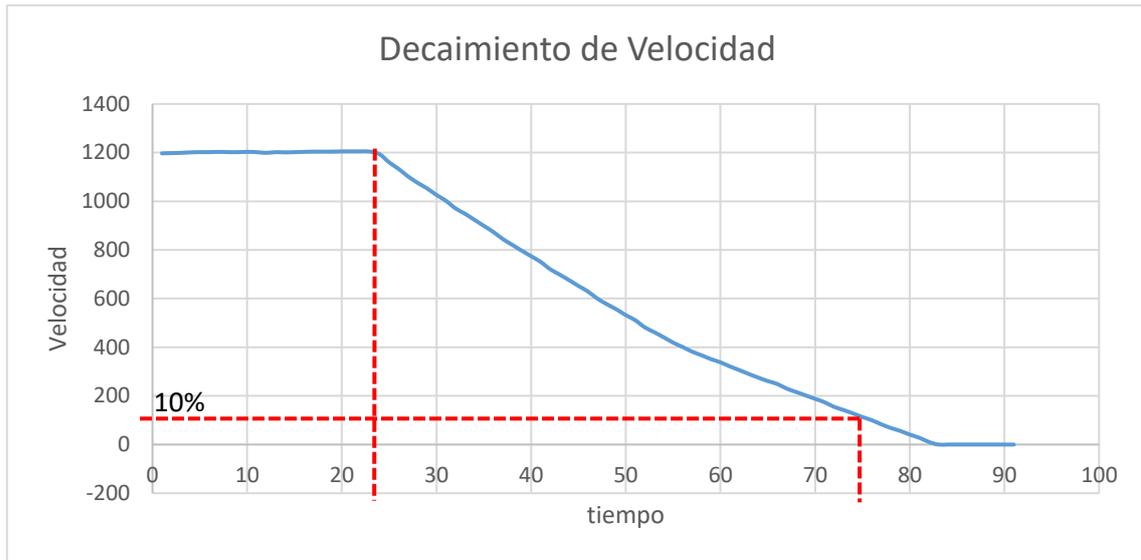


Figura 3.18. Decaimiento de la velocidad.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.4., permiten la determinación del valor D del grupo motor – generador.

Tabla 3.4. Parámetros de velocidad, tiempo y potencia con la turbina térmica a vapor.

Parámetros		
Velocidad de 10% (ω_1)	113 [rpm]	0,09417 [pu]
Velocidad inicial (ω_0)	1200 [rpm]	1,0 [pu]
Variación de tiempo (Δt)	15,3 [s]	

Para el cálculo D nos ayudamos de la Ecuación 3.5, se reemplaza los valores de parámetros y se obtiene el valor de D.

$$D = - \frac{2 * 0,6621 * \ln 0,09417}{15,3}$$

$$D = 0,2045 \text{ [pu]}$$

Con las pruebas descritas, se ha logrado determinar los valores de H y D del grupo motor - generador con la simulación de la turbina térmica a vapor.

3.3 REGULACIÓN DE VELOCIDAD CON TURBINA TÉRMICA A GAS

El controlador de la turbina térmica a gas y como las dos turbinas antes mencionadas cumple con el objetivo de corregir las variaciones de frecuencia que aparecen cuando existen alteraciones en la barra de carga en el transcurso del tiempo, el controlador simula de forma más cercana los efectos que se podrían suscitar en una central térmica real, para corregir la frecuencia y establecerla a condiciones normales de 60 Hz.

La verificación y eficiencia del funcionamiento del regulador de velocidad con la implementación de la función de transferencia de la turbina térmica a gas, se realiza las mismas pruebas realizadas a las dos turbinas anteriores.

3.3.1 PRUEBA EN VACÍO

En la Figura 3.19., se visualiza el encendido del motor de corriente continua hasta llegar a la velocidad de 1200 rpm, de esta manera se aprecia el actuar del regulador de velocidad, el cual se encarga de regular dicha velocidad dentro de límites aceptables y de esta manera mantener una frecuencia nominal de 60 Hz, para el abastecimiento correcto de energía eléctrica al SEP.

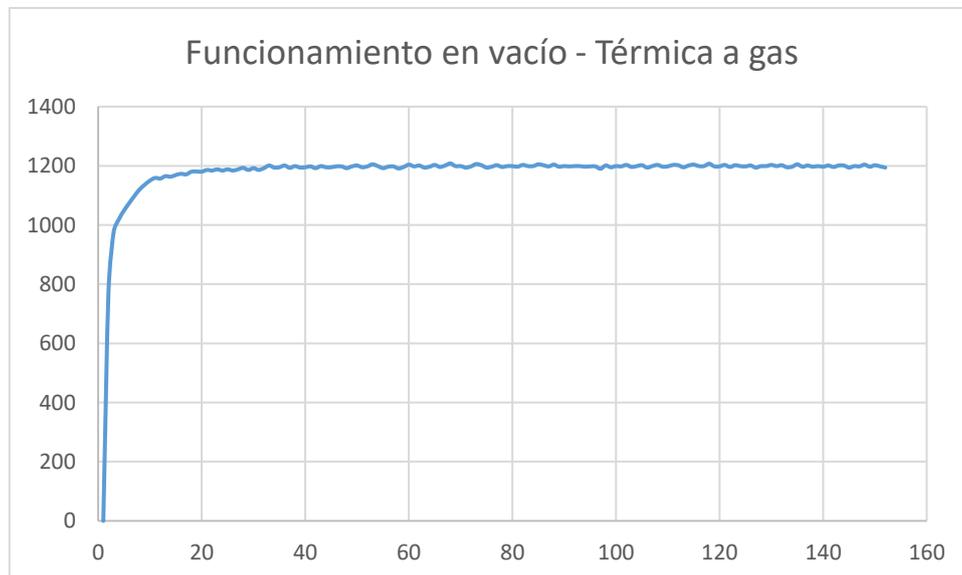


Figura 3.19. Funcionamiento de la turbina térmica a gas.

3.3.2 PRUEBA CON PASOS DE CARGA

En la Figura 3.20., se puede apreciar el ingreso y salida de carga, esta prueba se realizó con cuatro pasos de carga, tras cada paso de carga el sistema de regulación de velocidad ya sea que la velocidad aumente por salida de carga o disminuya por ingreso de carga hace que el grupo motor – generador vuelva a velocidad sincrónica

Inicialmente se dan los pasos de ingreso de carga y se puede evidenciar como la velocidad disminuye, por lo que el controlador de la turbina térmica a gas actúa y lleva al grupo a frecuencia nominal, una vez efectuados todos los pasos de carga, se realiza la desconexión de carga donde se observar claramente un aumento de la velocidad y como en el caso de ingreso de carga el controlador actúa y el sistema vuelve a frecuencia nominal.

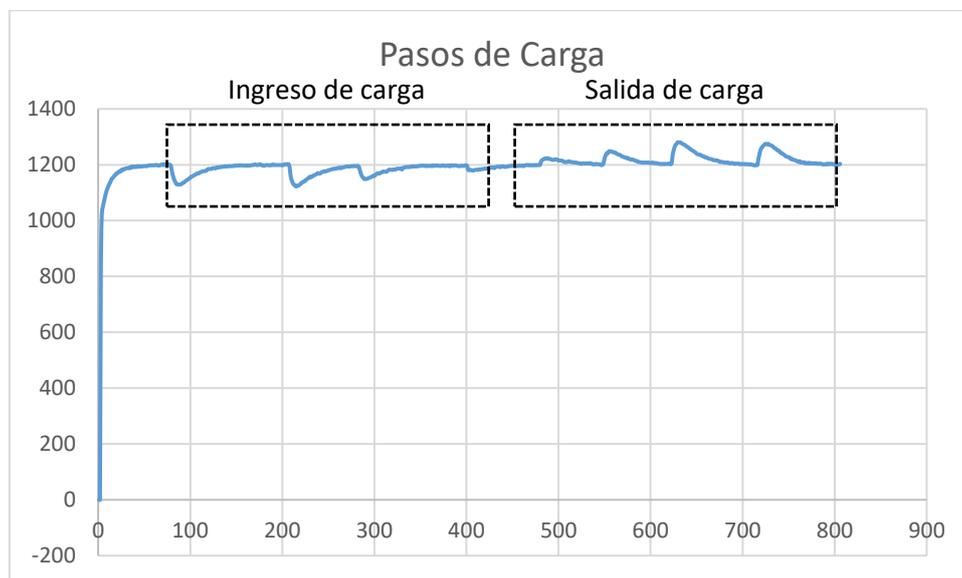


Figura 3.20. Pasos de carga con la turbina térmica a gas

3.3.3 PRUEBA DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN ABRUPTA DE CARGA

Esta prueba como en las pruebas con las turbinas antes mencionadas se procede a la conformación del SEP completo que está compuesto por los transformadores LTC, PST, transformador trifásico con servicios auxiliares, transformador delta abierto, las líneas de transmisión transpuesta y no transpuesta y el módulo de carga.

En las pruebas de conexión y desconexión se energiza todas las cargas del módulo del Laboratorio físico de SEP, se observa que los niveles de voltaje y frecuencia sean estables y se procede a la apertura o cierre abrupto del módulo de carga.

3.3.3.1 Desconexión abrupta de carga

Se procede a la desconexión de carga, esta prueba se la realiza después de haber verificado que los niveles de voltaje sean adecuados, la frecuencia con la que está trabajando el sistema se encuentre estable y se hayan energizado todas las cargas del módulo del Laboratorio físico de SEP

Una vez conectado al sistema con toda la carga, se apertura la protección del módulo de carga, en la Figura 3.21., se aprecia el aumento de velocidad que sobrepasa los 1400 rpm, lo que provoca la actuación del controlador del sistema de regulación de velocidad que lleva al grupo motor – generador a velocidad nominal y de esta manera mantiene una frecuencia constante de 60 Hz, es notorio en la gráfica mostrada que la velocidad del grupo regresa a la velocidad de 1200 rpm, luego de haberse provocado esta perturbación en la prueba de rechazo de carga.

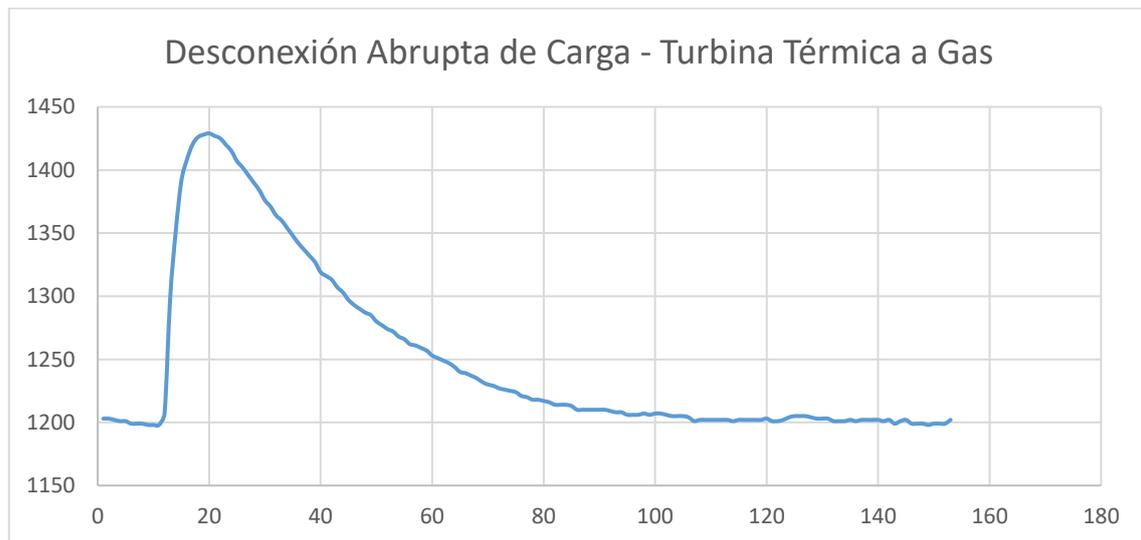


Figura 3.21. Desconexión abrupta de carga con la turbina térmica a gas

3.3.3.2 Conexión abrupta de carga

Esta prueba se lo realiza una vez efectuada la prueba de desconexión abrupta de carga y que el grupo motor - generador ha regresado a condiciones nominales y normales que permitan el abastecimiento de energía eléctrica al sistema. Una vez alcanzadas las condiciones adecuadas se procede a ejecutar la prueba de conexión abrupta de carga, en esta prueba se aprecia una disminución considerable de la velocidad que llega a decaer hasta un nivel cercano a 900 rpm, el controlador del sistema de regulación de velocidad

detecta esta variación en la velocidad y actúa inmediatamente incrementando gradualmente la velocidad hasta establecerla en la velocidad nominal de 1200 rpm y de esta manera mantiene al sistema a frecuencia nominal de 60 Hz.

En la Figura 3.22., se aprecia el decremento de velocidad y como el regulador actúa en un intervalo de tiempo para restablecer la velocidad a condiciones nominales para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico.

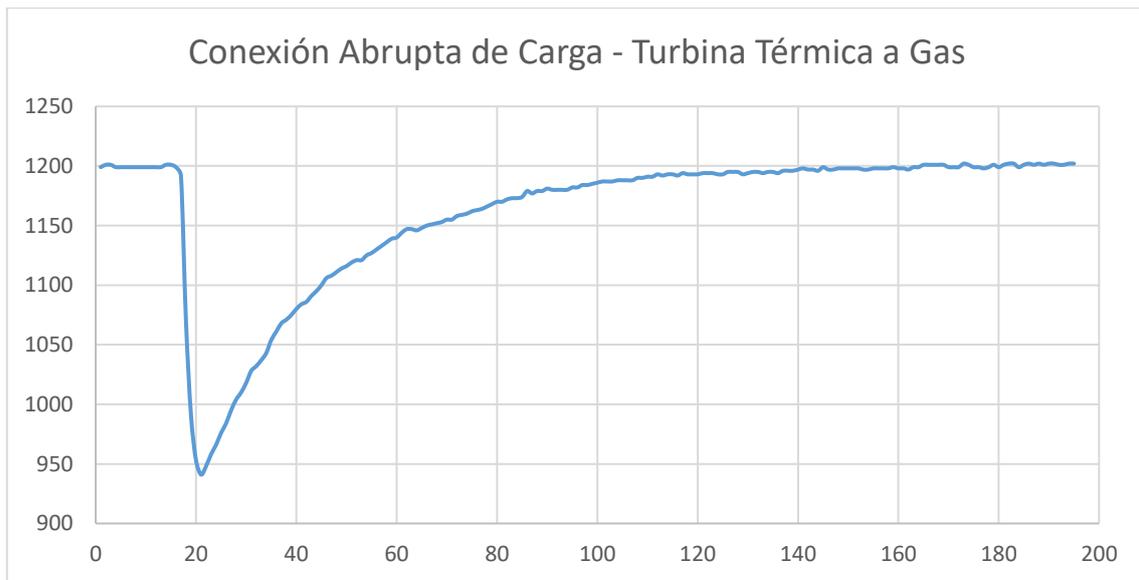


Figura 3.22. Desconexión abrupta de carga con la turbina térmica a gas

3.3.4 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO

Una vez que el grupo se encuentra conectada a la barra de E.E.Q se aprecia la estabilidad del sistema manteniendo la frecuencia nominal, voltajes estables y sin existir perturbaciones al momento de conectar o desconectar carga del sistema

En la Figura 3.23., se aprecia pequeñas perturbaciones que muestra el ingreso en paralelo del grupo con la barra de la E.E.Q, se observa perturbaciones mínimas de decremento e incremento de velocidad, pero rápidamente compensado por el sistema de regulación de velocidad.

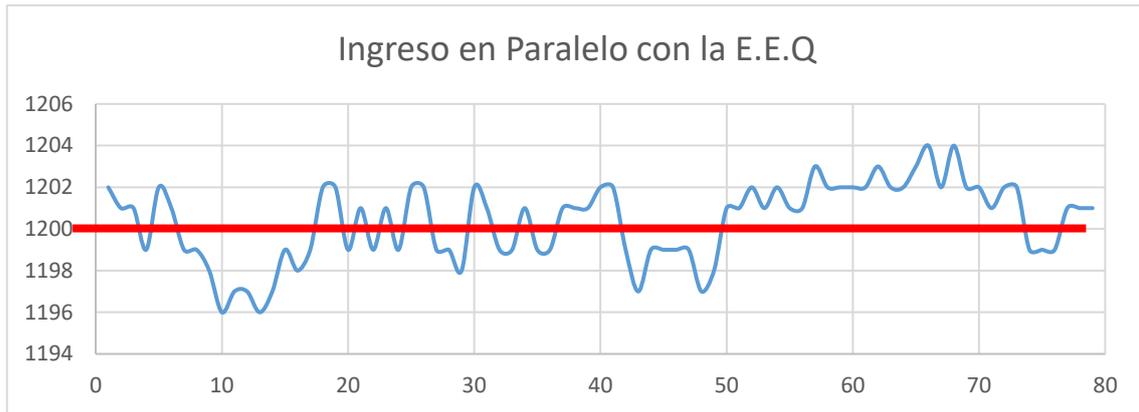


Figura 3.23. Ingreso en paralelo con la barra de la E.E.Q

3.3.5 SALIDA DE PARALELISMO

Con el grupo motor – generador operando con la función de transferencia de la turbina térmica a gas se realiza la salida de paralelismo de la barra de la E.E.Q y se puede observar en la Figura 3.24., una perturbación mínima, en la cual al momento de desconectarnos de dicha barra provoca un decaimiento en la velocidad por lo que el sistema de regulación de velocidad actúa una vez detectado el cambio en la velocidad del grupo, haciendo que la velocidad vuelva a condiciones nominales, como se puede en la gráfica.

El efecto del decaimiento de la velocidad del grupo es producto de que en ese instante la planta se encontraba entregando potencia a la barra de la E.E.Q, por tal motivo se produce este transitorio, pero es superado en un intervalo de tiempo y regresa a condiciones nominales en velocidad y frecuencia.



Figura 3.24. Salida del grupo motor – generador del paralelismo.

3.3.6 PARÁMETROS DINÁMICOS DEL GRUPO MOTOR - GENERADOR CON LA TURBINA TÉRMICA A GAS

La obtención de estos parámetros se realiza con las pruebas de rechazo de carga y decaimiento de la velocidad del grupo motor – generador con la implementación de la turbina térmica a gas.

3.3.6.1 Rechazo de carga

Para la prueba de rechazo de carga se desconecta el módulo de carga cuando el sistema está funcionando en condiciones nominales, obteniendo la curva que nos permite obtener la variación de velocidad angular ($\Delta\omega$) y el intervalo de tiempo (Δt).

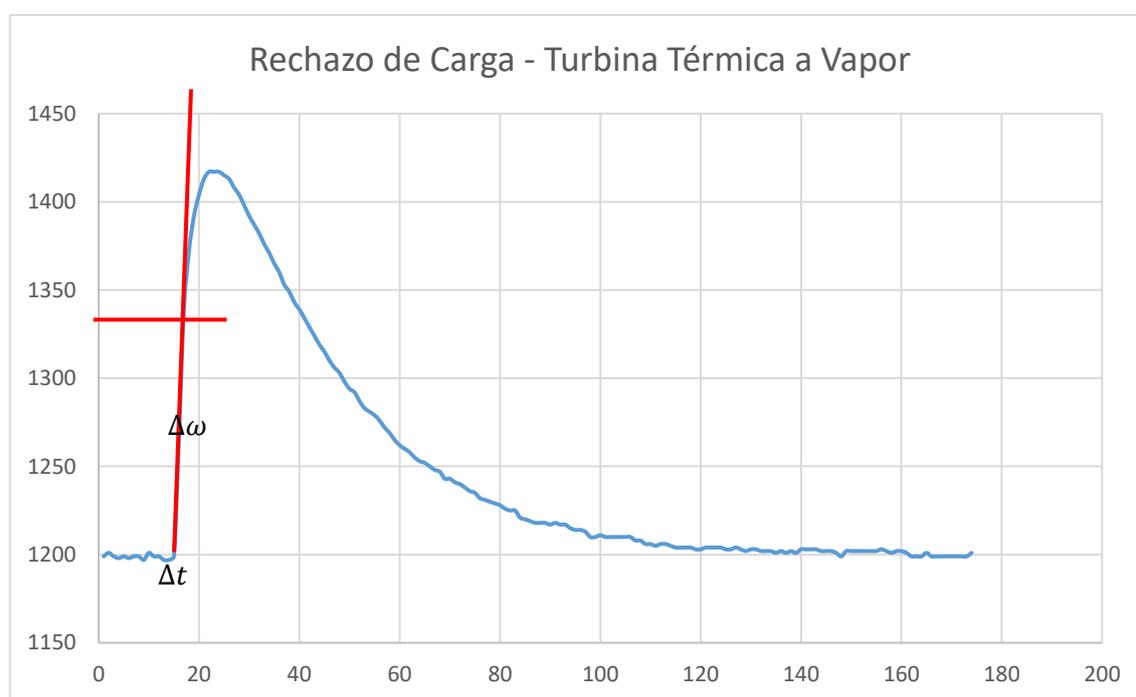


Figura 3.25. Rechazo de Carga con la turbina térmica a gas

En la Figura 3.25., se muestra la curva de rechazo de carga la cual se analiza en toda su parte lineal lo que permite obtener los valores de $\Delta\omega$ y Δt .

Con ayuda del método de los dos vatímetros y el equipo de medición FESTO se logra obtener la potencia eléctrica generada.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.5., estos permiten calcular la constante de inercia (H) del grupo motor - generador.

Tabla 3.5. Parámetros de velocidad, tiempo y potencia con la turbina térmica a vapor.

Parámetros con la turbina térmica a gas		
Velocidad inicial (ω_0)	1199 [rpm]	
Velocidad final (ω_f)	1339 [rpm]	
Variación de velocidad ($\Delta\omega$)	140 [rpm]	0,1167 [pu]
Velocidad sincrónica (ω_s)	1200 [rpm]	1,0 [pu]
Dato inicial (Di)	15	
Dato final (Df)	17	
Variación de tiempo (Δt)	0,6 [s]	
Potencia eléctrica (P_e)	3029,3636 [w]	0,3060 [pu]
Potencia base (S_B)	9899 [VA]	

Para el cálculo H nos ayudamos de la Ecuación 3.3, en la cual se reemplaza los valores y obtener el valor H .

Se considera la no existencia de perdida de potencia mecánica y eléctrica, y obtenemos:

$$H = \frac{0,3060 * 1 * 0,6}{2 * 0,1167}$$

$$H = 0,7867 [s]$$

3.3.6.2 Decaimiento de la velocidad

La prueba de decaimiento de velocidad es idéntica para los tres casos de turbina, se lo realiza apagando en su totalidad del grupo motor – generador, esto permite obtener la curva del decaimiento de la velocidad, con el análisis de la curva se consiguen los datos de 10% de la velocidad y el intervalo de tiempo antes que el grupo se detenga en su totalidad, con los parámetros obtenidos, se posibilita determinar el valor de la constante de amortiguamiento (D) del grupo motor - generador.

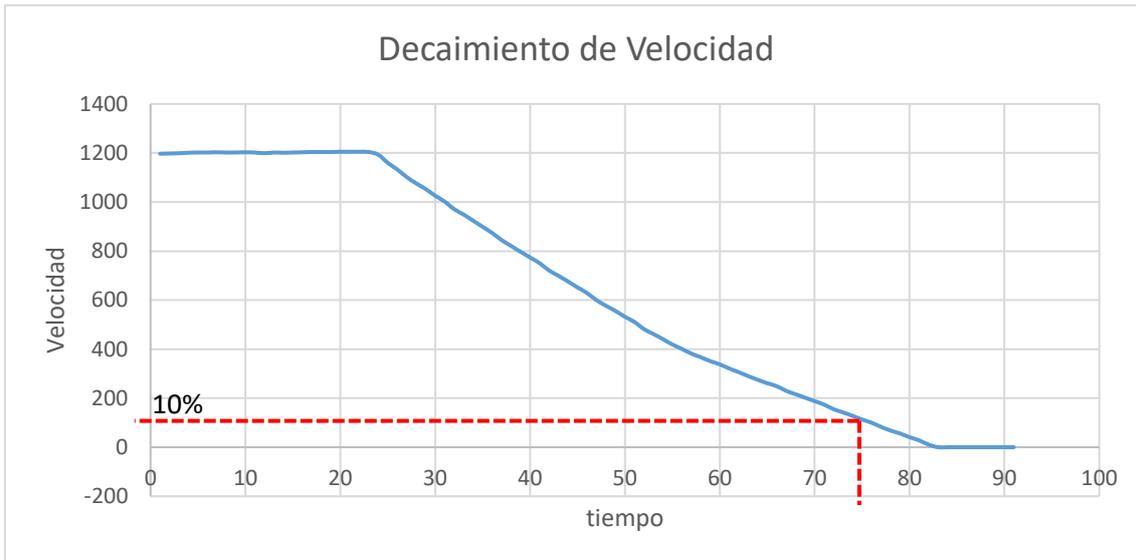


Figura 3.26. Decaimiento de la velocidad.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.6., permiten la determinación del valor D del grupo motor – generador.

