

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAB DEL CUSCO.**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
INFORMÁTICA Y MECÁNICA.**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.**



**TESIS**

---

**MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN  
SECUNDARIA PARA MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS  
DE LA REGIÓN CUSCO 2019**

---

**Presentado por:**

**Br. Mac Junior Carrillo Moscoso.**

**Br. Freddy Pinares Mendoza.**

**Para Optar al Título Profesional de  
Ingeniero Electricista.**

**Asesor: M.Sc. Ing. Manuel Lau Pacheco.**

**CUSCO – PERÚ  
2023**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE REGULACION SECUNDARIA PARA MICROCENTRALES HIDROELECTRICAS DE LA REGION CUSCO 2019<sup>II</sup>  
presentado por: FREDDY PINAROS MENDOZA con DNI Nro.: 70383283  
presentado por: MAC JUNIOR CARRILLO MARCOSO con DNI Nro.: 46986156  
para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO ELECTRICISTA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 09%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 06 de FEBRERO de 2024

  
.....

Firma

Post firma MOSC MANUEL LAU PACHECO

Nro. de DNI 23828214

ORCID del Asesor 0000-0001-6988-1833

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: 27259:317244387

NOMBRE DEL TRABAJO

**MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN SECUNDARIA PARA MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE LA RE**

AUTOR

**Mac Junior/Freddy Carrillo/Pinares**

RECUENTO DE PALABRAS

**28247 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**157683 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**145 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**4.5MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jan 29, 2024 9:03 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Jan 29, 2024 9:05 PM GMT-5****● 9% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Base de datos de trabajos entregados
- Material citado
- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 28 palabras)

## **PRESENTACIÓN**

Señor: Decano de la facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica,  
Informática y Mecánica.

Señores: Miembros del Jurado de tesis:

En cumplimiento con los preceptos que establece el Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, y para optar al Título Profesional de Ingeniero Electricista, presentamos a vuestra consideración la presente tesis titulada:

### **MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN SECUNDARIA PARA MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE LA REGIÓN CUSCO 2019.**

La tesis tiene como finalidad el desarrollo del modelamiento del sistema de regulación secundaria en micro centrales hidroeléctricas, así como el desarrollo de un modelo simplificado frente a la dinámica del sistema de excitación del generador, con el fin de mejorar la respuesta a la estabilidad de tensión, teniendo pequeños límites de variación respecto de un valor de referencia o nominal prefijado, aun cuando la carga conectada al generador varíe según las necesidades de consumo en cada momento. Es decir, mantener constante una consigna de tensión en los distintos nudos del sistema eléctrico y que estas a su vez son inyectadas por las generadoras hidroeléctricas de la Región Cusco. La tesis aplica al estudio de caso de la micro central hidroeléctrica de Hercca.

ATENTAMENTE.

Br. Mac Junior Carrillo Moscoso.

Br. Freddy Pinares Mendoza.

**DEDICATORIA**

Con mucho cariño a nuestros padres  
y familiares por estar siempre con  
nosotros en todo este tiempo, por su  
gran amor, comprensión y apoyo  
incondicional, gracias por siempre  
estar impulsándonos a seguir  
adelante en pugna de cumplir  
nuestros sueños y adjetivos,  
que nos bridaron cada día para  
cumplir este gran objetivo.

Mac Junior Carrillo Moscoso

Freddy Pinares Mendoza

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros familiares por darnos  
animo durante este proceso.

A la empresa Electro Sur Este  
S.A.A. por abrirme sus puertas y  
permitirnos ampliar nuestros  
conocimientos en el campo de la  
ingeniería eléctrica.

Al Msc. Ing. Manuel LAU PACHECO,  
docente de la escuela profesional  
de ingeniería eléctrica de la  
UNSAAC, por el tiempo y  
asesoramiento brindado.

Mac Junior Carrillo Moscoso

Freddy Pinares Mendoza

## INTRODUCCIÓN

El contenido del presente trabajo de tesis se desarrolla de la siguiente forma:

**Capítulo I**, se plantean los aspectos generales de la tesis como son el problema, la situación actual, el planteamiento del problema, objetivo general, objetivos específicos, justificación, la hipótesis, variables y metodología principalmente.

**Capítulo II**, que muestra la teoría básica primordial para el modelamiento del sistema de regulación secundaria, se desarrolla los casos teóricos conceptuales que son parte de la base del estudio de modelamiento del sistema regulación secundaria, de igual manera las propiedades operativas y analíticas.

**Capítulo III**, en este capítulo damos a conocer la implementación del Control Automático de la Tensión (AVR) el estudio en distintas situaciones y facetas.

**Capítulo IV**, aquí abordaremos el tema de los aspectos generales del estudio de caso seleccionado, abordando sus características constructivas y operativas y el modelamiento del sistema de regulación secundario implementado en el Simulink del Matlab.