Tabla 3.6. Parámetros de velocidad, tiempo y potencia con la turbina térmica a gas.

Parámetros		
Velocidad de 10% (ω_1)	113 [rpm]	0,09417 [pu]
Velocidad inicial (ω_0)	1200 [rpm]	1,0 [pu]
Variación de tiempo (Δt)	15,3 [s]	

Para el cálculo D nos ayudamos de la Ecuación 3.5, se reemplaza los valores de parámetros y se obtiene el valor de D.

$$D = - \frac{2 * 0,7867 * \ln 0,09417}{15,3}$$

$$D = 0,243 \text{ [pu]}$$

Con las pruebas descritas, se ha logrado determinar los valores de H y D del grupo motor - generador con la simulación de la turbina térmica a gas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Una vez concluido el diseño, se procedió a la construcción del módulo Sistema de Regulación de Velocidad e implementarlo al grupo motor – generador, después de haber obtenido resultados satisfactorios de las diversas pruebas de operación llevadas a cabo y funcionamiento del módulo, se puede concluir que se ha cumplido los objetivos planteados inicialmente para el desarrollo de este proyecto. Agregando a lo anterior, el módulo tiene la capacidad de monitorear la velocidad del grupo, la corriente y voltaje de armadura del motor y los voltajes de alimentación para los tiristores. Además, verifica que las protecciones tanto de campo del motor como las de sobrecorriente y sobrevoltaje se encuentren trabajando óptimamente.
- La tarjeta STM32 usada para la ejecución del proyecto, permite la ejecución de los sistemas control realizadas en el software de Matlab, esta tarjeta facilita una interacción amigable con Matlab ya que facilita con su librería disponible la realización de rutinas a ser efectuadas por su procesador. La tarjeta ejecuta la simulación de las turbinas, permite recabar los valores de velocidad y obtener los valores de voltaje y corriente del motor.
- En la visualización de los valores de velocidad, corriente y voltaje de armadura del motor, los modelos de turbinas a ser simuladas y las etiquetas de protección se usó una pantalla LCD HMI que permite la interacción directa con el usuario ya que la pantalla al ser táctil se puede acceder directamente a la ejecución de la simulación de las turbinas.
- La adquisición de valores de velocidad en función del tiempo se obtiene con la ayuda de un programa diseñado en Microsoft Visual Basic, el cual almacena esta información y se la envía a un documento Excel para su posterior análisis por parte del usuario, el tiempo en la hoja de Excel debe ser considerado como número de datos, para la obtención del tiempo real se debe multiplicar el dato por $t=300 \times 10^{-3}$ s y de esta manera obtener el tiempo real.
- La variación de frecuencia obtenida durante el funcionamiento es de $\pm 0,15$ Hz, permitiendo de esta manera operar al grupo motor – generador en Regulación

Primaria de Frecuencia de acuerdo con la Regulación de CONELEC – 006/00 que impone como requisito y al estarlo cumpliendo no limita al grupo para operar.

- El módulo a operado y superado las pruebas de rechazo de carga e ingreso abrupto de carga, regresando al grupo motor – generador a condiciones normales de operación que en este caso es mantener una velocidad sincrónica de 1200 rpm y de esta manera mantener una frecuencia estable para el sistema, al igual que ha ingresado en paralelo con la E.E.Q y a tenido la capacidad de proporcionar energía eléctrica a la red sin ninguna eventualidad.

4.2 RECOMENDACIONES

- Para poder tener un mejor conocimiento del comportamiento del sistema en estado estable y transitorio durante la realización de proyectos prácticos de laboratorio, se recomienda incluir además del GOV (regulador de velocidad) otros sistemas de control asociados al generador y la maquina motriz, como son el AVR (regulador de velocidad) y PSS (Estabilizador de sistema de potencia).
- La implementación del GOV ha tomado en cuenta distintos tipos de turbina a simular con valores del control PI teóricos, sin embargo, también se podría emular turbinas reales de distintos sistemas de generación para poder analizar distintos fenómenos electromecánicos dentro del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia.
- La sintonización del control PI del sistema de regulación de velocidad se lo realizo con la ayuda de la herramienta de sintonización de MATLAB, pero se puede requerir obtener distintos resultados con la simulación del comportamiento de turbinas por lo que se recomienda realizar la sintonización del bloque PI con distintos métodos, si se requiere obtener características adicionales durante el funcionamiento del GOV.
- La fase de potencia del regulador de velocidad ha sido diseñada con un límite de corriente de 30A, el cual es suficiente para los elementos que conforman el SEP del Laboratorio Físico de Sistemas de Potencia, sin embargo si se requiere superar el nivel de corriente se deberá aumentar el nivel limite corriente dentro del bloque de control y además se debe considerar la capacidad adicional de conductores,

fusibles y conectores que forman parte de las conexiones eléctricas necesarias para el funcionamiento del sistema completo.

- Si en el futuro se requieren analizar comportamientos en la maquina motriz respecto a la forma de variación de su velocidad angular que requieran una mayor precisión en el tiempo, se debe repotenciar el encoder rotativo ya existente, por un encoder que sea capaz de medir un mayor número de pulsos/segundo, mejorando de esta manera la medición de la velocidad de giro del motor de corriente continua.
- La tarjeta de control STM32 cuenta con gran capacidad de procesamiento de datos por lo que se podría implementar gráficas de medida dentro de la interfaz gráfica que forma parte del GOV, para de este modo prescindir del uso de aparatos adicionales como el osciloscopio que se utilizó para la obtención de graficas de voltaje, corriente y potencia del sistema.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Coronel, "Implementación de modelos de turbinas-gobernador de velocidad en sistemas eléctricos de potencia," Instituto Politecnico Nacional, 2014.
- [2] K. Cubi and A. Pilatuña, "Rediseño e implementación del grupo motor DC-generador sincrónico para el laboratorio de sistemas eléctricos de potencia," Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [3] J. Gómez, "Diseño e implementación de un variador de velocidad de bajo costo para un motor trifasico de inducción de 4 HP," Pontificia Universidad Catolica del Perú.
- [4] C. Pavón, "Diseño y construcción de un módulo didáctico de conversor dual con corriente circulante para el laboratorio de convertidores estáticos," Escuela Politecnica Nacional, 2012.
- [5] P. Kundur, *Power system stability controls*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [6] Kyung Chul Kim, "Microcomputer based turbine-governor simulation for a generating unit", The University of Texas at Arlingon, E.E.U.U, Texas, 1988.
- [7] D. Lara y F. Pachacama, "Diseño y construcción de un módulo de disparo para convertidores trifásicos", Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Quito, 2000.
- [8] Daniel Patricio Zapata Jaramillo, "Diseño y construcción de un módulo de control de disparo para el laboratorio de electrónica de potencia de la UPS", Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, Quito, 2018.
- [9] Romel Francisco Patiño Paucar, "Análisis de la implementación de un código de red para sistemas de control (AVR, GOV y PSS) de unidades de generación convencional del Sistema Nacional Interconectado", Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Quito, 2019.
- [10] P. Ponce, Máquinas Eléctricas "Técnicas modernas de control", México, Alfaomega, 2008.
- [11] J. Jativa, "Laboratorio de Máquinas Eléctricas", Quito, 2012.

- [12] F. Jaramillo y B. Silva, "Diseño, construcción e implementación de un generador fotovoltaico para el sistema a escala del laboratorio de sistemas eléctricos de potencia", Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Quito, 2020.
- [13] Laboratorio de Electrónica de Potencia, "Aislamiento entre la Etapa de Control y Potencia," Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2017.
- [14] "Regulación Nro. CONELEC-006/00 – Procedimientos de despacho y operación," Consejo Nacional de Electricidad. [Online]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/ProcedimientosDespacho.pdf> [Accessed: 22-Apr-2021].
- [15] Javier Trujillo Soto, "Simulación del control Potencia-Frecuencia en un Sistema Eléctrico de Potencia en Matlab", Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, España, Sevilla, 2016.
- [16] Ing. M. Arévalo y Ing. J. Rivera, "Construcción de módulos didácticos de Convertidores AC/DC para el aprendizaje práctico de los estudiantes de la carrera de Ingeniería de la Universidad Tecnológica Equinoccial", Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador, Quito, 2008.
- [17] St STMicroelectronics, UM – 14 67, "Guía de iniciación al kit de evaluación St STM32F4 Discovery".
- [18] R. Hernández Gaviño, Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab. México: Prentice Hall, 2010.
- [19] Ali Hmidet y Olfa Boubaker, "Real-Time Low-Cost Speed Monitoring and Control of Three-Phase Induction Motor via a Voltage/Frequency Control Approach", Universidad el Manar, Universidad Carthage, Túnez, Túnez, abril 2020.
- [20] Muhammad H. Rashid, Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones, Tercera Edición, Pearson, Prentice Hall, México, 2004.
- [21] J. J. Grainger y W. D. Stevenson, "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw Hill, México, 1996.
- [22] "VISUAL STUDIO .NET Y PUERTO SERIE", [Online]. Available: <http://profesores.sanvalero.net/~arnadillo/Documentos/Apuntes/Prototipo/Visual%20Basic/VISUAL%20BASIC.pdf> [Accessed: 10-May-2021].

- [23] Ali Hmidet y Othman Hasnaoui, "Waijung Blockset-STM32F4 Environment for Real Time Induction Motor Speed Control", Universidad el Manar, Universidad de Túnez, Túnez, Túnez, octubre 2018.
- [24] Célida Morelva Saeteros Ortiz, "Implementación de un control PID fuzzy para la regulación de nivel del módulo MPS PA COMPACT WORKSTATION mediante la tarjeta STM32F4 Discovery", Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, Quito, 2018.
- [25] Co, Aimagin. (2017). Waijung blockset, [Online]. Available: <https://www.aimagin.com/en/waijung-1-stm32-target.html> [Accessed: 12-Feb-2020].
- [26] Astrom, K. and Hagglund, "PID Controllers: Theory, Design and Tuning", Instrument Society of America, USA, 1995.
- [27] J. Maldonado, R. Garrido y G. Castro, "Real-time control prototype and its use in Automatic Control courses", Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN, Ciudad de México, México, octubre 2020.
- [28] N. Elsodany, S. Rezek, y N. Maharem, "Adaptive PID control of a stepper motor driving a flexible rotor", Alexandria Engineering Journal, Vol. 50, 2011.
- [29] "Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Motor Speed: Simulink Modeling", [Online]. Available: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SystemModeling> [Accessed: 26-Feb-2020].
- [30] Yasin Cakar, Yildiray Orman y Selcuk Kizir, "DESIGN OF A MODEL REFERENCE ADAPTIVE PID CONTROLLER FOR DC MOTOR POSITION CONTROL: COMPARED WITH PID AND FUZZY CONTROLLERS", Kocaeli University, Turquía, junio 2020.
- [31] Ernesto R. Herrera Guerra, Jorge L. García Sosa, Robby Gustabello Cogle, "Implementación de algoritmos de control en la Unidad # 1 de la Central Hidroeléctrica Hanabanilla para la regulación de frecuencia del Sistema Electro-energético Nacional" RIELAC, Vol. XXXIX 3/2018 p. 31-44 Septiembre – Diciembre.
- [32] A. G. Asipuela, C. F. González, C. F. Paredes Espinoza, "Diseño e Implementación de un sistema de control de velocidad y voltaje para la unidad 4 de Generación de la Central

Termoeléctrica Guangopolo”, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolqui, Ecuador, noviembre 2013.

[33] “Sistemas Automáticos de Control”, [Online]. Available: <http://ieshuelin.com/huelinwp/download/Tecnologia/Tecnologia%20industrial/3-SISTEMAS-AUTOMaTICOS-DE-CONTROL-ampliacion.pdf> [Accessed: 10-Jan-2020].

[34] Ing. Gabriel Arguello y Ing. Hermógenes Flores, “Estudio de Estabilidad de Pequeña Señal en el Sistema Nacional Interconectado Aplicando el Método de Análisis Modal”, XIX Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Quito, 2005.

ANEXOS

ANEXO A

Encendido del grupo motor – generador hasta la estabilización del grupo en 1200 rpm.

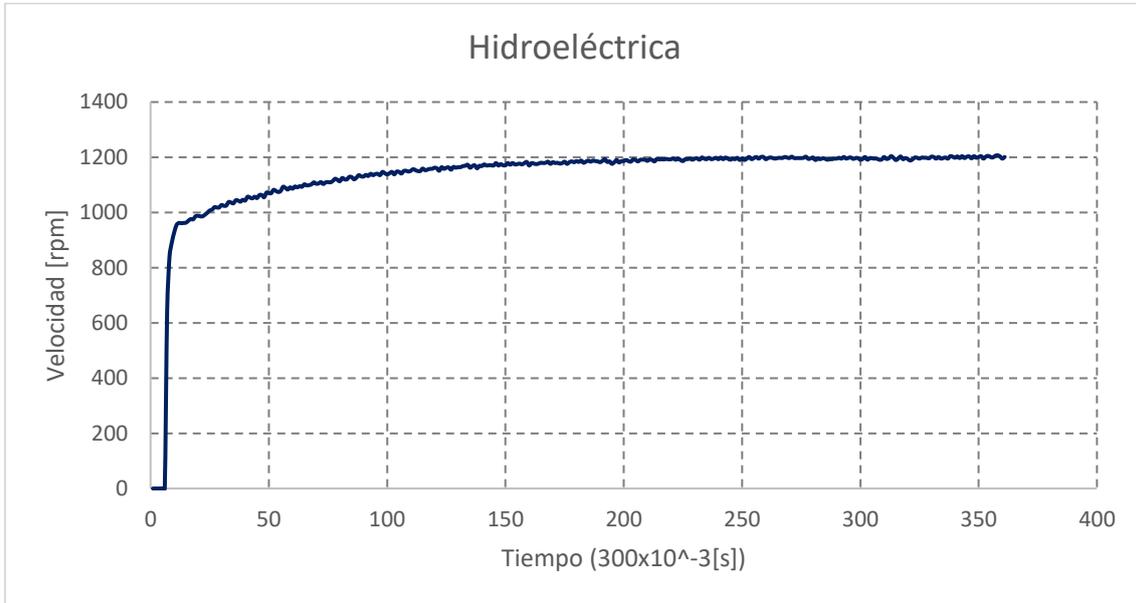


Figura A.1. Encendido con la Turbina Hidráulica

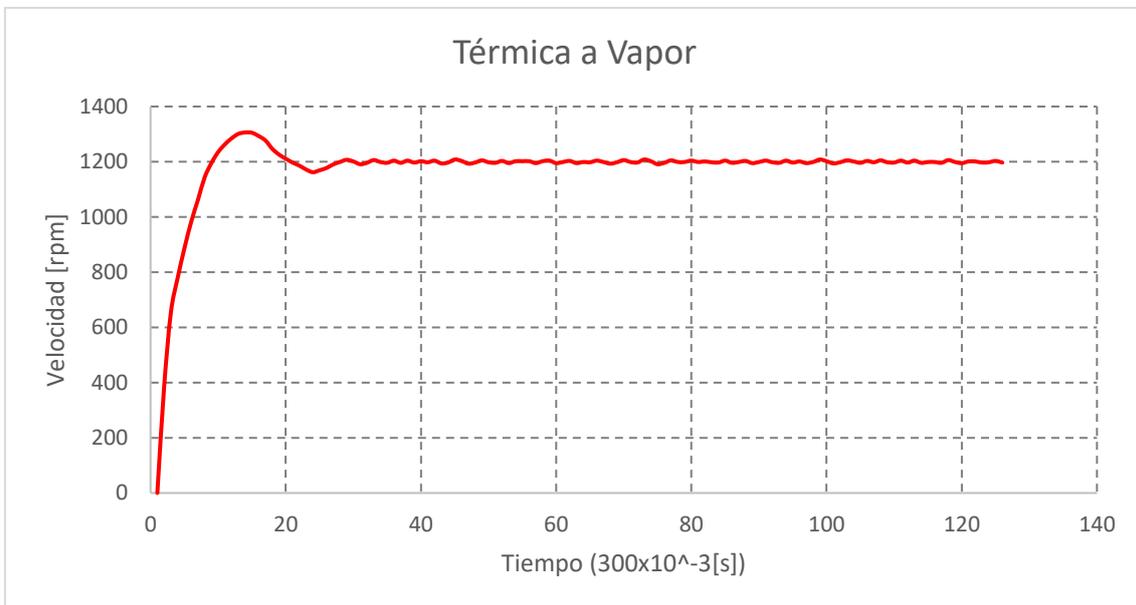


Figura A.2. Encendido con la Turbina Térmica a Vapor

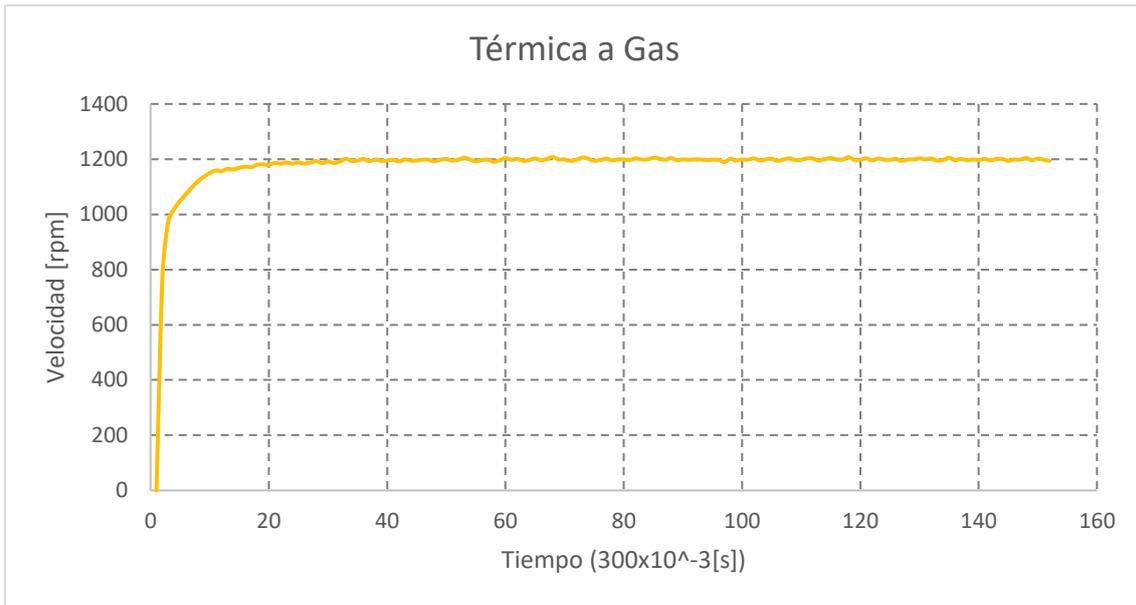


Figura A.3. Encendido con la Turbina Térmica a Gas

Tiempo de estabilización en el encendido del grupo motor – generador

Tabla A1.1. Tiempos de estabilización en 1200 rpm de cada turbina

TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN			
MÓDULO	Dato inicial	Dato final	Tiempo de recuperación
HIDROELÉCTRICA	4	241	71,1 [s]
TÉRMICA A VAPOR	2	36	10,2 [s]
TÉRMICA A GAS	2	67	19,5 [s]

ANEXO B

Pruebas de conexión y desconexión abrupta de carga conectado con los módulos PST – LTC, PST, LTC y el módulo de carga.

Prueba de conexión abrupta de carga

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo PST – LTC

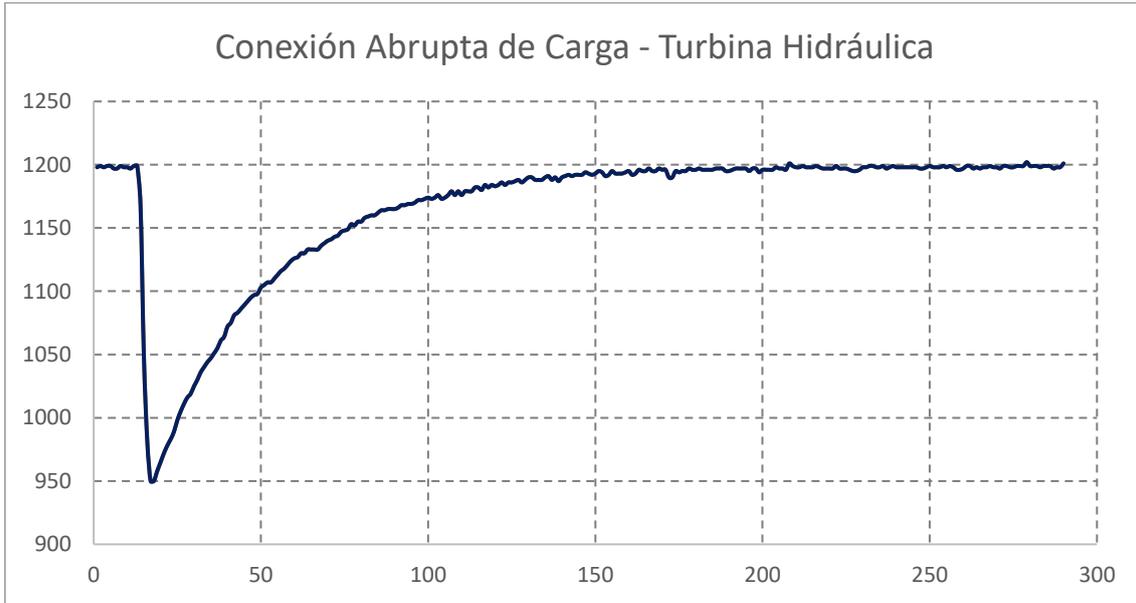


Figura B.1. Conexión abrupta de carga con modulo PST y LTC

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo PST

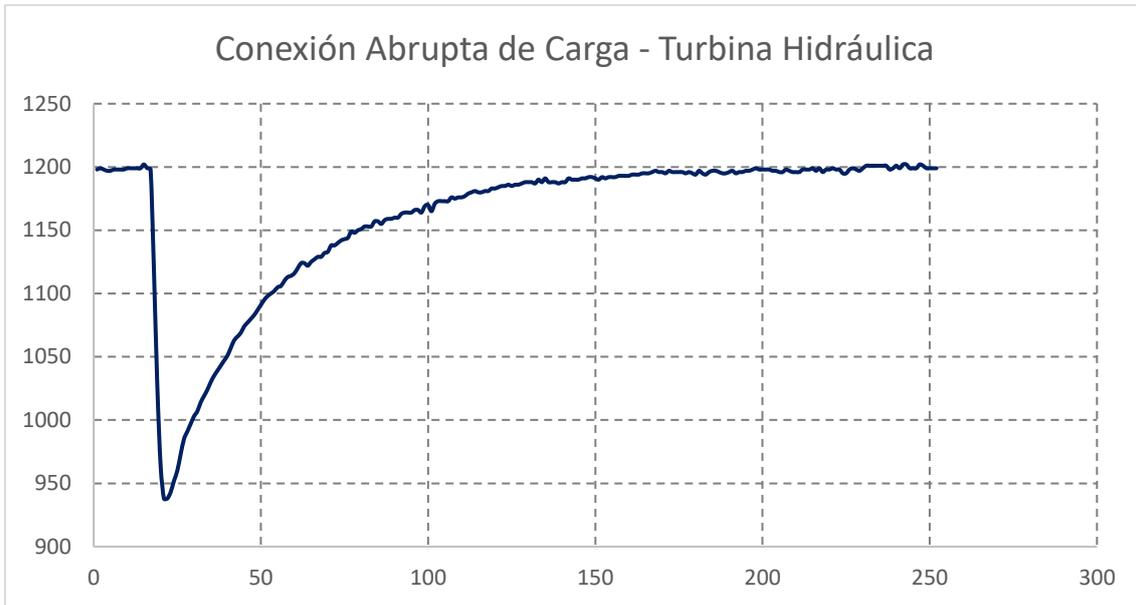


Figura B.2. Conexión abrupta de carga con modulo PST

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo LTC

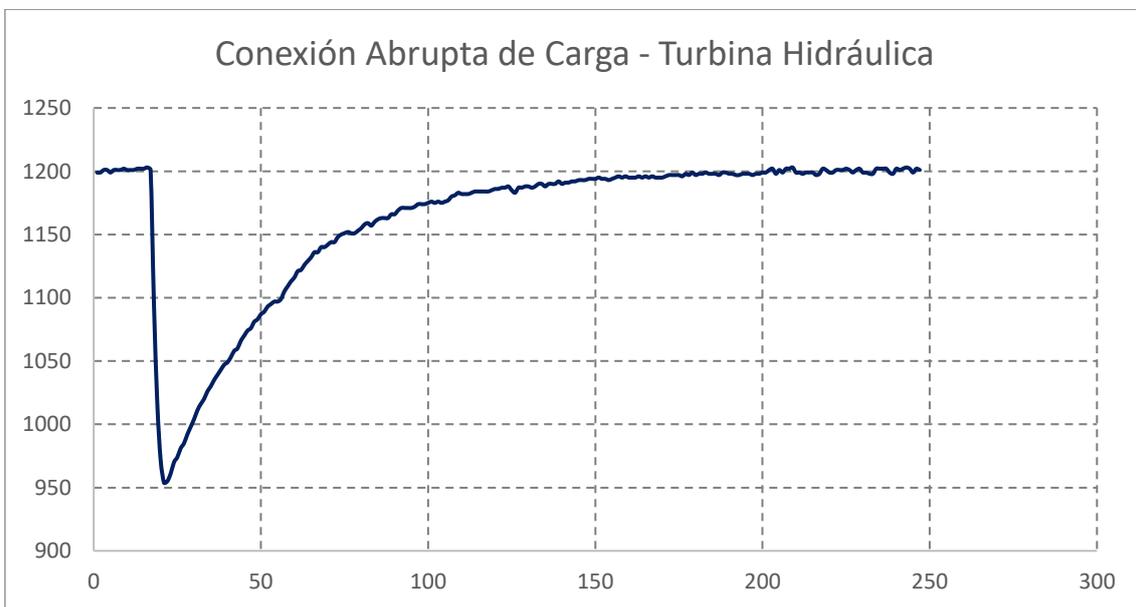


Figura B.3. Conexión abrupta de carga con modulo LTC

Tiempo de recuperación de la turbina hidráulica con cada uno de los módulos.

Tabla B.1. Tiempos de recuperación simulando la turbina hidráulica

TIEMPO DE RECUPERACIÓN EN LA PRUEBA DE CONEXIÓN ABRUPTA			
MÓDULO	Dato inicial	Dato final	Tiempo de recuperación
PST – LTC	17	212	58,5 [s]
PST	21	221	60 [s]
LTC	21	218	59,1 [s]

Prueba de desconexión abrupta de carga

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo PST – LTC

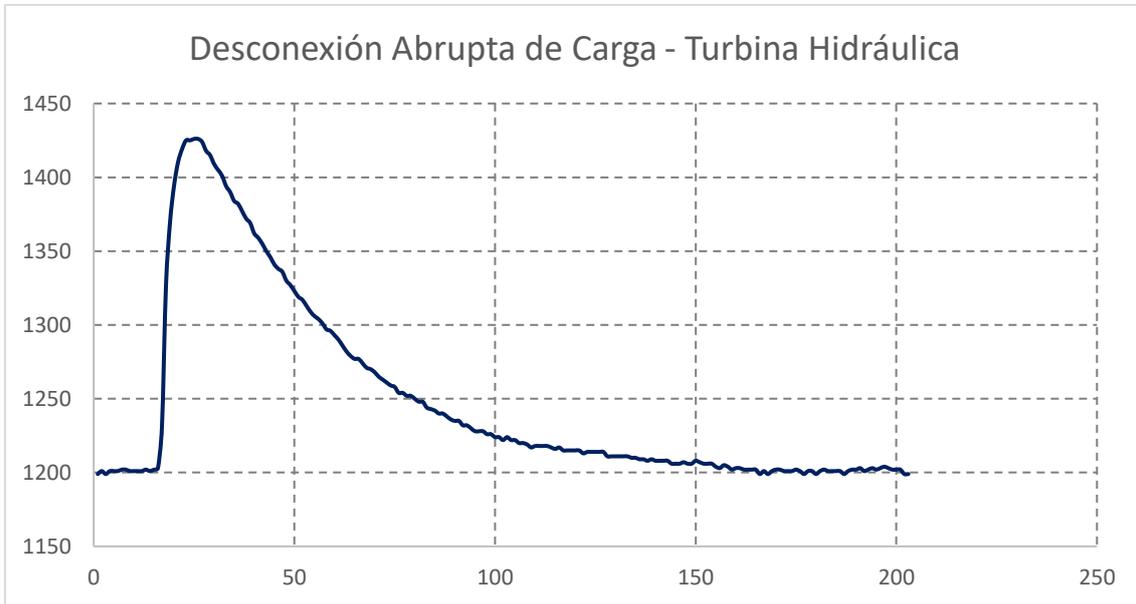


Figura B.4. Desconexión abrupta de carga con modulo PST y LTC

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo PST

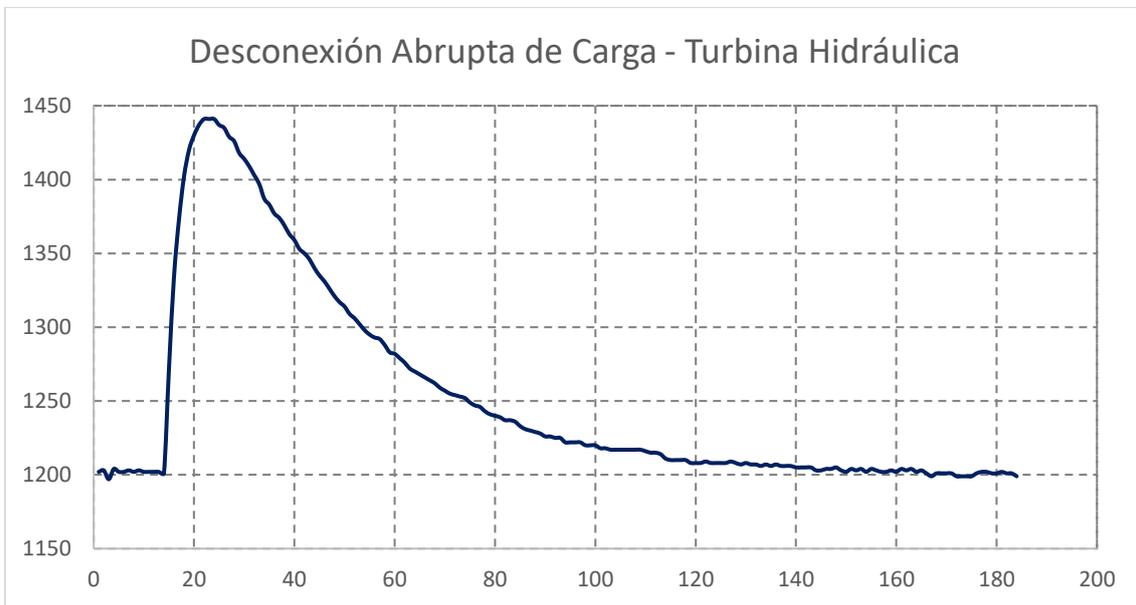


Figura B.5. Desconexión abrupta de carga con modulo PST

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo LTC

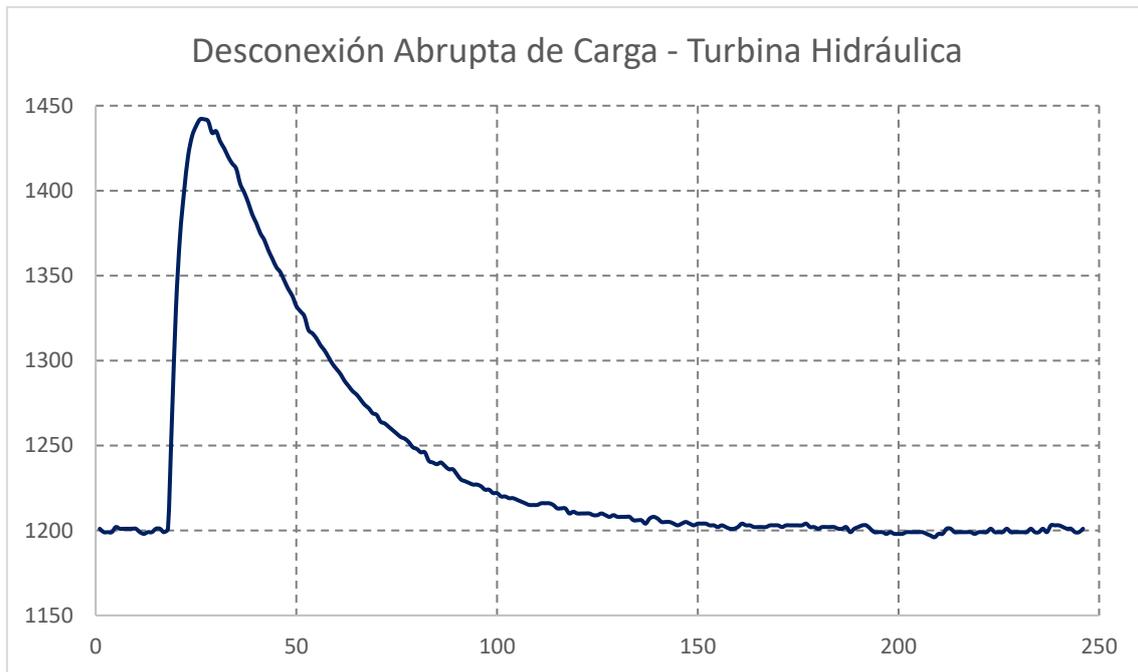


Figura B.6. Desconexión abrupta de carga con modulo LTC

Tiempo de recuperación de la turbina hidráulica con cada uno de los módulos.

Tabla B.2. Tiempos de recuperación simulando la turbina hidráulica

TIEMPO DE RECUPERACIÓN EN LA PRUEBA DE DESCONEXIÓN ABRUPTA			
MÓDULO	Dato inicial	Dato final	Tiempo de recuperación
PST – LTC	14	168	46,2 [s]
PST	13	166	45,9 [s]
LTC	16	171	46,5 [s]

Prueba de conexión abrupta de carga

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo PST – LTC

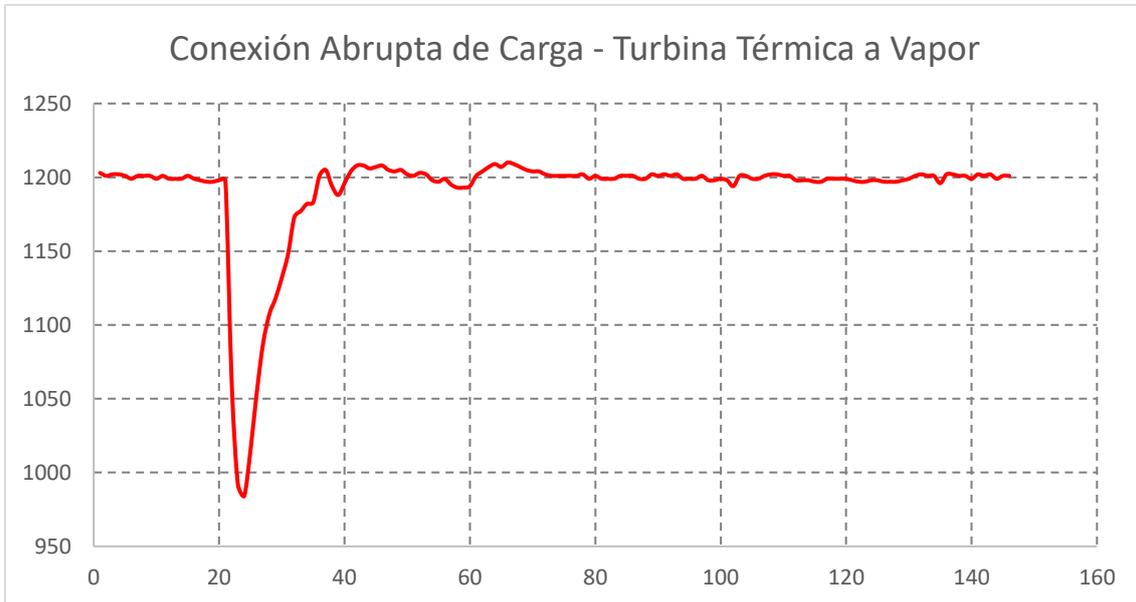


Figura B.7. Conexión abrupta de carga con modulo PST y LTC

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo PST

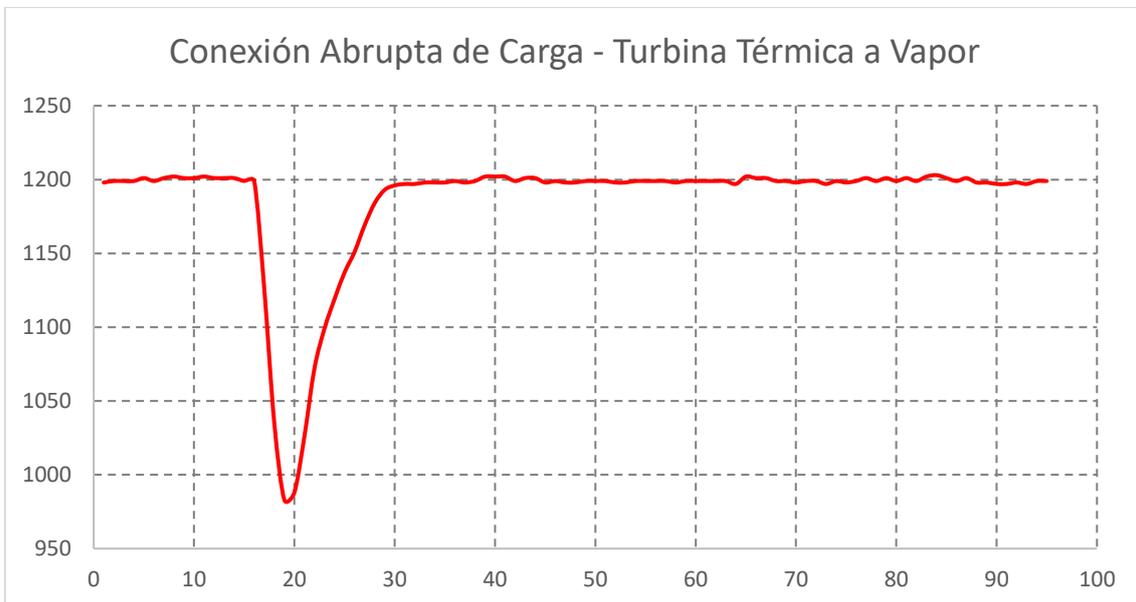


Figura B.8. Conexión abrupta de carga con modulo PST

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo LTC

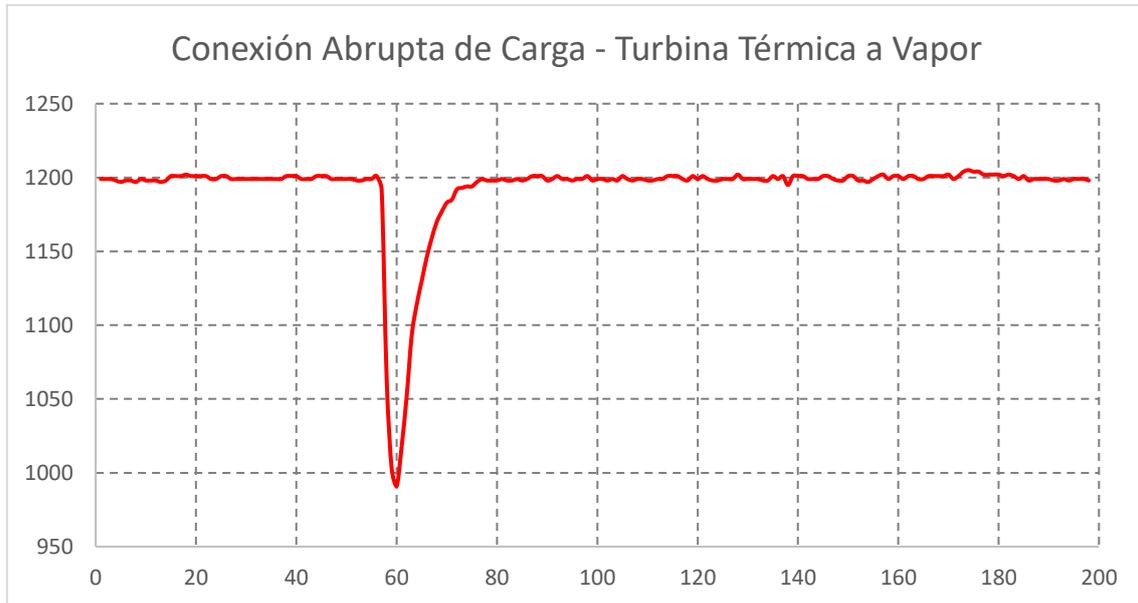


Figura B.9. Conexión abrupta de carga con modulo LTC

Tiempo de recuperación de la turbina térmica a vapor con cada uno de los módulos.

Tabla B.3. Tiempos de recuperación simulando la turbina térmica a vapor

TIEMPO DE RECUPERACIÓN EN LA PRUEBA DECONEXIÓN ABRUPTA			
MÓDULO	Dato inicial	Dato final	Tiempo de recuperación
PST – LTC	20	53	9,9 [s]
PST	16	46	9 [s]
LTC	55	86	9,3 [s]

Prueba de desconexión abrupta de carga

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo PST – LTC

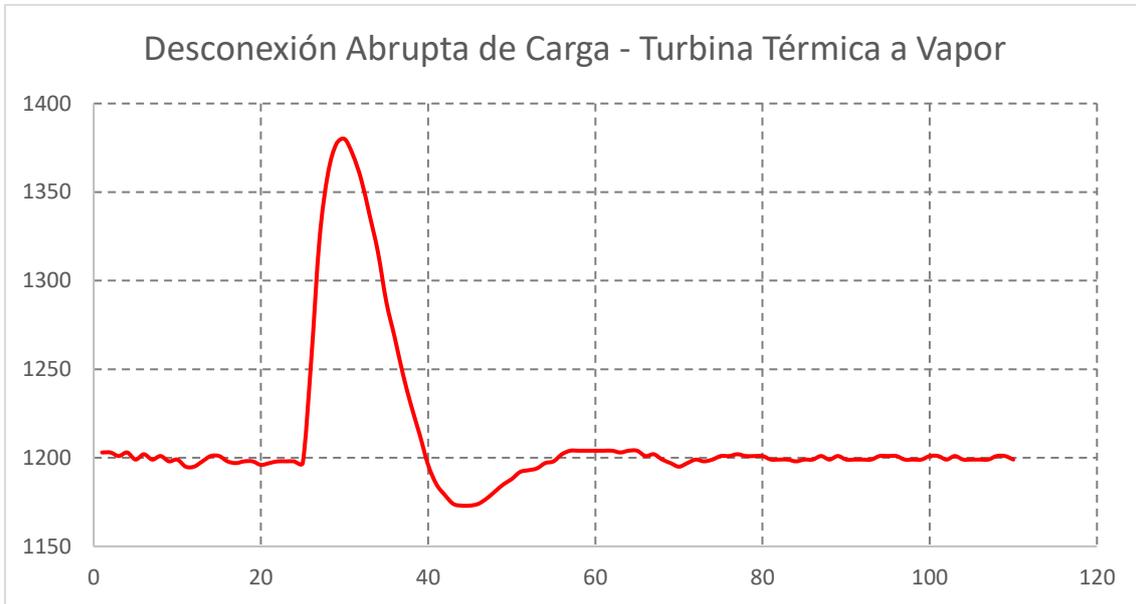


Figura B.10. Desconexión abrupta de carga con modulo PST y LTC

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo PST

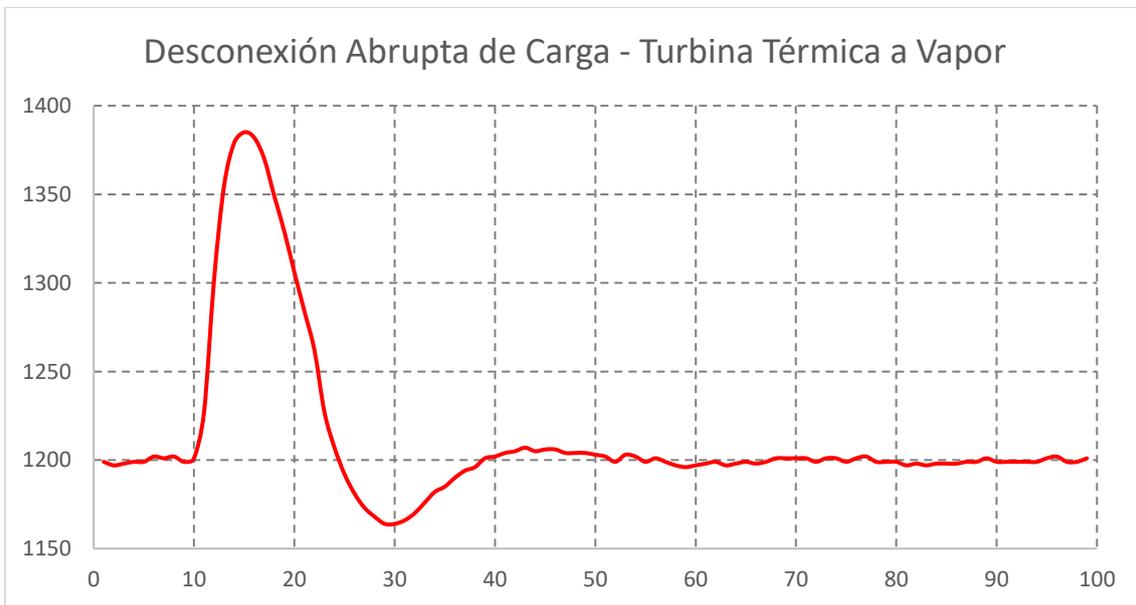


Figura B.11. Desconexión abrupta de carga con modulo PST

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo LTC

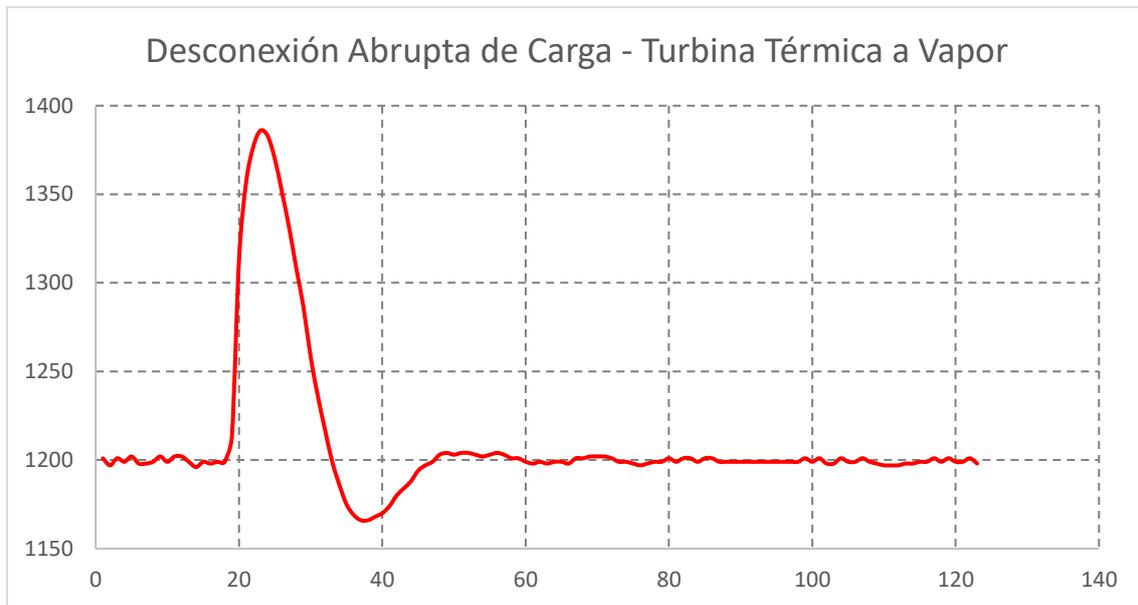


Figura B.12. Desconexión abrupta de carga con modulo LTC

Tiempo de recuperación de la turbina térmica a vapor con cada uno de los módulos.

Tabla B.4. Tiempos de recuperación simulando la turbina térmica a vapor

TIEMPO DE RECUPERACIÓN EN LA PRUEBA DE DESCONEXIÓN ABRUPTA			
MÓDULO	Dato inicial	Dato final	Tiempo de recuperación
PST – LTC	24	76	15,6 [s]
PST	10	61	15,3 [s]
LTC	17	69	15,6 [s]

Prueba de conexión abrupta de carga

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo PST – LTC

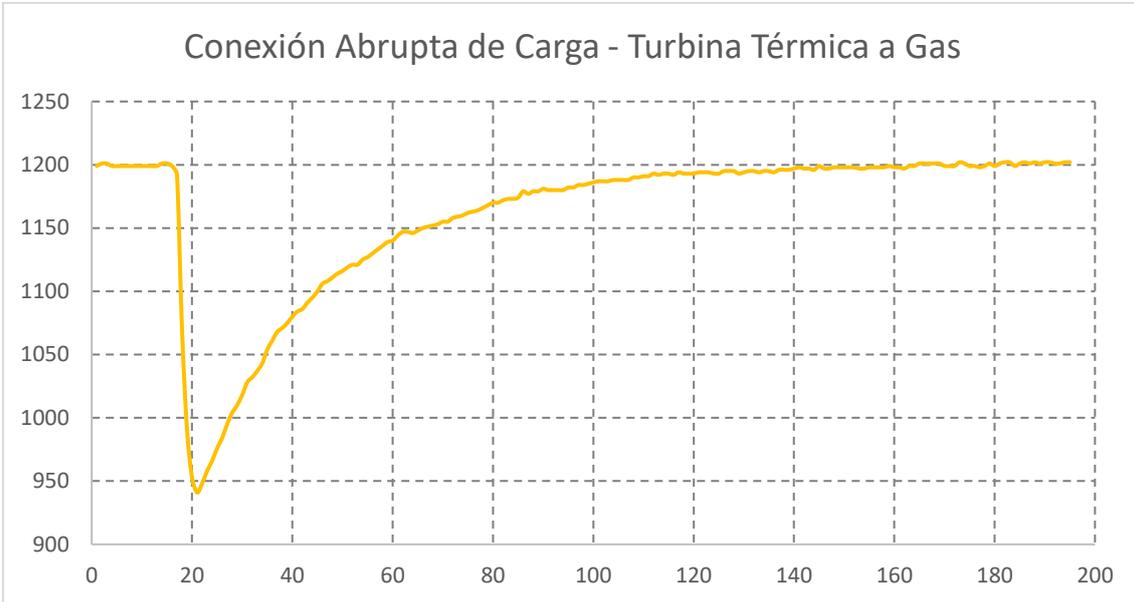


Figura B.13. Conexión abrupta de carga con modulo PST y LTC

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo PST

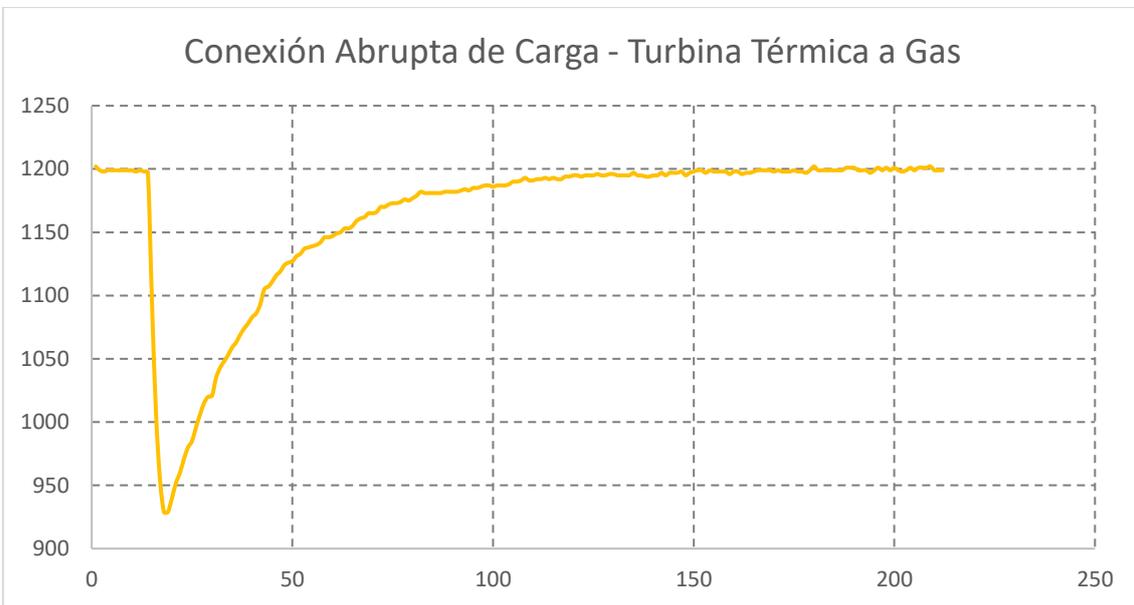


Figura B.14. Conexión abrupta de carga con modulo PST

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo LTC

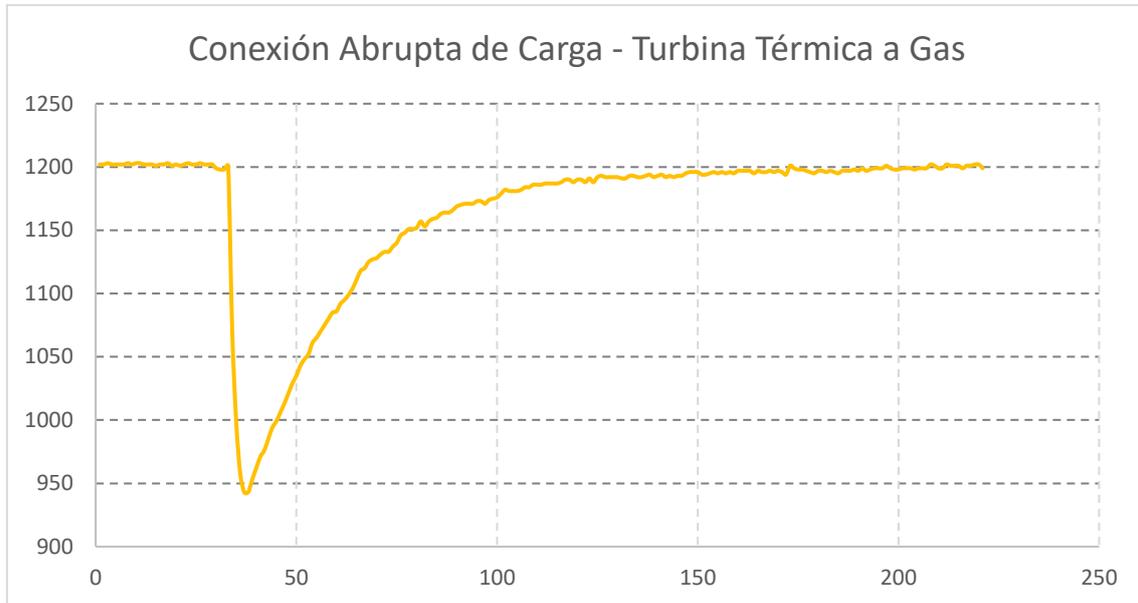


Figura B.15. Conexión abrupta de carga con modulo LTC

Tiempo de recuperación de la turbina térmica a gas con cada uno de los módulos.

Tabla B.5. Tiempos de recuperación simulando la turbina térmica a gas

TIEMPO DE RECUPERACIÓN EN LA PRUEBA DECONEXIÓN ABRUPTA			
MÓDULO	Dato inicial	Dato final	Tiempo de recuperación
PST – LTC	14	175	48,3 [s]
PST	12	175	48,9 [s]
LTC	31	196	49,5 [s]

Prueba de desconexión abrupta de carga

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo PST – LTC

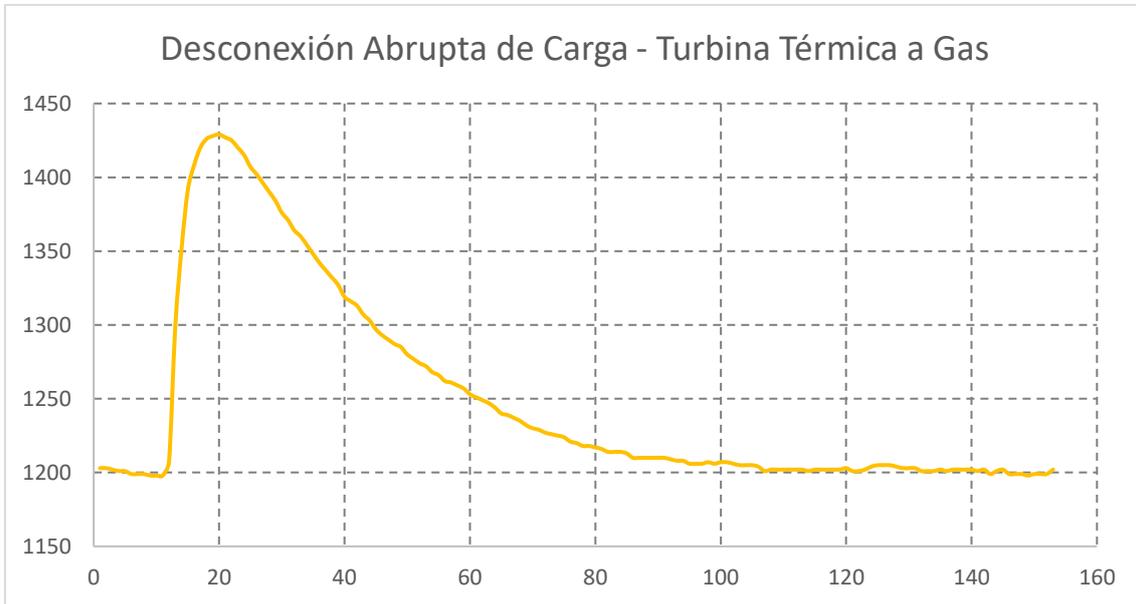


Figura B.16. Desconexión abrupta de carga con modulo PST y LTC

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo PST

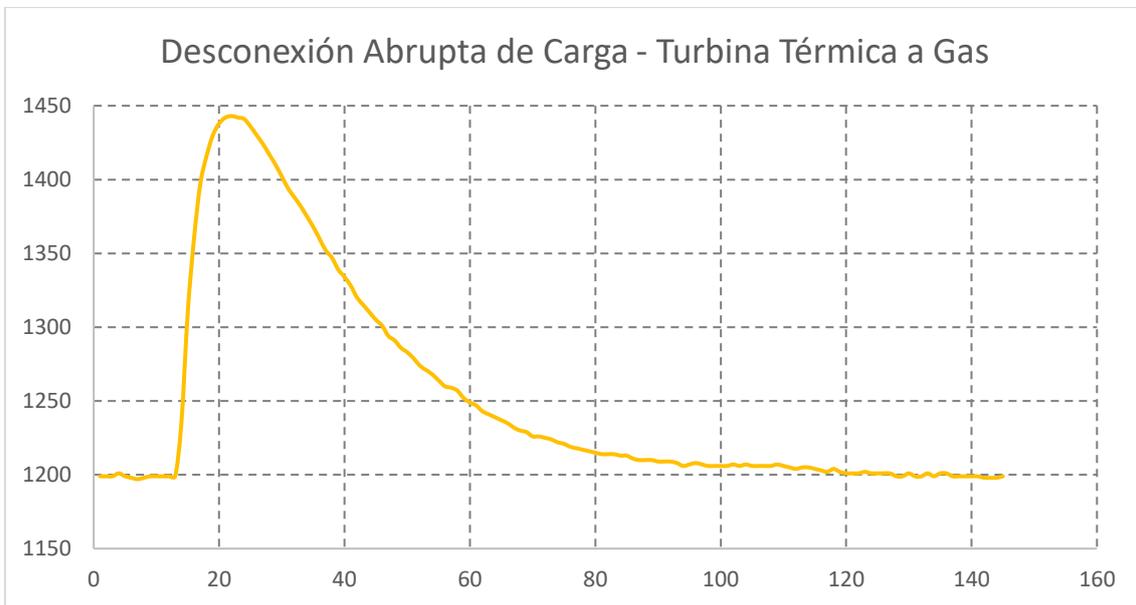


Figura B.17. Desconexión abrupta de carga con modulo PST

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo LTC

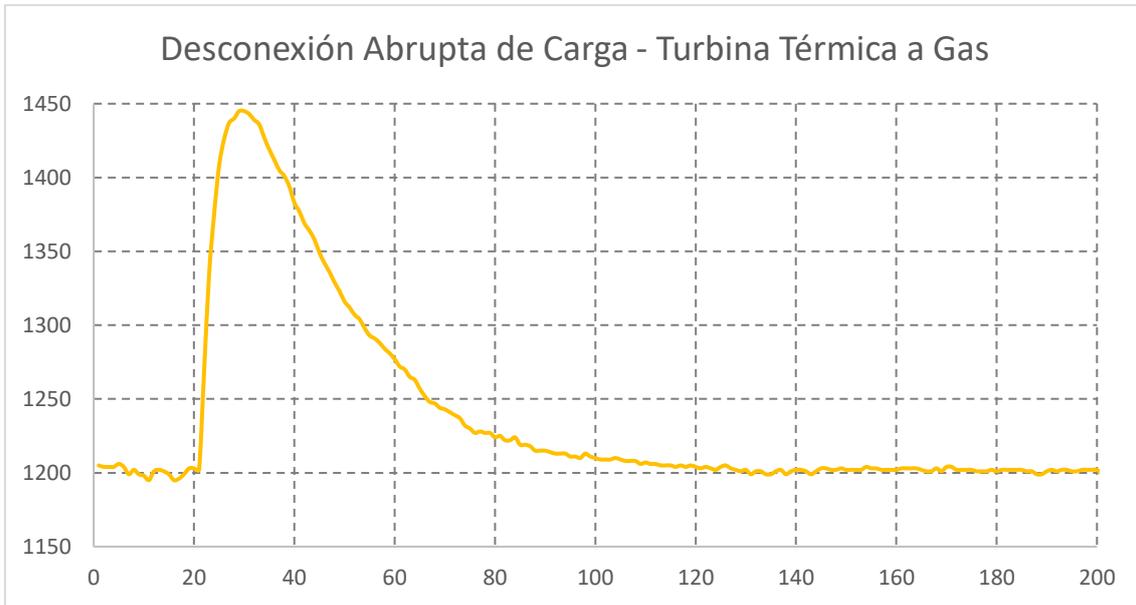


Figura B.18. Desconexión abrupta de carga con modulo LTC

Tiempo de recuperación de la turbina térmica a gas con cada uno de los módulos.

Tabla B.6. Tiempos de recuperación simulando la turbina térmica a gas

TIEMPO DE RECUPERACIÓN EN LA PRUEBA DE DESCONEXIÓN ABRUPTA			
MÓDULO	Dato inicial	Dato final	Tiempo de recuperación
PST – LTC	10	113	30,9 [s]
PST	12	119	32,1 [s]
LTC	20	127	32,1 [s]

ANEXO C

Tablas de resultados obtenidos en el motor de corriente continua y el generador sincrónico con cada una de las cargas del módulo del Laboratorio Físico de SEP y las turbinas a ser simuladas,

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo PST – LTC

Tabla C.1. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRÓNICO								
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	3,6	8,75	220,3	213,5	210,2	1,54	3,26	2,63
LAMPARA DE MERCURIO	3,4	8,19	220,0	213,6	211,5	1,49	3,25	2,1
UPS	3,1	7,45	220,1	214,1	213,9	1,89	3,22	1,57
FOCOS LED	3,1	7,44	220,0	213,4	213,2	2,09	3,27	1,58
LAMPARAS FLORECENTES	3,1	7,67	220,1	214,2	215,1	1,86	3,11	1,83
FOCOS AHORRADORES	3,2	7,65	220,3	214,0	213,9	2,84	3,39	1,99
LAMPARAS INCANDESCENTES	3,4	8,13	220,0	215,7	216,4	1,99	2,89	2,2
REFRIGERADOR	3,2	7,88	220,1	212,7	212,0	1,77	3,36	1,74
CALEFACTOR	4,1	9,98	220,7	212,9	201,5	2,04	6,66	8,14
ASPIRADORA	3,6	8,77	220,0	212,3	206,2	1,22	5,05	5,09
AIRE ACONDICIONADO	3,2	7,66	220,1	213,3	213,3	1,79	1,36	1,74
VARIADOR DE VELOCIDAD	3,1	7,55	220,2	213,0	213,1	1,89	3,24	1,53

Tabla C.2. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	144,0	7,47	190,6	1,4
LAMPARA DE MERCURIO	143,3	6,92	190,5	1,39
UPS	142,5	6,81	190,6	1,39
FOCOS LED	142,4	6,88	191,1	1,39
LAMPARAS FLORECENTES	143,6	7,72	190,8	1,39
FOCOS AHORRADORES	143,7	7,92	191,1	1,38
LAMPARAS INCANDESCENTES	145,4	8,9	190,7	1,38
REFRIGERADOR	141,9	7,05	191,4	1,38
CALEFACTOR	154,1	15,23	187,9	1,37
ASPIRADORA	147,9	11,34	188,5	1,37
AIRE ACONDICIONADO	140,3	6,92	190,5	1,38
VARIADOR DE VELOCIDAD	139,8	6,74	190,6	1,37

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo PST – LTC

Tabla C.3. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRONICO								
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	3,6	8,72	220,1	213,2	210,2	1,47	3,26	2,64
LAMPARA DE MERCURIO	3,5	8,44	220,5	212,8	211,4	1,52	3,26	2,15
UPS	3,2	7,75	220,9	214	214,1	1,84	3,21	1,55
FOCOS LED	3,2	7,72	220,1	212,5	211,2	2,04	3,3	5,6
LAMPARAS FLORECENTES	3,4	8,13	220,6	213,9	213,1	1,77	3,03	1,76
FOCOS AHORRADORES	3,4	7,98	220,6	212,1	211,9	2,77	3,41	1,91
LAMPARAS INCANDESCENTES	3,5	8,36	220,5	215,3	216,1	1,96	2,87	2,16
REFRIGERADOR	3,4	8,12	220	211,4	211,3	1,74	3,35	1,74
CALEFACTOR	4,2	10,05	220,2	210,5	201,2	2,1	6,67	8,17
ASPIRADORA	3,7	8,87	220,5	210,9	205,8	1,25	5,03	5,12
AIRE ACONDICIONADO	3,3	7,85	220,1	211,9	212,4	1,76	3,36	1,74
VARIADOR DE VELOCIDAD	3,4	7,95	220,7	212,5	213,2	1,83	3,25	1,51

Tabla C.4. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	141,3	7,52	191,2	1,37
LAMPARA DE MERCURIO	140,2	6,92	191,3	1,38
UPS	139,7	6,84	191,2	1,36
FOCOS LED	139,5	6,94	192,3	1,35
LAMPARAS FLORECENTES	140,5	7,77	191,7	1,35
FOCOS AHORRADORES	141,0	8,05	191,7	1,35
LAMPARAS INCANDESCENTES	142,5	9,06	191,7	1,36
REFRIGERADOR	139,2	7,17	192,6	1,36
CALEFACTOR	152,2	15,71	189,5	1,34
ASPIRADORA	146,4	11,56	190,7	1,36
AIRE ACONDICIONADO	138,7	7,11	192,8	1,36
VARIADOR DE VELOCIDAD	138,4	6,82	193,1	1,37

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo PST – LTC

Tabla C.5. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRÓNICO								
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	3,7	8,9	220,0	213,0	210,4	1,48	3,23	2,69
LAMPARA DE MERCURIO	3,5	8,54	220,4	212,9	211,4	1,53	3,24	2,19
UPS	3,3	7,86	220,1	213,1	213,7	1,82	3,21	1,57
FOCOS LED	3,3	7,83	220,3	212,5	213,1	2,03	3,27	1,54
LAMPARAS FLORECENTES	3,5	8,07	220,1	213,3	214,1	1,76	3,07	1,77
FOCOS AHORRADORES	3,5	8,09	220,9	212,8	212,9	2,74	3,41	1,91
LAMPARAS INCANDESCENTES	3,6	8,51	220,5	215,1	216,0	1,93	2,87	2,16
REFRIGERADOR	3,5	8,2	220,6	211,4	212,3	1,72	3,34	1,81
CALEFACTOR	4,3	10,17	220,3	211,2	201,9	2,16	6,68	8,23
ASPIRADORA	3,9	9,12	220,3	212,9	208,4	1,31	5,02	5,19
AIRE ACONDICIONADO	3,4	7,92	220,4	212,3	212,9	1,74	3,32	1,73
VARIADOR DE VELOCIDAD	3,4	7,95	220,8	213,4	214,2	1,82	3,23	1,54

Tabla C.6. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [A]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		DE CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	140,4	7,61	193,3	1,37
LAMPARA DE MERCURIO	139,2	7,02	193,7	1,37
UPS	139,1	6,97	193,4	1,36
FOCOS LED	139,1	7,09	193,7	1,37
LAMPARAS FLORECENTES	140,5	7,85	193,1	1,37
FOCOS AHORRADORES	140,9	8,1	193,1	1,36
LAMPARAS INCANDESCENTES	142,6	9,14	192,8	1,37
REFRIGERADOR	139,4	7,25	193,1	1,37
CALEFACTOR	153,2	15,64	190,5	1,35
ASPIRADORA	147,4	11,67	191,5	1,36
AIRE ACONDICIONADO	139,4	7,16	193,4	1,37
VARIADOR DE VELOCIDAD	139,0	6,78	193,1	1,37

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo PST

Tabla C.7. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRÓNICO								
CARGAS	VOLTAJE [A]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	4,6	11,05	220,4	216,3	212,8	1,99	1,52	2,96
LAMPARA DE MERCURIO	4,4	10,55	220	215,9	214,4	1,49	1,51	2,47
UPS	4,1	9,76	220,2	216,7	216,6	0,91	1,54	1,32
FOCOS LED	4,1	9,78	220	216,9	216,7	1,06	1,67	1,27
LAMPARAS FLORECENTES	4,2	10,05	220,4	217,7	217,6	1,12	1,64	1,41
FOCOS AHORRADORES	4,1	10,05	220,5	218,9	218,7	1,71	1,93	1,39
LAMPARAS INCANDESCENTES	4,2	10,27	220,1	219,1	219,6	1,79	1,84	1,48
REFRIGERADOR	4,3	10,22	220,8	216,7	216,2	1,01	1,77	1,95
CALEFACTOR	4,9	11,74	220,7	216,7	204,8	2,97	4,48	7,27
ASPIRADORA	4,5	10,77	220,8	217,3	210,7	1,81	3,14	4,72
AIRE ACONDICIONADO	4,1	9,89	220,8	217,9	216,8	0,9	1,62	1,54
VARIADOR DE VELOCIDAD	4,1	9,87	220,9	217,8	217,7	0,89	1,55	1,36

Tabla C.8. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	143,5	5,06	192,3	1,44
LAMPARA DE MERCURIO	142,4	6,57	192,3	1,43
UPS	141,5	6,45	192,2	1,42
FOCOS LED	144,7	6,49	192,4	1,43
LAMPARAS FLORECENTES	142,2	7,08	192,2	1,43
FOCOS AHORRADORES	142,9	7,58	192,1	1,43
LAMPARAS INCANDESCENTES	143,9	8,55	192,1	1,42
REFRIGERADOR	141,3	6,87	193,1	1,42
CALEFACTOR	152,7	14,06	190,5	1,41
ASPIRADORA	147,3	10,7	192,8	1,41
AIRE ACONDICIONADO	140,1	6,67	193,7	1,42
VARIADOR DE VELOCIDAD	139,8	6,35	194,1	1,43

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo PST

Tabla C.9. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRÓNICO								
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	4,2	10,77	220	216,9	213,2	1,82	1,52	2,77
LAMPARA DE MERCURIO	4,1	10,53	220,1	216,4	214,1	1,49	1,53	2,39
UPS	3,8	9,69	220,1	217,1	216,9	0,87	1,55	1,32
FOCOS LED	3,9	9,64	220,8	217,7	217,8	1,05	1,66	1,27
LAMPARAS FLORECENTES	3,9	9,89	220,6	219,1	219,3	1,05	1,67	1,32
FOCOS AHORRADORES	3,9	9,98	220,5	218,6	218,9	1,71	1,87	1,37
LAMPARAS INCANDESCENTES	4,1	10,35	220,8	220,7	220,5	1,59	1,86	1,51
REFRIGERADOR	4	10,02	220	216,2	215,7	0,98	1,73	1,89
CALEFACTOR	4,6	11,67	220,1	216,3	204,8	2,97	4,47	7,25
ASPIRADORA	4,3	10,79	220,5	217,2	210,6	1,87	3,18	4,73
AIRE ACONDICIONADO	3,9	9,77	220,7	217,1	216,4	0,93	1,64	1,51
VARIADOR DE VELOCIDAD	3,9	9,76	220,9	217,4	217,4	0,9	1,56	1,35

Tabla C.10. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	156,3	7,31	189,6	1,5
LAMPARA DE MERCURIO	153,1	6,63	188,6	1,48
UPS	152	6,55	188,7	1,47
FOCOS LED	151,6	6,71	189	1,46
LAMPARAS FLORECENTES	152,2	7,35	188,3	1,47
FOCOS AHORRADORES	151,9	7,64	188,2	1,45
LAMPARAS INCANDESCENTES	152,4	8,58	187,9	1,45
REFRIGERADOR	149,1	6,85	188,3	1,45
CALEFACTOR	158,9	13,94	185,7	1,41
ASPIRADORA	153,8	10,74	186,7	1,42
AIRE ACONDICIONADO	147,1	6,69	187,3	1,43
VARIADOR DE VELOCIDAD	147,2	6,39	191,7	1,44

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo PST

Tabla C.11. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRÓNICO								
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	4,4	10,92	220,2	216,8	213,3	1,91	1,49	2,84
LAMPARA DE MERCURIO	4,3	10,5	220,1	216,5	214,2	1,46	1,49	2,35
UPS	4	9,87	220,7	217,8	217,4	0,91	1,53	1,38
FOCOS LED	4	9,89	220,7	217,9	217,8	1,05	1,67	1,3
LAMPARAS FLORECENTES	4,1	10,08	220,7	218,8	219,2	1,05	1,69	1,36
FOCOS AHORRADORES	4,1	10,11	220,6	218,9	218,7	1,68	1,89	1,42
LAMPARAS INCANDESCENTES	4,2	10,35	220,6	220,3	220,8	1,59	1,84	1,51
REFRIGERADOR	4,1	10,15	220,6	216,9	216,2	0,99	1,79	1,94
CALEFACTOR	4,8	11,78	220,8	215,7	205,2	3,03	4,49	7,32
ASPIRADORA	4,3	10,7	220,1	215,5	209,7	1,82	3,11	4,71
AIRE ACONDICIONADO	4	9,85	220,1	216,2	215,9	0,89	1,62	1,55
VARIADOR DE VELOCIDAD	4	9,77	220,1	216,4	216,7	0,99	1,55	1,34

Tabla C.12. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MODULO DE CARGA - MOTOR				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	148,3	7,18	191,4	1,45
LAMPARA DE MERCURIO	147,3	6,57	192,4	1,44
UPS	146,7	6,52	192,1	1,44
FOCOS LED	146,5	6,61	192,1	1,44
LAMPARAS FLORECENTES	147,9	7,35	192,1	1,44
FOCOS AHORRADORES	148,2	7,59	191,7	1,44
LAMPARAS INCANDESCENTES	149,2	8,44	191,1	1,43
REFRIGERADOR	146,1	6,79	192,2	1,44
CALEFACTOR	156,7	13,94	188,9	1,4
ASPIRADORA	151,1	10,77	189,8	1,41
AIRE ACONDICIONADO	144,1	6,62	191,6	1,42
VARIADOR DE VELOCIDAD	143,1	6,33	191,2	1,42

Simulación de la Turbina Hidráulica con el módulo LTC

Tabla C.13. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRÓNICO								
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	4,3	10,85	220,4	216,8	212,9	1,91	1,54	2,76
LAMPARA DE MERCURIO	4,3	10,75	220,4	216,7	213,9	1,76	1,51	2,65
UPS	4,1	9,98	220,5	217,7	217,4	0,97	1,49	1,56
FOCOS LED	4	10,02	220,9	217,6	217,1	1,13	1,63	1,49
LAMPARAS FLORECENTES	4,1	9,97	220,6	217,2	217,5	0,96	1,53	1,45
FOCOS AHORRADORES	4,1	10,07	220,2	217,5	217,6	1,77	1,89	1,51
LAMPARAS INCANDESCENTES	4,2	10,42	220,4	217,6	219,3	1,48	1,77	1,74
REFRIGERADOR	4,1	10,22	220,9	216,7	211,3	1,12	1,75	2,14
CALEFACTOR	4,7	11,63	220	214,7	202,6	2,95	4,48	7,29
ASPIRADORA	4,4	10,77	220,5	215,5	208,1	1,64	3,17	4,75
AIRE ACONDICIONADO	4	9,77	220,1	215,4	214,3	0,95	1,64	1,63
VARIADOR DE VELOCIDAD	4,1	9,94	220,6	215,4	216,2	0,99	1,56	1,53

Tabla C.14. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [A]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	147,1	7,35	188,8	1,49
LAMPARA DE MERCURIO	144,6	6,71	188,4	1,51
UPS	144,9	6,62	189,1	1,42
FOCOS LED	144,2	6,63	189,3	1,47
LAMPARAS FLORECENTES	146,2	7,43	188,7	1,47
FOCOS AHORRADORES	145,6	7,53	188,5	1,47
LAMPARAS INCANDESCENTES	147,6	8,54	188,1	1,47
REFRIGERADOR	142,4	6,25	188,9	1,47
CALEFACTOR	153,3	13,71	186,2	1,45
ASPIRADORA	147,3	10,82	187,7	1,44
AIRE ACONDICIONADO	140,5	6,58	189,1	1,46
VARIADOR DE VELOCIDAD	140,3	6,74	188,7	1,45

Simulación de la Turbina Térmica a Vapor con el módulo LTC

Tabla C.15. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRÓNICO								
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	4,3	10,72	220,4	216,3	211,5	1,85	1,47	2,8
LAMPARA DE MERCURIO	4,3	10,7	220,3	216,1	215,7	1,75	1,52	2,61
UPS	4,0	9,93	220,4	217,1	216,6	0,96	1,53	1,54
FOCOS LED	4,0	9,93	220,7	217,2	216,9	1,12	1,66	1,47
LAMPARAS FLORECENTES	4,1	10,15	220,6	217,6	216,6	1,1	1,54	1,59
FOCOS AHORRADORES	4,1	10,14	220,9	218,8	218,3	1,77	1,9	1,53
LAMPARAS INCANDESCENTES	4,2	10,37	220,2	218,7	218,9	1,47	1,76	1,62
REFRIGERADOR	4,1	10,18	220,5	215,9	214,9	1,11	1,77	2,13
CALEFACTOR	4,8	11,82	220,9	216,6	204,2	3,05	4,54	7,38
ASPIRADORA	4,4	10,81	220,8	216,4	209,5	1,92	3,15	4,89
AIRE ACONDICIONADO	4,0	9,92	220,2	217,0	216,1	0,97	1,66	1,68
VARIADOR DE VELOCIDAD	4,2	9,9	220,6	216,7	216,3	0,98	1,55	1,52

Tabla C.16. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	149,2	7,34	192,7	1,48
LAMPARA DE MERCURIO	146,6	6,82	192,7	1,48
UPS	146,6	6,53	193,4	1,49
FOCOS LED	147,1	6,62	193,6	1,49
LAMPARAS FLORECENTES	147,4	7,11	192,8	1,48
FOCOS AHORRADORES	148,1	7,56	192,4	1,49
LAMPARAS INCANDESCENTES	149,6	8,47	192,4	1,48
REFRIGERADOR	146,3	6,81	193,1	1,47
CALEFACTOR	157,0	13,78	190,3	1,45
ASPIRADORA	151,6	10,68	191,1	1,46
AIRE ACONDICIONADO	145,1	6,62	192,8	1,48
VARIADOR DE VELOCIDAD	144,2	6,32	192,5	1,46

Simulación de la Turbina Térmica a Gas con el módulo LTC

Tabla C.17. Datos obtenidos en el generador sincrónico de voltajes y corrientes

GENERADOR SINCRÓNICO								
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]			CORRIENTE [A]		
			GENERACIÓN					
	EXCITACIÓN		VAB	VBC	VAC	IA	IB	IC
LAMPARA DE SODIO	4,5	11,16	220,6	216,6	212,6	2,24	1,57	3,19
LAMPARA DE MERCURIO	4,4	10,64	220,3	216,1	212,9	1,73	1,54	2,61
UPS	4	9,92	220,7	216,2	215,7	0,97	1,57	1,53
FOCOS LED	4,1	9,83	220	216,4	215,7	1,12	1,64	1,45
LAMPARAS FLORECENTES	4,2	10,21	220,4	218,1	217,1	1,12	1,58	1,71
FOCOS AHORRADORES	4,1	10,11	220,3	218,3	217,7	1,71	1,88	1,5
LAMPARAS INCANDESCENTES	4,2	10,31	220	218,3	218,2	1,47	1,75	1,62
REFRIGERADOR	4,2	10,18	220,5	216,3	214,7	1,11	1,77	2,14
CALEFACTOR	4,8	11,77	220,3	215,5	203,7	3,02	4,55	7,36
ASPIRADORA	4,5	10,87	220,6	216,3	210,1	1,94	3,15	4,69
AIRE ACONDICIONADO	4,1	9,87	220,2	216,7	215,6	0,99	1,69	1,7
VARIADOR DE VELOCIDAD	4,1	9,87	220,3	216	215,7	0,98	1,53	1,52

Tabla C.18. Datos obtenidos en el motor de corriente continua de voltajes y corrientes

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA				
CARGAS	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
	ARMADURA		CAMPO	
LAMPARA DE SODIO	144,4	7,06	191,9	1,46
LAMPARA DE MERCURIO	143,2	6,71	191,9	1,45
UPS	142,7	6,5	192,4	1,45
FOCOS LED	142,6	6,55	192,4	1,44
LAMPARAS FLORECENTES	143,8	7,03	192,1	1,44
FOCOS AHORRADORES	144,6	7,76	191,9	1,44
LAMPARAS INCANDESCENTES	145,8	8,45	191,3	1,44
REFRIGERADOR	142,1	6,78	191,8	1,44
CALEFACTOR	153,2	13,74	189,9	1,43
ASPIRADORA	148,1	10,68	191,3	1,44
AIRE ACONDICIONADO	141,4	6,59	192,6	1,44
VARIADOR DE VELOCIDAD	140,5	6,38	192,3	1,44

ANEXO D

Ingreso en paralelo del generador Fotovoltaico con el grupo motor – generador

En el presente anexo, se realiza la prueba de ingreso en paralelo el generador Fotovoltaico y el grupo motor – generador del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia,

El grupo en este caso pasa a ser la central base para el resto de sistemas de generación, ya que el grupo tiene la capacidad de entregar a la barra una potencia de 9,899 kVA, mientras que el generador Fotovoltaico es capaz de entregar una potencia de 0,75 kVA,

Esta prueba se inicia con el encendido del grupo y una de las tres turbinas que puede simular, se llega a condiciones normales de frecuencia y voltaje, por parte del generador Fotovoltaico de la misma manera llega a condiciones normales y es este generador que tiene la capacidad de monitorear si el sistema se encuentra en secuencia y que las condiciones sean las óptimas para ingresar en paralelo con el grupo motor – generador,

Para esta prueba se simulo las tres turbinas disponibles a ser representadas por el grupo motor – generador y por parte del generador Fotovoltaico tener las mejores condiciones climáticas, pero en esta prueba no se pudo obtener una irradiación adecuada ya que existió nubosidad durante el día de la prueba algo cotidiano que sucede en las plantas de generación Fotovoltaica, lo que provocó una generación de potencia baja,

Bajo estas condiciones se obtuvieron resultados de la generación Fotovoltaica y efectos que existieron al momento del ingreso en paralelo entre estos dos generadores,

Ingreso en paralelo Turbina Hidráulica – Generador Fotovoltaico

En esta prueba se llega a condiciones normales del grupo motor – generador y el generador Fotovoltaico para los cuales se obtiene los siguientes resultados:

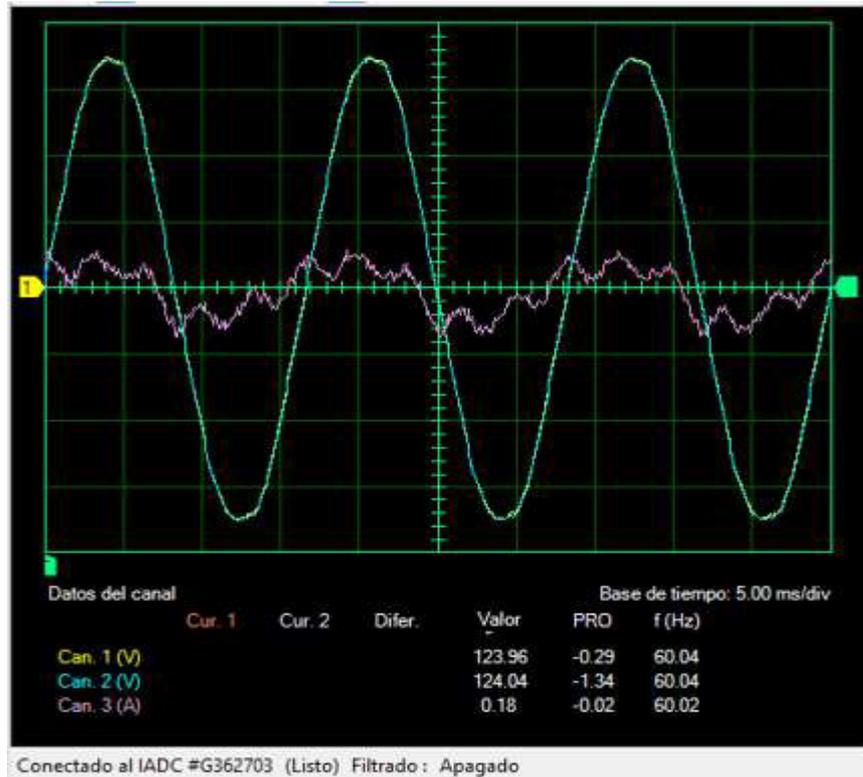


Figura D.1. Formas de onda de corriente, voltaje y condiciones de frecuencia en generador Fotovoltaico

En la Figura D.1., se aprecia las condiciones de frecuencia y voltaje entregado por el generador Fotovoltaico, las cuales son óptimas para el ingreso en paralelo con el grupo motor – generador.

La corriente en las condiciones de irradiación fue de 0,18 A, la cual nos permitió obtener un abastecimiento de potencia de alrededor de 50 VA al momento de ingresar en paralelo, ya que en condiciones de vacío del generador Fotovoltaico entrega una potencia de alrededor 5 VA, estos valores se pueden apreciar en la Tabla D.1., que muestra resultados del antes y después del ingreso en paralelo.

Tabla D.1. Medición de voltaje y potencias del generador Fotovoltaico

M1- E1	M2- E2	M3- E3	M4-I1	M5-I2	M6-I3	M7-PQS1- +PQS2- +PQS3	M8-PQS1- +PQS2- +PQS3	M9-PQS1- +PQS2- +PQS3
CA	CA	CA	CA	CA	CA	P	Q	S
V	V	V	A	A	A	W	Var	VA
127,3	135,7	117,8	0,072	0,077	0,069	4,947	-0,149	4,949
127,3	135,8	117,8	0,07	0,075	0,068	5,46	0,036	5,46
127,3	135,8	117,8	0,07	0,075	0,068	5,46	0,036	5,46
127,4	135,8	117,6	0,072	0,078	0,069	5,466	-0,281	5,473
127,4	135,8	117,8	0,073	0,076	0,069	5,576	0,032	5,576
127,4	135,8	117,8	0,074	0,077	0,069	5,63	-0,387	5,643
127,4	135,8	117,8	0,074	0,077	0,069	5,63	-0,387	5,643
124,2	125,7	121,6	0,23	0,259	0,16	48,29	0,363	48,29
124,1	124,6	122,9	0,178	0,241	0,107	44,02	-3,225	44,14
124,1	124,7	122,9	0,181	0,245	0,105	43,72	-5,047	44,01
124	124,5	122,7	0,177	0,248	0,107	44,34	-2,187	44,39
124	124,5	122,7	0,177	0,248	0,107	44,34	-2,187	44,39
124	124,6	122,8	0,176	0,24	0,101	43,08	-4,643	43,33
123,8	124,3	122,6	0,183	0,248	0,103	43,78	-6,745	44,3
123,7	124,3	122,6	0,178	0,243	0,109	44,11	-5,408	44,44
123,7	124,3	122,6	0,178	0,243	0,109	44,11	-5,408	44,44
123,7	124,3	122,5	0,179	0,241	0,104	43,4	-7,31	44,02
123,5	124	122,3	0,179	0,243	0,106	43,62	-6,441	44,09
123,6	124	122,3	0,183	0,248	0,106	43,88	-7,543	44,52
123,6	124	122,3	0,183	0,248	0,106	43,88	-7,543	44,52

En la siguiente Figura D.2. se aprecia la perturbación provocada una vez que el generador Fotovoltaico ingresa en paralelo con el grupo motor – generador, la cual es una pequeña elevación en la velocidad del grupo afectando levemente en la frecuencia, pero restableciéndose a condiciones nominales que fueron imperceptibles al sistema ya que esta perturbación duro un tiempo muy pequeño,

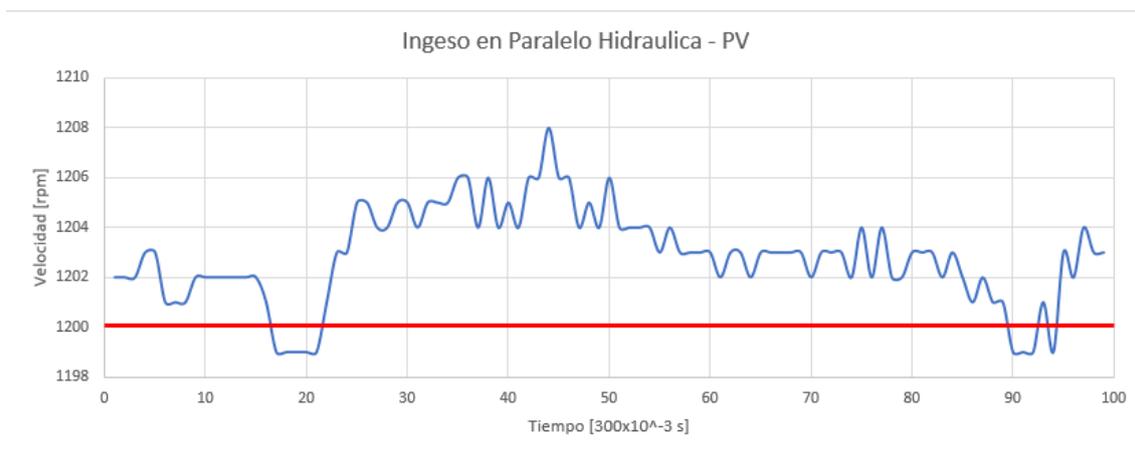


Figura D.2. Perturbación de la velocidad en el grupo motor - generador

Ingreso en paralelo Turbina a Vapor – Generador Fotovoltaico

En esta prueba al igual que la anterior se llega a condiciones normales tanto del grupo motor – generador y el generador Fotovoltaico para el ingreso en paralelo, la secuencia será monitoreado por el sistema fotovoltaico y se permita realizar la prueba sin ningún inconveniente,

La prueba arroja los siguientes resultados, obteniendo inicialmente los valores de la generación fotovoltaica mostrada en la Tabla D.2., y la perturbación provocada en el grupo motor – generador mostrado en la Figura D.3.

Tabla D.2. Medición de voltaje y potencias del generador Fotovoltaico

M1-E1	M2-E2	M3-E3	M4-I1	M5-I2	M6-I3	M7-PQS1- +PQS2- +PQS3	M8-PQS1- +PQS2- +PQS3	M9-PQS1- +PQS2- +PQS3
CA	CA	CA	CA	CA	CA	P	Q	S
V	V	V	A	A	A	W	Var	VA
127,9	136	117,8	0,07	0,077	0,07	4,927	-0,139	4,929
127,6	136	118,1	0,071	0,075	0,069	5,117	0,025	5,117
127,6	136,1	118,1	0,071	0,075	0,071	5,962	0,125	5,963
127,6	136	118,2	0,071	0,073	0,07	5,636	0,629	5,671
127,5	136,2	118,1	0,072	0,075	0,069	5,776	-0,16	5,778
123,5	124,1	122,4	0,191	0,24	0,109	45,15	-7,541	45,78

123,2	123,7	122	0,194	0,242	0,103	44,88	-9,397	45,86
123,3	123,8	122	0,19	0,243	0,103	44,87	-7,955	45,57
123,3	123,9	122,2	0,192	0,242	0,107	44,93	-8,282	45,68
123,3	123,9	122,2	0,192	0,242	0,107	44,93	-8,282	45,68
123,5	124,1	122,3	0,193	0,24	0,104	44,29	-7,301	44,88
123,6	124,2	122,3	0,193	0,237	0,105	45,34	-5,421	45,66
123,6	124,2	122,4	0,194	0,237	0,104	44,85	-6,137	45,27
123,5	124	122,3	0,189	0,23	0,103	43,81	-5,794	44,2
123,5	124	122,3	0,191	0,233	0,103	43,75	-5,951	44,15
123,6	124,1	122,4	0,19	0,238	0,104	43,9	-5,594	44,25
123,6	124,2	122,4	0,19	0,238	0,105	43,29	-7,621	43,95
123,6	124,2	122,4	0,19	0,238	0,105	43,29	-7,621	43,95
123,6	124,1	122,3	0,19	0,237	0,1	43,8	-6,248	44,24
123,5	124	122,3	0,191	0,234	0,103	44,04	-7,111	44,61

En la Figura D.3., se aprecia la perturbación al momento de ingresar en paralelo el generador Fotovoltaico que es de un tiempo muy corto, apreciable en la gráfica, pero no muy perceptible por parte del grupo motor – generador ya que el sistema de regulación de velocidad actuó rápidamente al ver esta pequeña perturbación en la velocidad, llevando al sistema a condiciones normales de operación,

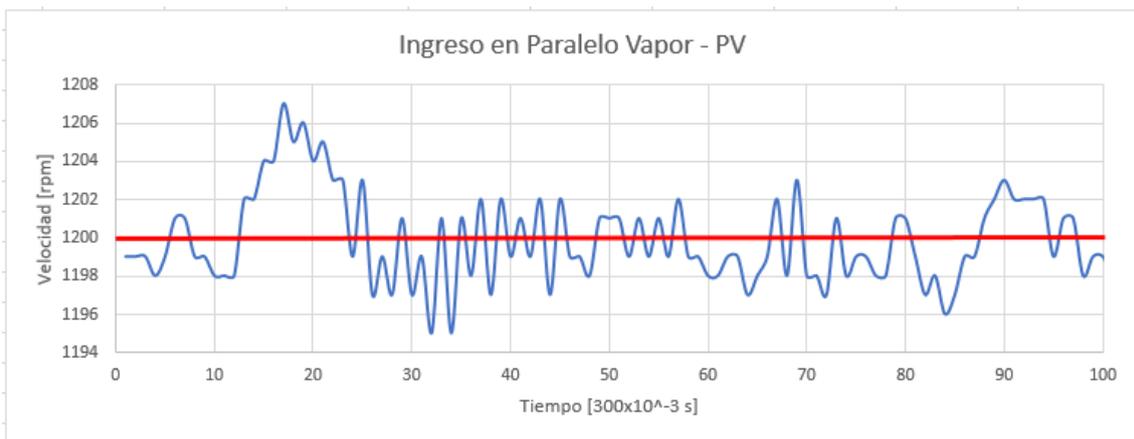


Figura D.3. Perturbación de la velocidad en el grupo motor - generador

Ingreso en paralelo Turbina a Gas – Generador Fotovoltaico

En esta prueba al igual que las anteriores se llega a condiciones normales tanto del grupo motor – generador en este caso simulando la turbina térmica a gas y el generador Fotovoltaico para el ingreso en paralelo, la secuencia es monitoreado por el sistema fotovoltaico y se permita realizar la prueba sin ningún inconveniente,

La prueba arroja resultados de voltajes y potencias del generador Fotovoltaico que entrega a la barra, obteniendo inicialmente los valores de la generación fotovoltaica mostrada en la Tabla D.3. y la perturbación provocada en la velocidad del grupo motor – generador mostrado en la Figura D.4.

Tabla D.3. Medición de voltaje y potencias del generador Fotovoltaico

M1- E1	M2- E2	M3- E3	M4-I1	M5-I2	M6-I3	M7-PQS1- +PQS2- +PQS3	M8-PQS1- +PQS2- +PQS3	M9-PQS1- +PQS2- +PQS3
CA	CA	CA	CA	CA	CA	P	Q	S
V	V	V	A	A	A	W	Var	VA
127,9	136,4	118,3	0,072	0,076	0,07	5,744	0,129	5,746
127,7	136,3	118,4	0,071	0,077	0,071	5,211	-0,561	5,241
127,8	136,2	118,4	0,071	0,073	0,07	5,747	0,28	5,754
127,8	136,4	118,4	0,072	0,074	0,069	5,963	-0,654	5,998
127,8	136,3	118,3	0,069	0,074	0,07	5,521	-0,462	5,54
127,8	136,3	118,3	0,07	0,077	0,07	5,359	-0,006	5,359
127,8	136,3	118,3	0,07	0,077	0,07	5,359	-0,006	5,359
127,8	136,2	118,4	0,072	0,077	0,07	6,227	-0,239	6,232
127,1	133,9	119	0,144	0,309	0,109	35,2	26,61	44,13
124,2	124,6	122,9	0,183	0,247	0,119	45,93	-2,262	45,98
124,2	124,7	123	0,185	0,246	0,103	45,15	-3,856	45,32
124,2	124,8	123	0,185	0,246	0,111	45,79	-3,077	45,9
124,3	124,7	123	0,187	0,244	0,105	45,1	-4,094	45,29
124,3	124,7	123	0,187	0,244	0,105	45,1	-4,094	45,29
124	124,6	122,8	0,19	0,249	0,109	46,26	-5,857	46,62
124,1	124,6	122,8	0,19	0,238	0,106	45,45	-5,173	45,75

123,9	124,5	122,8	0,188	0,25	0,107	45,46	-7,698	46,11
123,9	124,5	122,8	0,192	0,244	0,113	46,17	-5,723	46,52
123,8	124,3	122,6	0,192	0,236	0,105	45,69	-5,426	46,01
123,8	124,3	122,6	0,192	0,236	0,105	45,69	-5,426	46,01

En la Figura D.4., se aprecia la variación de velocidad al grupo motor – generador provocada por el ingreso en paralelo del generador Fotovoltaico, se observa un aumento en la velocidad, inmediatamente actua el sistema de regulación de velocidad que permite llevar al sistema a condiciones normales de operación, esta perturbación es muy corta y apreciada en la grafica, pero casi imperceptible en el grupo motor – generador.

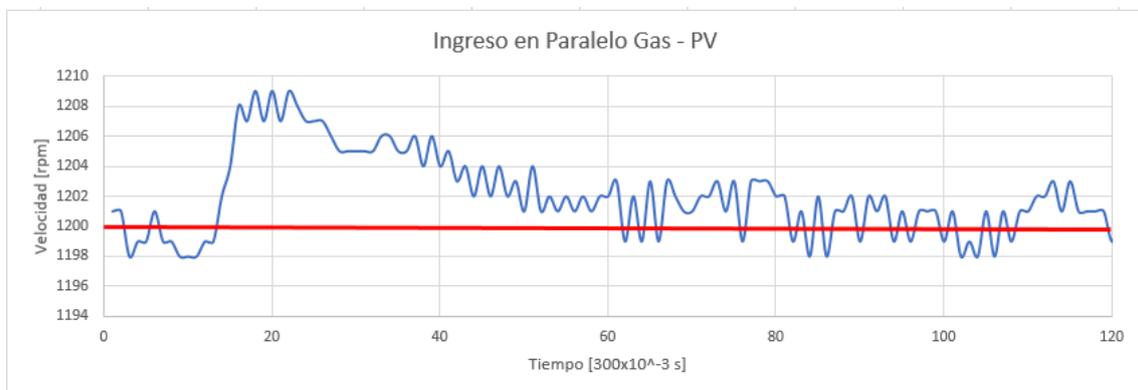


Figura D.4. Perturbación de la velocidad en el grupo motor - generador

ANEXO E

Manual de usuario del módulo del GOV

Para un correcto funcionamiento del módulo GOV se debe considerar los pasos descritos a continuación.

Conexiones entre el GOV y el motor de corriente continua

Conexiones de campo

Conectar el terminal positivo (+) de campo del módulo GOV al terminal A del motor de corriente continua y el terminal negativo (-) de campo del módulo GOV al terminal E del motor de corriente continua.

Conexiones de armadura

Conectar el terminal positivo (+) de armadura del módulo GOV a la entrada del breaker de encendido, y la salida del breaker se conecta al terminal F del motor de corriente continua, y a continuación conectar el terminal negativo (-) de armadura del módulo GOV al terminal H del motor de corriente continua.

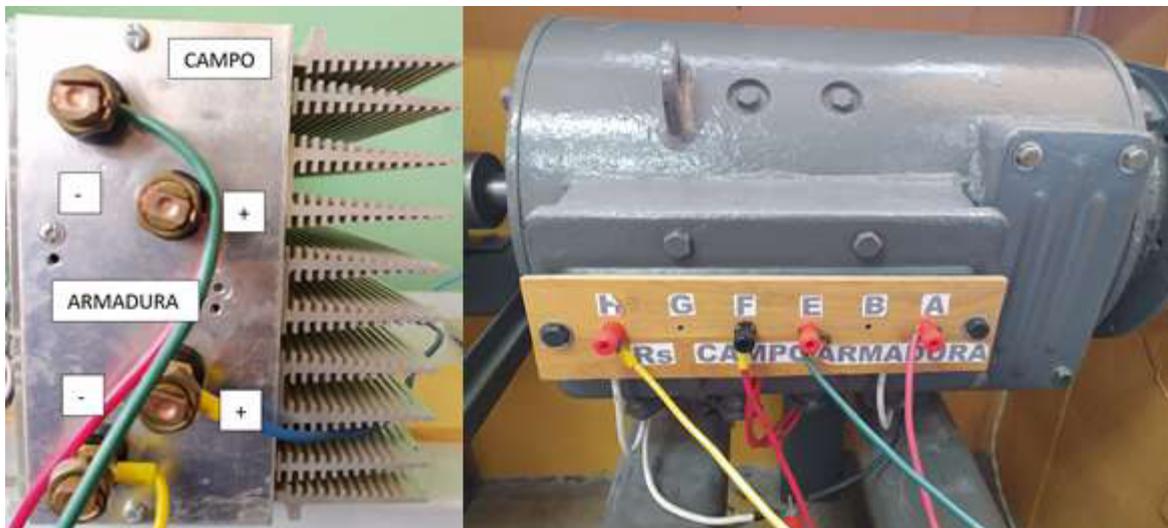


Figura E.1. Terminales del módulo GOV y el motor de corriente continua



Figura E.2. Breaker de encendido para armadura del motor de corriente continua

Alimentación trifásica del módulo GOV

Conectar las tres fases R S y T de la red a los terminales correspondientes del módulo regulador de velocidad GOV a través del breaker principal trifásico ubicado en el tablero de control.

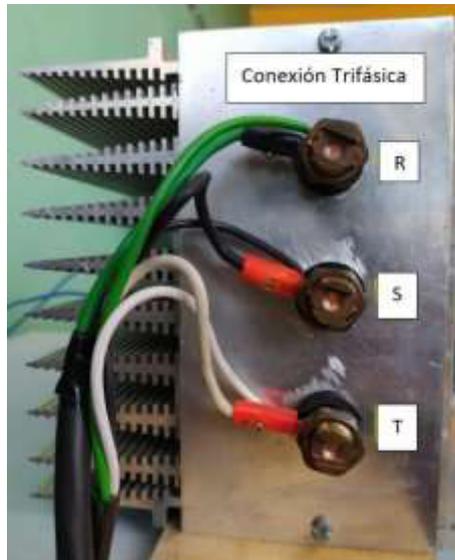


Figura E.3. Terminales R, S y T del módulo GOV



Figura E.4. Breaker de alimentación trifásico de la red

Luego de realizar las conexiones entre la red, el módulo GOV y el motor de corriente continua se puede realizar el encendido del módulo GOV mediante la manipulación de la interfaz gráfica siguiendo los pasos y tomando en cuenta las condiciones que a continuación se detallan.

Conexiones previas del módulo de control GOV

Antes de realizar la energización de la red trifásica se debe conectar el módulo de control a la red mediante un adaptador de 12 V para que los elementos de control tengan la alimentación necesaria para su correcto funcionamiento, además mediante el mismo conector se debe unir el encoder rotativo al módulo GOV.



Figura E.5. Conector del GOV, adaptador 12V y encoder rotativo

El conector mostrado en la Figura E.5. presenta el conector de seis pines que une el módulo GOV con la alimentación de 12V (2 pines) y el encoder rotativo (4 pines).

Uso del módulo GOV en modo aislado

Encendido del motor de corriente continua

1. La interfaz gráfica del GOV muestra la caratula inicial, la cual desaparece al pulsar sobre cualquier parte de la misma.



Figura E.6. Caratula de la interfaz del GOV

2. Elegir el modo de control de la turbina a simular mediante el módulo GOV; se pueden elegir entre tres modos HIDRO, VAPOR y GAS mediante la pulsación del botón MODO.



Figura E.7. Pantalla de elección control Hidro



Figura E.8. Pantalla de elección control Vapor



Figura E.9. Pantalla de elección control Gas

3. Luego de elegido el modo de operación del GOV, se procede a energizar la alimentación trifásica hacia el regulador de velocidad mediante el cierre del breaker trifásico del tablero principal.
4. Si las conexiones están realizadas de forma correcta la pantalla mostrada en la Figura E.10. indica que las protecciones del GOV se encuentran funcionando, y se puede proceder al cierre del breaker de encendido de armadura conectado a la salida del terminal positivo del módulo GOV.



Figura E.10. Pantalla de estado normal de alarmas del GOV

- Encender el motor de corriente continua mediante la pulsación del botón ON_OFF presente en la pantalla de la interfaz gráfica, luego de lo cual el motor empieza a girar hasta alcanzar una velocidad de 1200 rpm.



Figura E.11. Pantalla de medidas y alarmas del GOV

Durante el funcionamiento del motor, la pantalla mostrara las medidas de velocidad angular, corriente y voltaje de la armadura del motor de corriente continua, además indica el estado de las protecciones de sobrevoltaje, sobrecorriente, campo y fase del GOV.

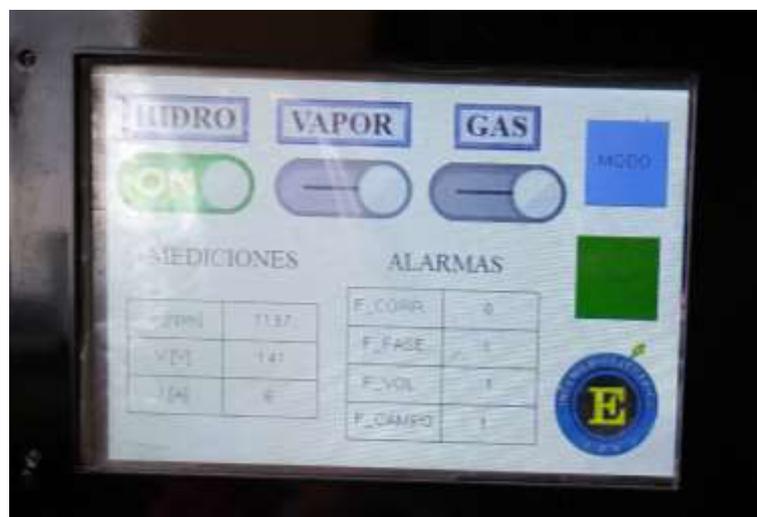


Figura E.12. Pantalla del funcionamiento del módulo GOV

Conexión de la excitación del generador sincrónico

1. Conectar el terminal positivo de la fuente de 5V a la entrada resistencia de alta corriente.
2. Conectar la salida de la resistencia de alta corriente al terminal positivo de la entrada del bobinado de excitación del generador sincrónico.
3. Conectar el terminal negativo de la fuente de 5V al terminal negativo del bobinado de excitación del generador sincrónico.

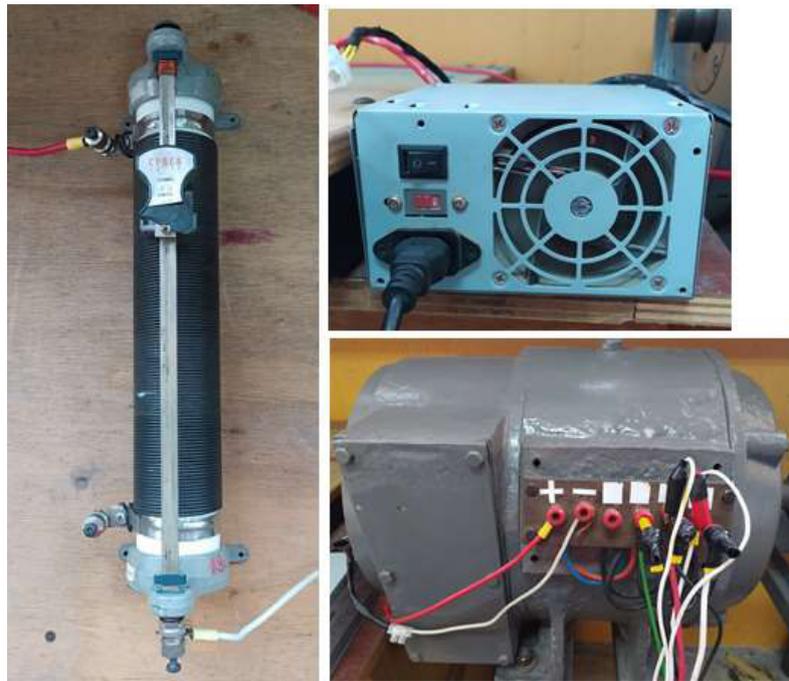


Figura E.13. Conexión de la excitación del generador sincrónico, fuente de corriente continua 5V y resistencia de alta corriente.

4. Luego de verificar las conexiones, se procede a encender la fuente de corriente continua de 5V para que el generador sincrónico empiece a generar fluido eléctrico. El nivel de voltaje generado se regula mediante la variación de corriente de excitación, la misma que se realiza mediante el cambio de la resistencia variable de alta corriente.

Funcionamiento del módulo GOV, motor de corriente continua y generador sincrónico en paralelo con la red de la empresa eléctrica EEQ.

Para el funcionamiento en paralelo del conjunto motor-generador con la red de la EEQ, se deben realizar los pasos descritos para el funcionamiento en modo aislado del GOV.

1. Colocar el SWITCH 0 en la posición BARRA 1

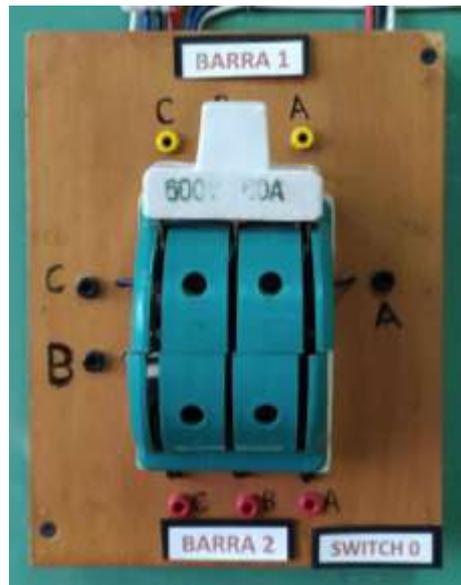


Figura E.14. Switch 0 en posición Barra 1

2. Encender el BREAKER 0 que alimenta la barra 1 donde se unirán la alimentación de la EEQ y la generación proveniente del generador sincrónico.



Figura E.15. Breaker 0

3. Para verificar condiciones previas a la sincronización se coloca el switch de cuchillas del sincronoscopio en la posición mostrada en la Figura E.16.



Figura E.16. Switch de cuchillas del sincronoscopio

Para poder sincronizar el generador sincrónico y la red de la EEQ se deben cumplir las siguientes condiciones.

Secuencia de fases del generador y la red.

La secuencia de fases se verifica mediante el uso del secuencímetro, realizando la conexión a las fases del generador y a las fases de la red para verificar que las secuencias sean las mismas.



Figura E.17. Secuencia de fases del generador sincrónico y la red

Nivel de voltaje del generador y la red

El nivel de voltaje se verifica mediante el medidor presente en el sincronoscopio y si existe diferencia, se regula el voltaje del generador variando la resistencia de alta corriente de la excitación del generador.



Figura E.18. Medición de voltaje del generador sincrónico y la red

Frecuencia eléctrica del generador y la red

La frecuencia eléctrica del generador y de la red se miden mediante el uso del sincronoscopio, y cualquier desvío alrededor de los 60Hz por parte del generador se corrige automáticamente con el GOV.

Una vez verificadas las condiciones necesarias para sincronizar el generador y la red se procede a pulsar el botón verde del sincronoscopio, logrando de esta manera que la red y el generador entren en sincronismo.

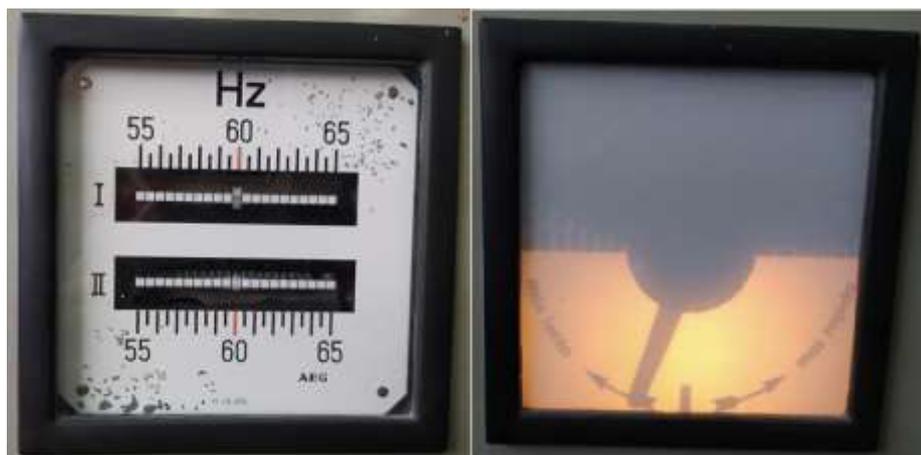


Figura E.19. Medición de frecuencia del generador sincrónico y la red.

El indicador luminoso de aguja indicado en la Figura E.19., ayuda al momento de sincronizar el generador y la red, ya que la aguja se mueve de manera más lenta y tiende a colocarse en el centro cuando la frecuencia de ambos componentes es similar.



Figura E.20. Sincronoscopio cuando el generador sincrónico y la red se encuentran funcionando en paralelo.

A continuación, se muestra la estructura completa del módulo GOV, donde se observa la interfaz gráfica, los voltímetros, el switch y el fusible de control.



Figura E.21. Módulo regulador de velocidad GOV.

Apagado del motor de corriente continua y el módulo GOV

1. Pulsar el botón ON_OFF cuando el motor se encuentre en funcionamiento, para apagar el motor de corriente continua.
2. Desconectar el breaker de armadura.
3. Desconectar el breaker de alimentación trifásica del módulo ubicado en el tablero de control principal.
4. Apagar el módulo GOV de control y desconectar el adaptador de 12V.

Utilización del programa para la obtención de datos de la velocidad angular del motor de corriente continua

El programa fue desarrollado en el software Microsoft Visual Basic 6.0, el cual debe ser instalado para la ejecución del archivo que contiene al programa.

Este programa permite la adquisición de datos de la velocidad del grupo motor – generador, los cuales son enviados a un archivo Excel en el cual se puede realizar una visualización de todas las perturbaciones o transitorios provocados en el SEP que hayan afectado en la velocidad sincrónica del grupo.

A continuación, se presenta los pasos a seguir para el manejo correcto del programa con el fin de adquirir los datos del funcionamiento del grupo.

Conexión del cable USB

1. Conectar el cable USB desde el puerto del GOV hasta la computadora donde se vaya a ejecutar el programa en Microsoft Visual Basic 6.0, para la adquisición y almacenamiento de datos de la velocidad angular del motor de corriente continua.

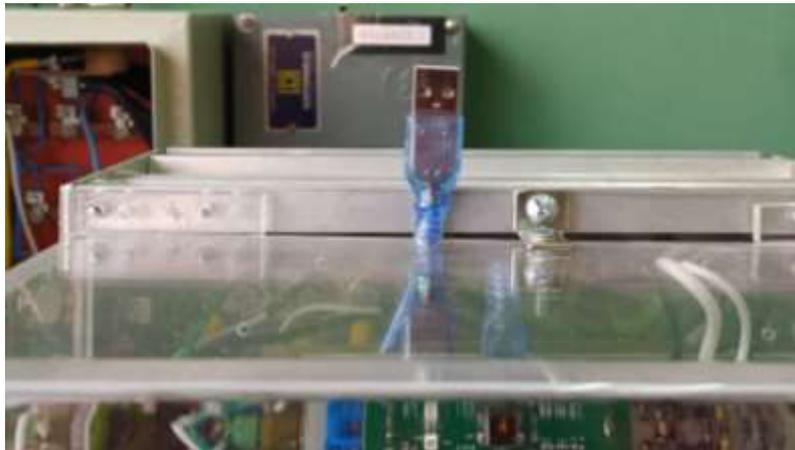


Figura E.22. Puerto USB del módulo GOV.

Configuración de Puerto USB

La configuración del puerto USB se lo realiza cuando se va a conectar por primera vez en una computadora para lo cual se recomienda seguir los siguientes pasos

1. Ingresar al Administrador de dispositivos

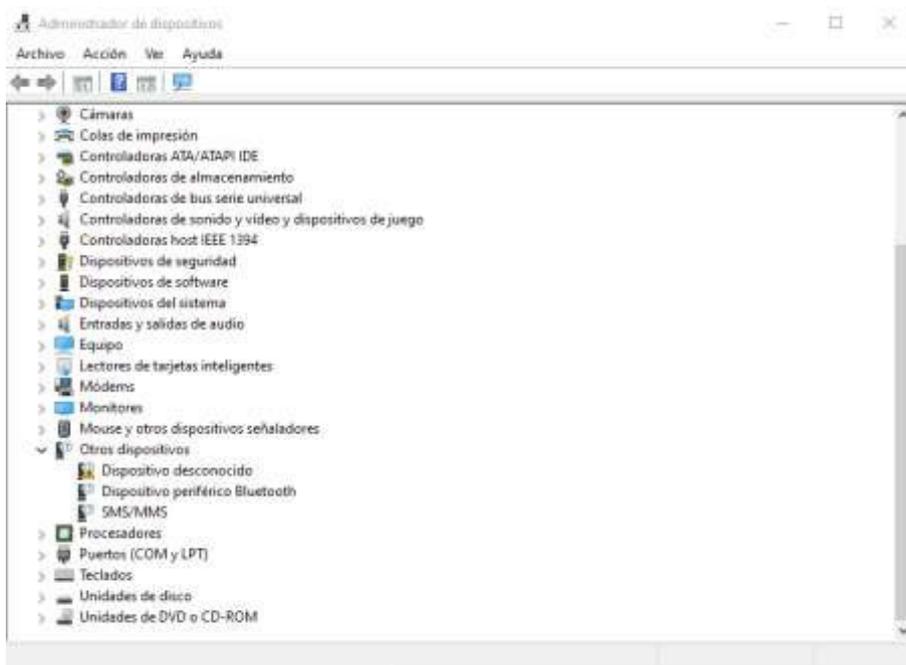


Figura E.23. Pantalla de Administrador de dispositivos.

2. Procedemos a conectar el cable USB al puerto del módulo del Sistema de Regulación de Velocidad y a uno de los puertos de la computadora a ser usada.
3. Visualizamos en la pantalla de Administrador de dispositivos en Puertos (COM y LPT), nos aparecerá el puerto de la tarjeta STMicroelectronics STLink Virtual, en este caso nos aparece conectado en un puerto (COM7), pero para la utilización del programa este puerto debe ser cambiado por (COM1)

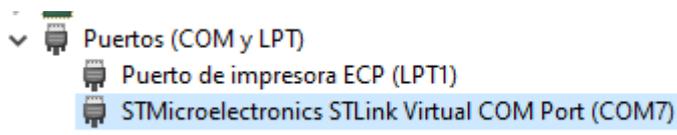


Figura E.24. Puertos (COM y LPT)

4. Para el cambio de puerto nos dirigimos a Propiedades del puerto\ Configuración de puerto\Opciones avanzadas, luego se procede a cambiar el número de puerto por COM1.

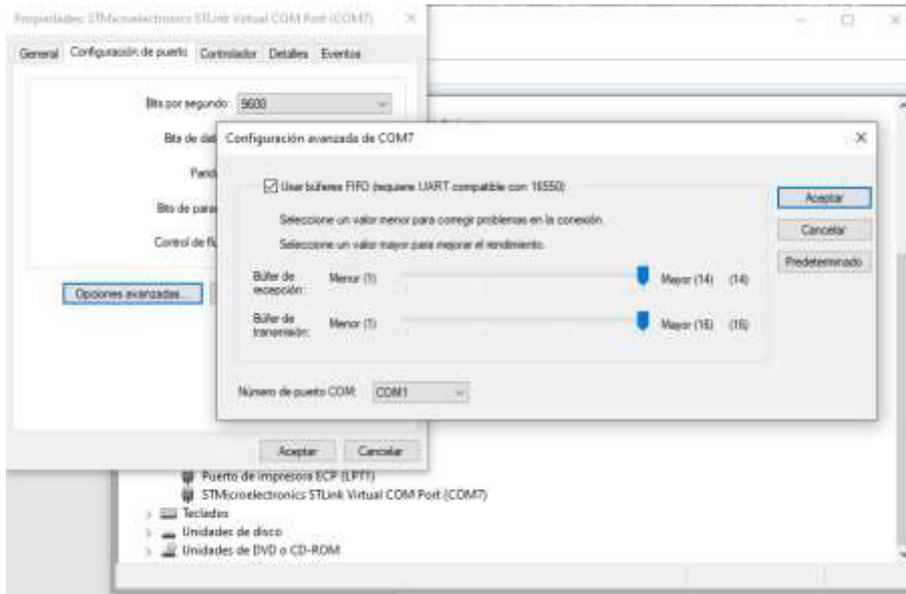


Figura E.25. Pantalla para la configuración del número de puerto

Advertencia: En caso de no cambiar el número de puerto y querer ejecutar directamente el programa les arrojará una notificación e impedirá que el programa sea ejecutado.

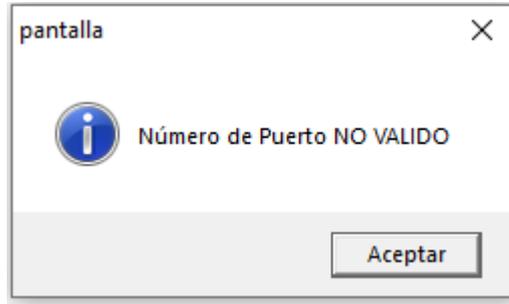


Figura E.26. Error en caso de no realizar el cambio de número de puerto

Ejecución del Programa

Para la ejecución del programa se debe tener instalado el programa **Microsoft Visual Basic 6.0** y correctamente configurado el puerto USB.

Los pasos a seguir para la ejecución y adquisición de los datos son los siguientes:

1. Abrir la carpeta PROGRAMA

2. Ejecutar el archivo denominado pantalla

Form1	19/7/2021 14:06	Visual Basic Form ...	13 KB
Form1	19/7/2021 14:06	Visual Basic Form ...	754 KB
Form1	9/4/2021 10:32	Documento de te...	1 KB
imagen	9/4/2021 10:54	Archivo BMP	754 KB
imagen	9/4/2021 10:39	Archivo JPEG	42 KB
pantalla	19/7/2021 14:06	Visual Basic Project	1 KB
pantalla	23/8/2021 15:21	Visual Basic Projec...	1 KB

Figura E.27. Archivo pantalla a ser ejecutado.

3. Una vez ejecutado, aparecerá la pantalla con el programa, el cual debe ser ejecutado, para lo cual damos clic en el botón Iniciar



Figura E.28. Pantalla de Visual Basic, botón a dar clic para iniciar el programa.

4. Al haber iniciado nos despliega la pantalla que nos permitirá la adquisición de datos de las diferentes turbinas.



Figura E.29. Pantalla principal para la adquisición de datos.

5. Desde la pantalla HMI del módulo de Sistema de Regulación de Velocidad, se puede elegir la central a ser simulada y se visualizara en la pantalla marcada con un punto verde.
6. Para la adquisición de datos se da un clic en el botón INICIO antes o durante el encendido del grupo, dependerá el tipo prueba que se esté realizando o el análisis que se vaya a realizar con la adquisición de datos
7. Una vez adquirido los datos se procede a dar clic en el botón STOP, para la finalización de obtener datos.
8. La exportación de datos adquiridos se lo hace dando un clic en el botón EXCEL, para que el archivo se cree correctamente se debe esperar que el reloj de la pantalla continúe marcando la hora, ya que al momento de crear el documento Excel la hora se congela momentáneamente.

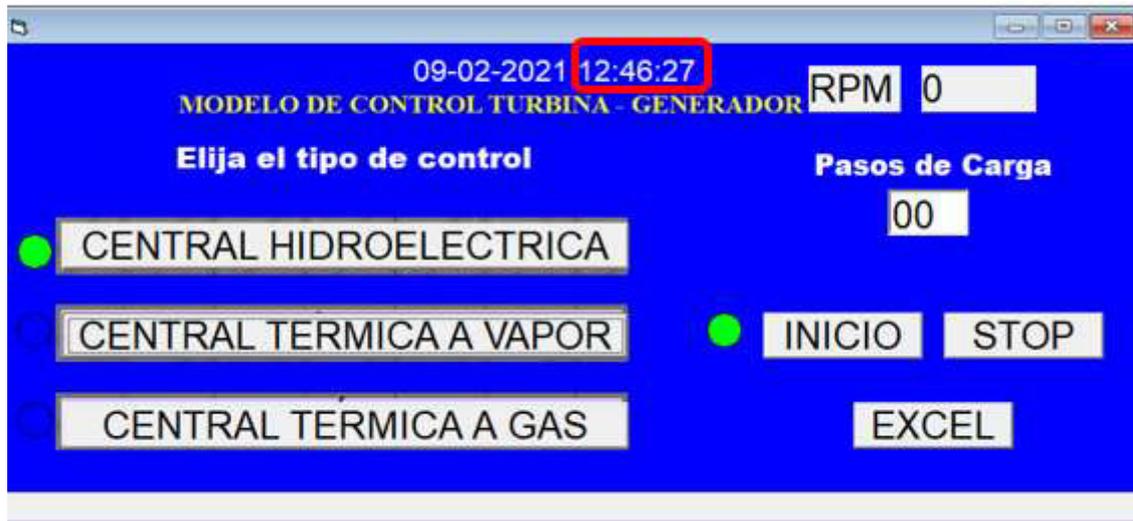


Figura E.30. Pantalla donde se debe visualizar la hora.

9. Creado el documento Excel con los datos obtenidos de la velocidad, tendrá el formato (Fecha y hora), mostrado en la Figura D.31.

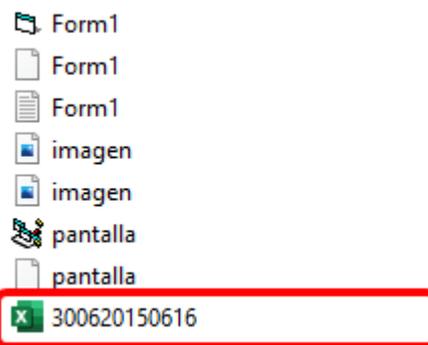


Figura E.31. Creación del documento Excel.

10. El formato de almacenamiento de datos que se va a tener en Excel, se muestra en la Figura E.32., en el cual se tiene el tiempo, el número de cargas y que central se está simulando.

	A	B	C	D	E	F
1	Tiempo	RPM	Carga	Funcion		
2		2	1199	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	
3		3	1198	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	
4		4	1198	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	
5		5	1199	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	
6		6	1199	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	
7		7	1198	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	
8		8	1199	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	
9		9	1198	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	
10		10	1201	0	CENTRAL TERMICA A VAPOR	

Figura E.32. Formato creado en Excel de la adquisición de datos.

11. La utilización del espacio de pasos de carga, se hace borrando el valor escrito y cambiarlo por el número de carga, en caso de hacer una práctica que involucre los pasos de carga.



Figura E.33. Espacio para modificar el número de pasos de carga

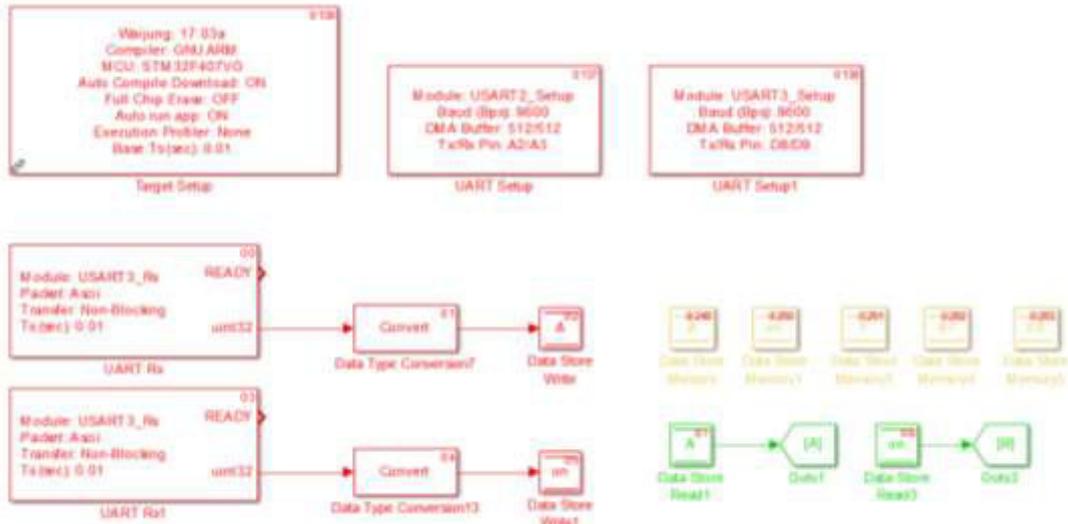


Figura F.2. Diagrama de inicializacion de variables A, B, B7, E6 y F.

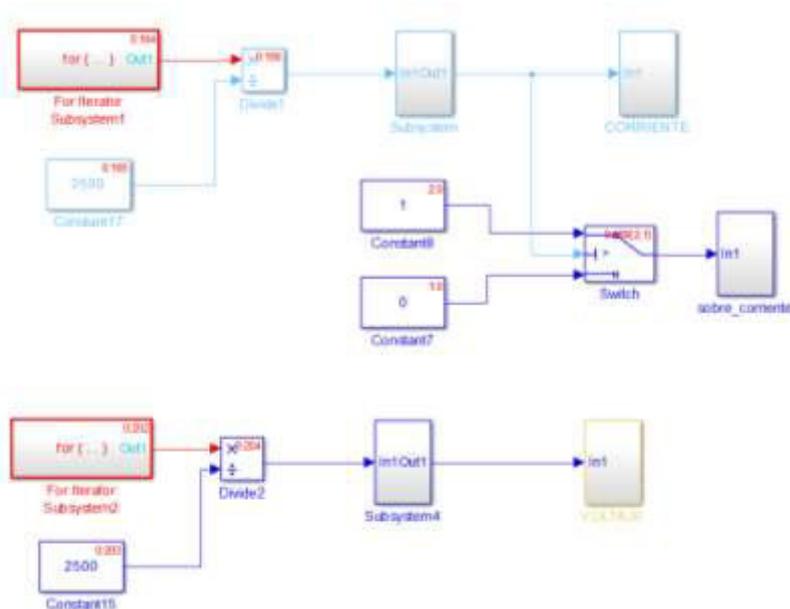


Figura F.3. Diagrama de medicion de voltaje, corriente y proteccion de sobrecorriente.

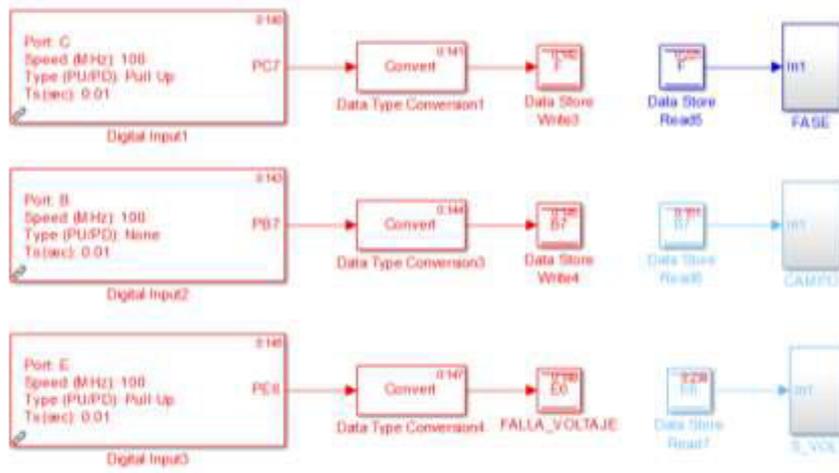


Figura F.4. Diagrama de protecciones de Fase, Campo y Sobrevoltaje.

ANEXO G

Programa en Visual Basic 6.0 que permite la adquisición de datos de la velocidad del grupo motor – generador.

Dim nombre As String

Dim b As Long

Dim dato_serial As Byte

Dim a As Long

Dim guardar As Byte

Dim grabar As Byte

Dim datos(65535) As Long

Dim cargas(65535) As String

Dim direccion As Long

Dim celda_str As String

Dim celda As Long

Dim celda1 As Long

Public Function enviar1(cadenaSalida As String)

On Error GoTo mierror

Dim I As String

If MSComm1.PortOpen = False Then

MsgBox "El Puerto está cerrado, ábralo "

Else

MSComm1.Output = cadenaSalida

```
    If MSComm1.InBufferCount <> 0 Then
        I = MSComm1.Input
    End If
End If

Exit Function

mierror:

    MsgBox "Error Inesperado con el Puerto"

End Function
```

```
Private Sub Command4_Click()

    guardar = 1

End Sub
```

```
Private Sub Command5_Click()

    guardar = 0

    Shape4.BackColor = &HFF0000

End Sub
```

```
Private Sub Command6_Click()

    Dim oExcelApp As Object, wb As Object

    Set oExcelApp = CreateObject("Excel.Application")

    Set wb = oExcelApp.Workbooks.Add
```

```
nombre = "D:\PC\proyectos atmel\bascom avr\MOTOR POLI\motor poli vb\" + Mid(Date$, 4, 2) + Mid(Date$, 1, 2) + Mid(Date$, 7, 2) + Mid(Time$, 1, 2) + Mid(Time$, 4, 2) + Mid(Time$, 7, 2) + ".xls"
```

```
Label1.Caption = Mid(nombre, 59, 12)
```

```
wb.SaveAs (App.Path & "\" & Label1.Caption & "")
```

```
wb.Close (SaveChanges = True)
```

```
Set OBJEXCEL = CreateObject("Excel.Application")
```

```
Set xlibro = OBJEXCEL.Workbooks.Open(App.Path + "\" + Label1.Caption)
```

```
'Hacemos el Excel no Visible
```

```
OBJEXCEL.Visible = False
```

```
With xlibro
```

```
    'Hacemos referencia a la Hoja
```

```
    With .Sheets(1)
```

```
        'Guardamos los datos en excel
```

```
        .Cells(1, 1) = "Tiempo"
```

```
        .Cells(1, 2) = "RPM"
```

```
        .Cells(1, 3) = "Carga kWatt"
```

```
        .Cells(1, 4) = "Funcion"
```

```
    For a = 2 To direccion
```

```
        .Cells(a, 1) = a
```

```
        .Cells(a, 2) = datos(a)
```

```
        .Cells(a, 3) = cargas(a)
```

```

    If Shape1.BackColor = &HFF00& Then .Cells(a, 4) = Command1.Caption
    If Shape2.BackColor = &HFF00& Then .Cells(a, 4) = Command2.Caption
    If Shape3.BackColor = &HFF00& Then .Cells(a, 4) = Command3.Caption

    Next a

End With

End With

xlibro.Save

xlibro.Close

OBJEXCEL.Quit

Set OBJEXCEL = Nothing

Set xlibro = Nothing

direccion = 0

End Sub

Private Sub Form_Load()

    abrirPuerto

End Sub

Public Sub abrirPuerto()

    On Error GoTo mierror

    If Not MSComm1.PortOpen Then

        MSComm1.CommPort = 1

        MSComm1.Settings = "9600,n,8,1"

        MSComm1.InputLen = 0

```

```

        MSComm1.PortOpen = True

Else

        MsgBox ("Puerto COM 6 está abierto"), , "Puerto de Comunicaciones Serial"

End If

Exit Sub

mierror:

        MsgBox "Número de Puerto NO VALIDO", vbInformation

        numeroPuerto = CInt(InputBox("Escriba el número de Puerto de Comunicación", "Puerto
de Comunicación", "6"))

        abrirPuerto

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()

        Dim st As String

        Dim st1 As String

        Label4.Caption = Date$ + " " + Time$

        If MSComm1.InBufferCount >= 9 Then

                st = MSComm1.Input

                Text2.Text = Len(st)

                st1 = Mid(st, 1, 1)

                If st1 = "t" Then

                        st1 = Mid(st, 3, 1)

                        If st1 = "2" Then

```

```
Shape1.BackColor = &HFF00&
Shape2.BackColor = &HFF0000
Shape3.BackColor = &HFF0000
Label2.Caption = Mid(st, 5, 4)
End If

If st1 = "3" Then

    Shape1.BackColor = &HFF0000

    Shape2.BackColor = &HFF00&

    Shape3.BackColor = &HFF0000

    Label2.Caption = Mid(st, 5, 4)
End If

If st1 = "4" Then

    Shape1.BackColor = &HFF0000

    Shape2.BackColor = &HFF0000

    Shape3.BackColor = &HFF00&

    Label2.Caption = Mid(st, 5, 4)
End If

End If

If guardar = 1 Then

    If dato_serial = 0 Then

        dato_serial = 1

        Shape4.BackColor = &HFF00&
```

```
Else
    dato_serial = 0
    Shape4.BackColor = &HFF0000
End If
direccion = direccion + 1
If direccion = 1 Then direccion = 2
datos(direccion) = Val(Mid(st, 5, 4))
cargas(direccion) = Text1.Text
End If
End If
End Sub
```

ANEXO H

Especificaciones técnicas del puente de diodos



KBPC5000 - KBPC5010

PRV : 50 - 1000 Volts

Io : 50 Amperes

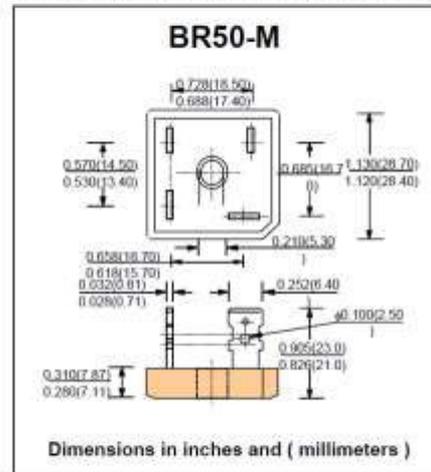
FEATURES :

- * High case dielectric strength
- * High surge current capability
- * High reliability
- * High efficiency
- * Low reverse current
- * Low forward voltage drop
- * Pb / RoHS Free

MECHANICAL DATA :

- * Case : Metal Case
- * Epoxy : UL94V-0 rate flame retardant
- * Terminals : plated .25" (6.35 mm), Faston
- * Polarity : Polarity symbols marked on case
- * Mounting position : Bolt down on heat-sink with silicone thermal compound between bridge and mounting surface for maximum heat transfer efficiency.
- * Weight : 17.1 grams

SILICON BRIDGE RECTIFIERS



MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rating at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified.
Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load
For capacitive load, derate current by 20%

RATING	SYMBOL	KBPC 5000	KBPC 5001	KBPC 5002	KBPC 5004	KBPC 5006	KBPC 5008	KBPC 5010	UNIT	
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	V_{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V	
Maximum RMS Voltage	V_{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	V	
Maximum DC Blocking Voltage	V_{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	V	
Maximum Average Forward Current $T_a = 55^\circ\text{C}$	I_{FAV}								50	A
Peak Forward Surge Current Single half sine wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	I_{FSM}								400	A
Current Squared Time at $t < 8.3$ ms,	I^2t								660	A^2S
Maximum Forward Voltage per Diode at $I_F = 25\text{A}$	V_F								1.1	V
Maximum DC Reverse Current at Rated DC Blocking Voltage	I_R								10	μA
	$I_{R(H)}$								500	μA
Typical Thermal Resistance (Note 1)	$R_{\theta JC}$								2.0	$^\circ\text{C/W}$
Operating Junction Temperature Range	T_J								- 40 to + 150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{STG}								- 40 to + 150	$^\circ\text{C}$

Note :

(1) Thermal resistance from Junction to Case with units mounted on a 9"x5"x4.5" (22.9x12.7x11.7 cm) Al-Finned Heatsink.

RATING AND CHARACTERISTIC CURVES (KBPC50005 - KBPC5010)

FIG.1 - DERATING CURVE FOR OUTPUT RECTIFIED CURRENT

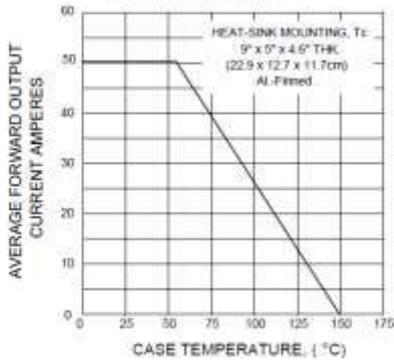


FIG.2 - MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK FORWARD SURGE CURRENT

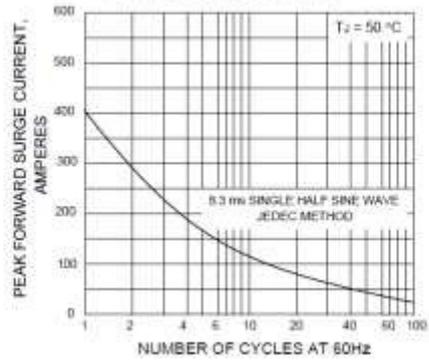


FIG.3 - TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS PER DIODE

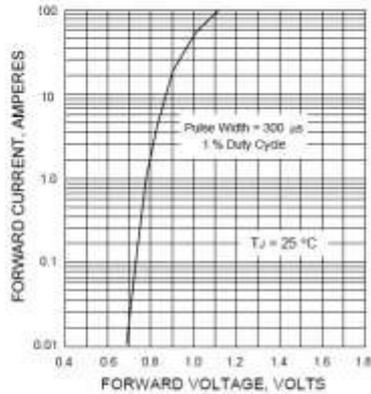
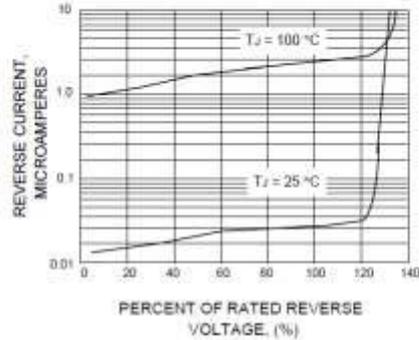


FIG.4 - TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS PER DIODE



ANEXO I

Especificaciones técnicas del tiristor

SKKT 106, SKKT 106B, SKKH 106



SEMIPACK® 1

Thyristor / Diode Modules

SKKT 106
SKKT 106B
SKKH 106

Features

- Heat transfer through aluminium oxide ceramic isolated metal baseplate
- Hard soldered joints for high reliability
- UL recognized, file no. E 63 532

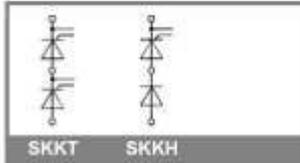
Typical Applications*

- DC motor control (e. g. for machine tools)
- AC motor soft starters
- Temperature control (e. g. for ovens, chemical processes)
- Professional light dimming (studios, theaters)

* See the assembly instructions

V_{RSM} V	V_{RSM}, V_{DRM} V	$I_{TRMS} = 180$ A (maximum value for continuous operation)		
		$I_{TAV} = 106$ A (sin. 180; $T_c = 85$ °C)		
900	800	SKKT 106/08E	SKKT 106B08E	SKKH 106/08E
1300	1200	SKKT 106/12E	SKKT 106B12E	SKKH 106/12E
1500	1400	SKKT 106/14E	SKKT 106B14E	SKKH 106/14E
1700	1600	SKKT 106/16E	SKKT 106B16E	SKKH 106/16E
1900	1800	SKKT 106/18E	SKKT 106B18E	SKKH 106/18E

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{TAV}	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C;	106 (78)	A
I_D	P3/180F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	145 / 180	A
	P16/200F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	190 / 260	A
I_{RMS}	P3/180F; $T_a = 35$ °C; W1 / W3	200 / 3 * 140	A
I_{TSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	2250	A
	$T_{vj} = 130$ °C; 10 ms	1900	A
t_T	$T_{vj} = 25$ °C; 8.3 ... 10 ms	25000	A's
	$T_{vj} = 130$ °C; 8.3 ... 10 ms	18000	A's
V_T	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 300$ A	max. 1,65	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 0,9	V
f_T	$T_{vj} = 130$ °C	max. 2	ms
I_{DO}, I_{AD}	$T_{vj} = 130$ °C; $V_{RD} = V_{RSM}; V_{DD} = V_{DRM}$	max. 20	mA
t_{gt}	$T_{vj} = 25$ °C; $I_D = 1$ A; $di_D/dt = 1$ A/μs	1	μs
t_T	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	2	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 150	A/μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 1000	V/μs
t_c	$T_{vj} = 130$ °C	100	μs
I_{cs}	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 250	mA
I_L	$T_{vj} = 25$ °C; $R_G = 33$ Ω; typ. / max.	300 / 600	mA
V_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
I_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 150	mA
V_{DD}	$T_{vj} = 130$ °C; d.c.	max. 0,25	V
I_{DD}	$T_{vj} = 130$ °C; d.c.	max. 6	mA
$R_{TH(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,28 / 0,14	K/W
$R_{TH(j-c)}$	sin. 180; per thyristor / per module	0,3 / 0,15	K/W
$R_{TH(j-c)}$	rec. 120; per thyristor / per module	0,32 / 0,16	K/W
$R_{TH(c-a)}$	per thyristor / per module	0,2 / 0,1	K/W
T_{vj}		-40 ... +130	°C
T_{stg}		-40 ... +125	°C
V_{Isc}	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
M_s	to heatsink	5 ± 15 % ¹⁾	Nm
M_t	to terminal	3 ± 15 %	Nm
a		5 * 9,81	ms ²
m	approx.	95	g
Case	SKKT	A 46	
	SKKT...B	A 48	
	SKKH	A 47	



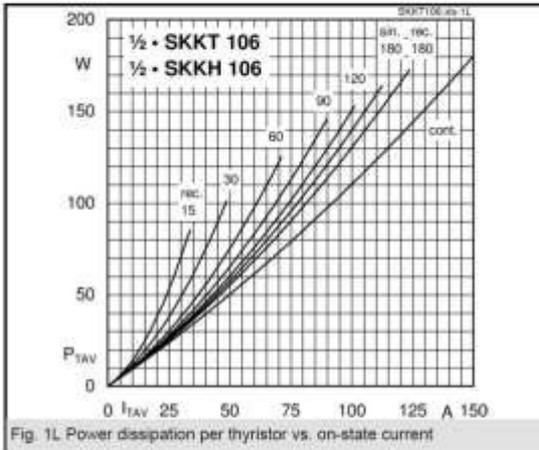


Fig. 1L Power dissipation per thyristor vs. on-state current

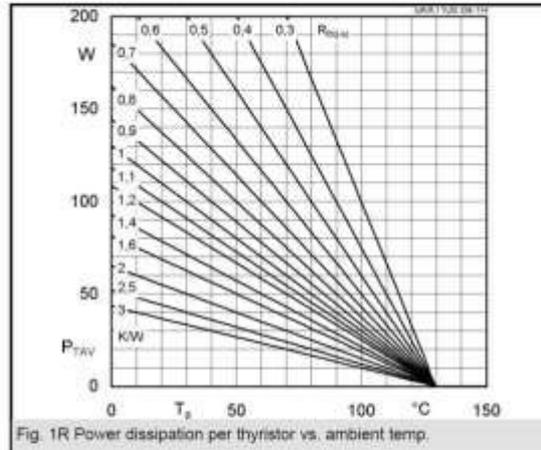


Fig. 1R Power dissipation per thyristor vs. ambient temp.

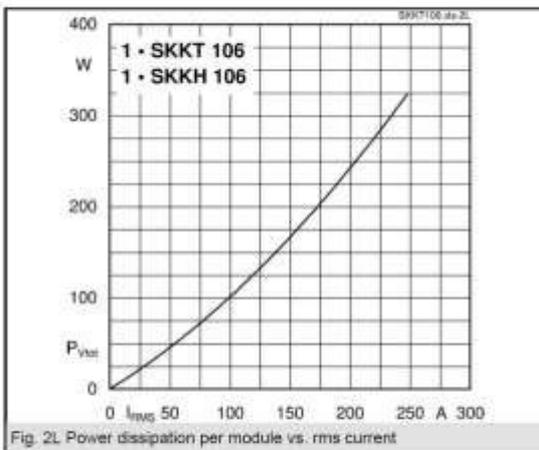


Fig. 2L Power dissipation per module vs. rms current

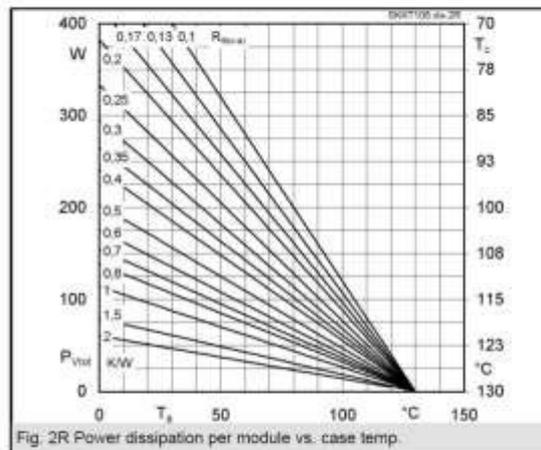


Fig. 2R Power dissipation per module vs. case temp.

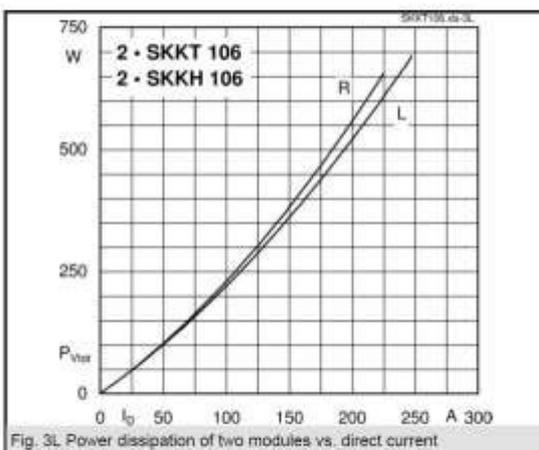


Fig. 3L Power dissipation of two modules vs. direct current

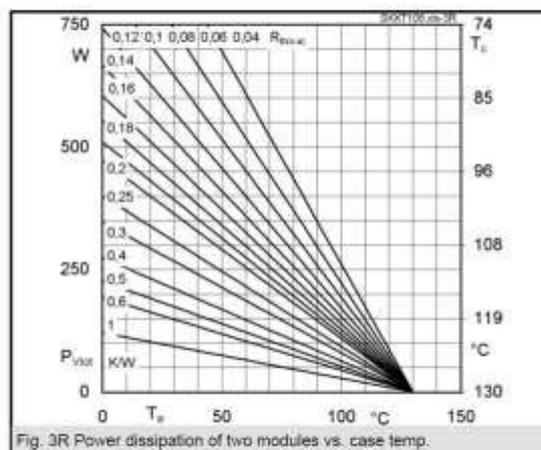
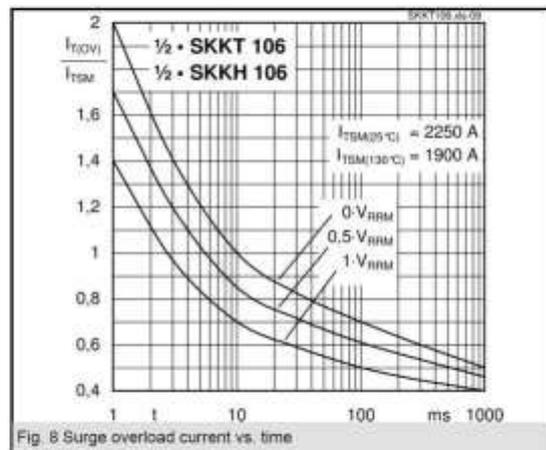
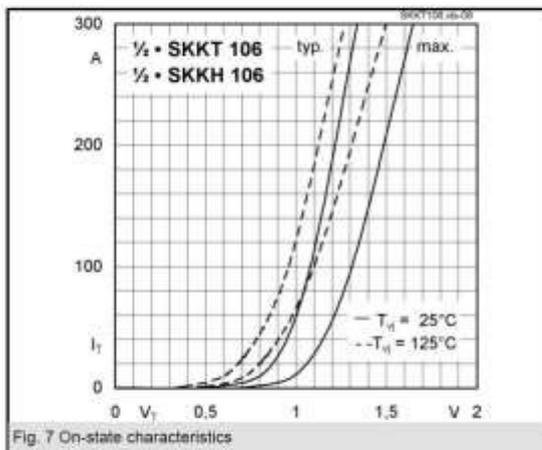
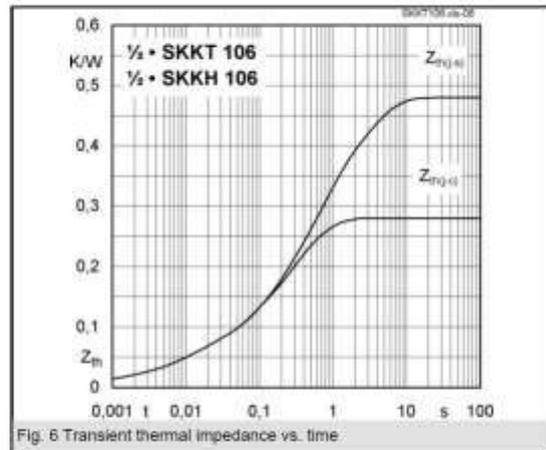
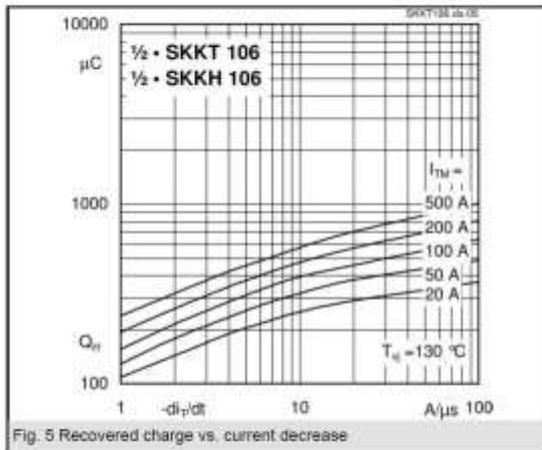
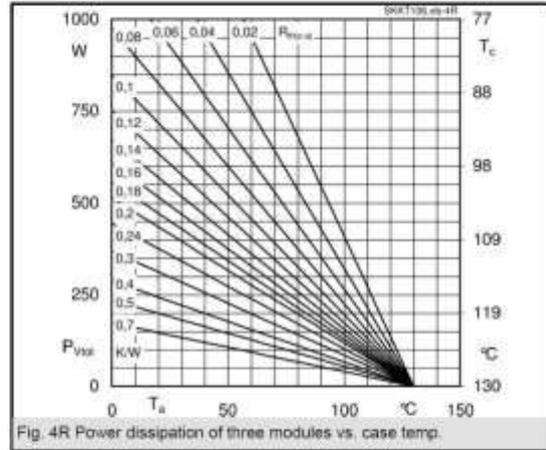
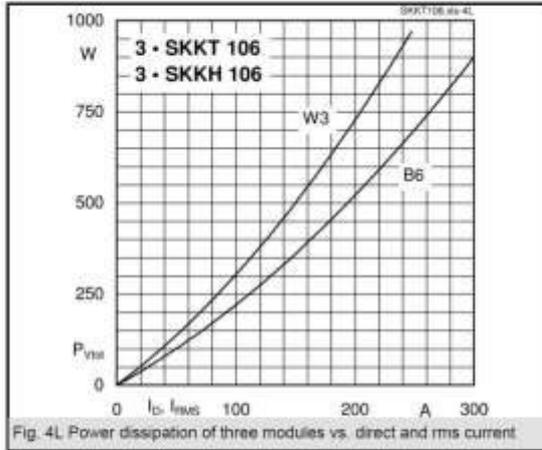
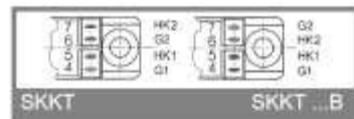
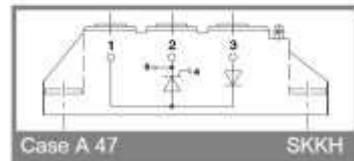
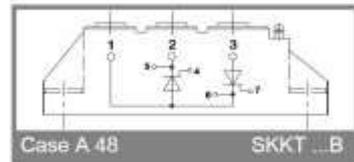
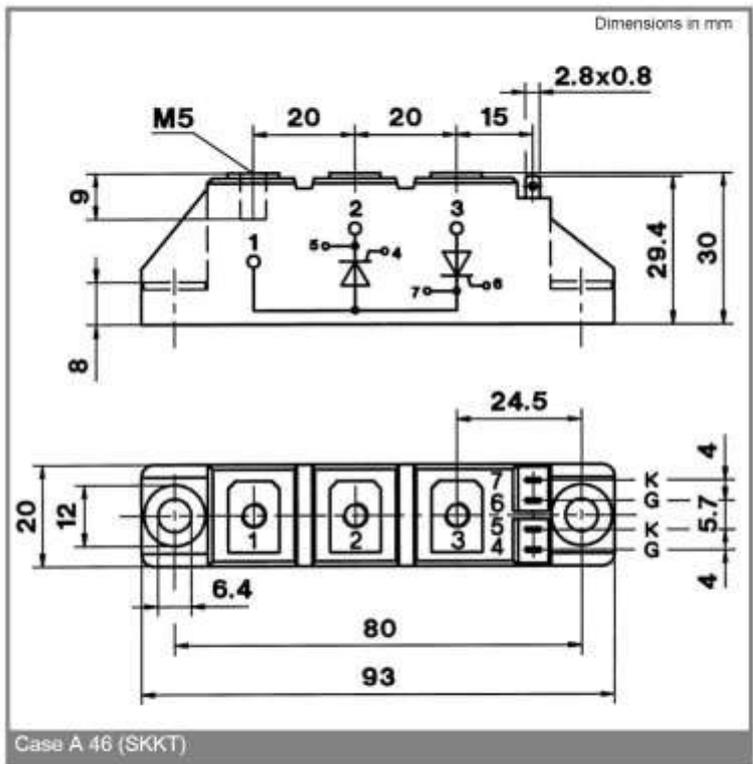
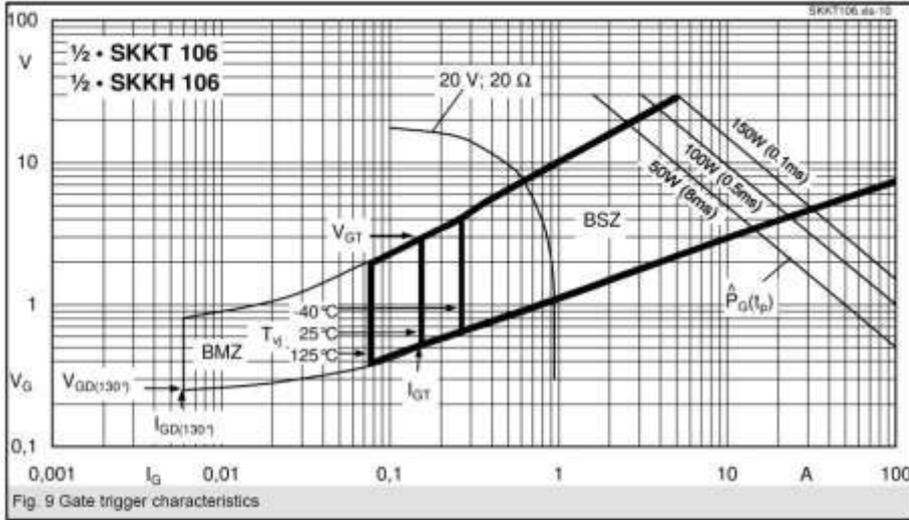


Fig. 3R Power dissipation of two modules vs. case temp.

SKKT 106, SKKT 106B, SKKH 106





* The specifications of our components may not be considered as an assurance of component characteristics. Components have to be tested for the respective application. Adjustments may be necessary. The use of SEMIKRON products in life support appliances and systems is subject to prior specification and written approval by SEMIKRON. We therefore strongly recommend prior consultation of our personal.

ANEXO J

Especificaciones del encoder rotativo



ENCODER INCREMENTALI INCREMENTAL ENCODERS



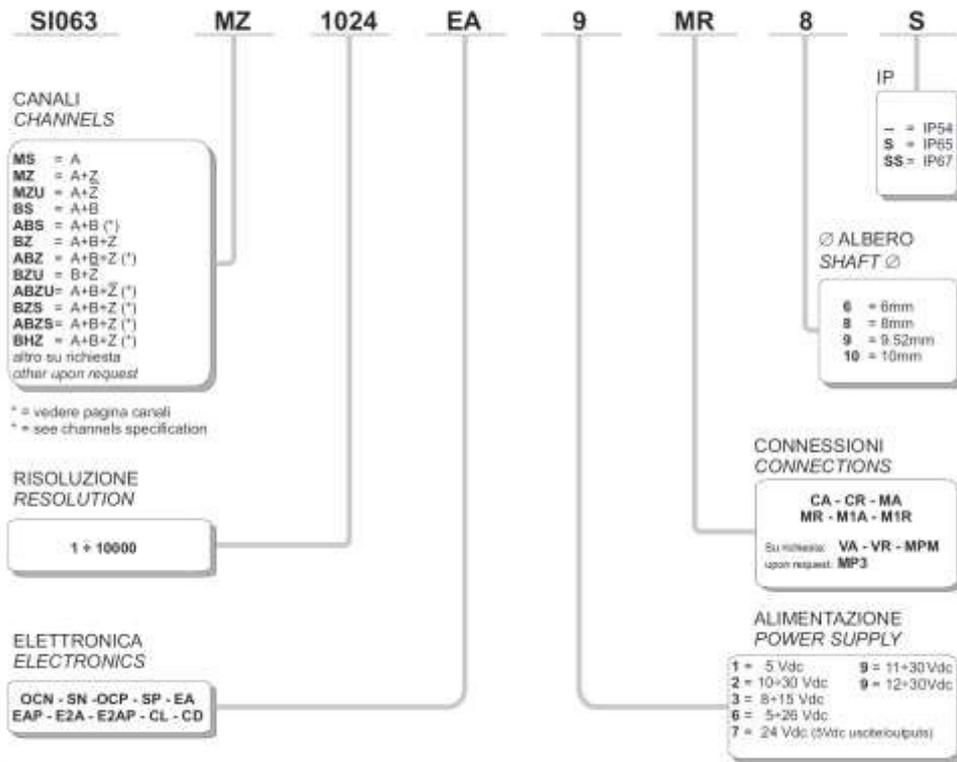
ENCODER INCREMENTALE DIAMETRO 63 mm
ATTACCO A FLANGIA QUADRA
RISOLUZIONI FINO A 10000 IMPULSI AL GIRO

INCREMENTAL ENCODER 63 mm DIAMETER
FLANGE MOUNTING
RESOLUTIONS UP TO 10000 PULSES PER
REVOLUTION

CANALI - RISOLUZIONI - ELETTRONICHE - CONNESSIONI - ALIMENTAZIONE: VEDERE SEZIONE 1
CANALS - RESOLUTIONS - ELECTRONICS - CONNECTIONS - POWER SUPPLY: SEE SECTION 1
COUPLINGS - DEVELOPERS WHEELS - CONNECTORS: SEE SECTION 3

COME ORDINARE

HOW TO ORDER



File: Novec SI063.pdf
Rev: 8.2

Tutti i diritti sono riservati. È vietata espressamente la ristampa o l'uso non autorizzato senza permesso scritto dalla Selet S.p.A.
All rights reserved. No part of this document may be reproduced or transmitted in any form or by any means without written permission from Selet S.p.A.



SELET SENSOR...

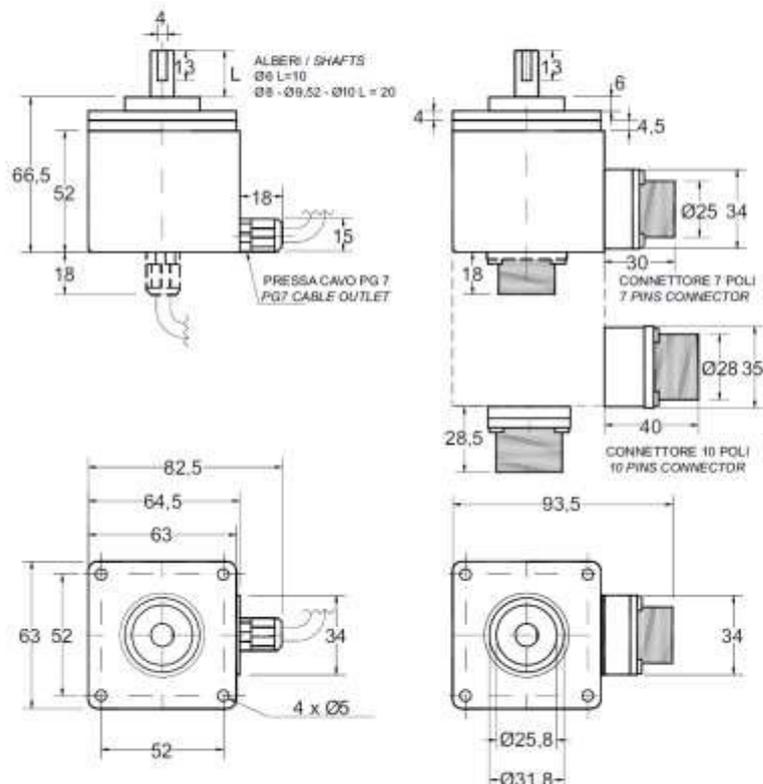
Fermo / Torino - Piemonte - Italy
E-mail: info@selet.it
WEB: www.selet.it

CARATTERISTICHE MECCANICHE
MECHANICAL FEATURES

VELOCITA' DI ROTAZIONE	6000 g/min (Rpm) 2000 g/min (Rpm) => IP65; IP67	MAX ROTARY SPEED
CARICO SULL'ALBERO MAX	30N (assiali / radiali - axial / radial)	MAX SHAFT LOAD
VITA CUSCINETTI	10 ⁸ rivoluzioni / revolutions	BEARINGS LIFE
TENUTA ALLE VIBRAZIONI	10 G (10 + 2000 Hz)	VIBRATIONS RESISTANCE
TENUTA AGLI URTI	20 G (11 ms)	SHOCK RESISTANCE
ALBERO	ACCIAIO INOX/STAINLESS STEEL	SHAFT
CORPO	ALLUMINIO / ALUMINIUM	BODY
FLANGIA	PVC - ABS	FLANGE
CUSTODIA	PVC - ABS	HOUSING
TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	-25°C + 75°C	STORAGE TEMPERATURE
TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO	0°C + 60°C	WORKING TEMPERATURE
GRADO DI PROTEZIONE	IP54 - IP65 - IP67	IP RATING
UMIDITA' RELATIVA	90%	RELATIVE HUMIDITY
PESO	300 g	WEIGHT

CARATTERISTICHE ELETTRICHE
ELECTRICAL FEATURES

TENSIONE DI ALIMENTAZIONE	Vcc vedi tabella / Vdc see table	POWER SUPPLY
ASSORBIMENTO	150 mA MAX	POWER CONSUMPTION
CORRENTE DI CARICO MAX	20 + 100 mA secondo l'elettronica depends output	MAX LOAD
FREQUENZA CANALI	100 kHz (f= Rpm x # pulses / 60)	A-B SIGNAL MAX FREQUENCY

DIMENSIONI
DIMENSIONS


ORDEN DE EMPASTADO