## RESUMEN EJECUTIVO.

La implementación de las micro centrales hidroeléctricas ha experimentado un significativo avance en los últimos años, especialmente en la perspectiva de la “Transición energética” que beneficia a las poblaciones o comunidades aisladas que tienen recursos hídricos con caudales y saltos pequeños y permanentes. En ese contexto, uno de los problemas operativos es la regulación secundaria de tensión y su análisis, para dicho efecto se plantea en el presente trabajo el modelamiento del sistema de regulación secundaria. En los países en vías de desarrollo el crecimiento de las micro centrales permitirá incrementar la capacidad del parque generador del Perú generando un impulso decisivo para su desarrollo económico.

La investigación realizada tiene un enfoque cuantitativo porque se recopiló y cuantificó los datos e información y el nivel de investigación es principalmente descriptivo porque desarrolla un diagnóstico del objeto de estudio y es explicativo porque analiza las causas de los problemas de regulación secundaria en las micro centrales y que con algunas limitaciones también estas se pueden generalizar para las micro centrales hidroeléctricas.

En el presente trabajo se ha logrado modelar el sistema de regulación secundaria para el estudio de caso utilizada como muestra, según las estrategias planteadas para el modelo implantado en el software Matlab – Simulink y se demostró la existencia de causalidad de la incidencia de la inyección de potencia y su estabilidad.

También se ha demostrado un modelo simplificado para representar la regulación secundaria o de tensión frente a la dinámica del sistema de excitación del generador muestra para dos casos sin PID y con PID o controlador proporcional, integral, derivativo, siendo el segundo modelo el más adecuado y con la mejor respuesta en cuanto al desempeño del sistema de regulación de tensión.

## EXECUTIVE SUMMARY

The implementation of micro hydroelectric plants has experienced significant progress in recent years, especially in the perspective of the “Energy Transition” that benefits isolated populations or communities that have water resources with small and permanent flows and jumps. In this context, one of the operational problems is secondary voltage regulation and its analysis; for this purpose, the modeling of the secondary regulation system is proposed in this work. In developing countries, the growth of micro power plants will increase the capacity of Peru's generating park, generating a decisive boost for its economic development.

The research carried out has a quantitative approach because the data and information was collected and quantified and the level of research is mainly descriptive because it develops a diagnosis of the object of study and is explanatory because it analyzes the causes of secondary regulation problems in micro power plants and that with some limitations these can also be generalized for micro hydroelectric plants.

In the present work, it has been possible to model the secondary regulation system for the case study used as a sample, according to the strategies proposed for the model implemented in the Matlab – Simulink software and the existence of causality of the incidence of the injection of power and its stability.

A simplified model has also been demonstrated to represent the secondary or voltage regulation versus the dynamics of the excitation system of the sample generator for two cases without PID and with PID or proportional, integral, derivative controller, the second model being the most appropriate and with the best response in terms of the performance of the voltage regulation system.

## CONTENIDO DE LA TESIS

PRESENTACIÓN.....		I
INTRODUCCIÓN .....		IV
RESUMEN EJECUTIVO.....		V
GLOSARIO DE TERMINOS.....		XVII
LISTADO DE TÉRMINOS USADOS .....		XVIII
<b>1</b>	<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1.</b>	<b>ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>1</b>
1.1.	Nombre de la tesis. ....	1
1.2.	Responsable.....	1
1.3.	Ubicación geográfica.....	1
1.4.	El problema.....	3
1.4.1.	Ámbito de influencia de la tesis.....	3
1.4.2.	Descripción de la situación actual. ....	3
1.4.3.	Planteamiento del problema. ....	4
1.4.4.	Formulación del problema.....	7
1.4.5.	Problema general. ....	7
1.4.6.	Problemas específicos.....	7
1.5.	Objetivos.....	7
1.5.1.	Objetivo general.....	7
1.5.2.	Objetivos específicos.....	7
1.6.	Justificación de la tesis. ....	8
1.6.1.	Técnica.....	8
1.6.2.	Relevancia social. ....	8
1.6.3.	Implicancias prácticas.....	8

1.6.4.	Implicancia metodológica.....	9
1.7.	Alcances de la tesis.....	9
1.8.	Limitaciones de la tesis.....	9
1.9.	Hipótesis.....	10
1.9.1.	Hipótesis general.....	10
1.9.2.	Hipótesis específicas.....	10
1.10.	Variables.....	10
1.10.1.	Variable independiente.....	10
1.10.2.	Variable dependiente.....	10
1.10.3.	Operacionalización de variables.....	10
1.11.	Metodología.....	13
1.11.1.	Tipo de investigación.....	13
1.11.2.	Nivel de la investigación.....	13
1.11.3.	Método de la investigación.....	13
1.12.	Población y muestra.....	13
1.12.1.	Población.....	13
1.12.2.	Muestra.....	14
1.13.	Técnicas e instrumentos de investigación.....	14
1.14.	Tratamiento de datos.....	15
1.15.	Herramientas para el procesamiento de datos.....	15
1.16.	Análisis de datos.....	15
1.17.	Matriz de consistencia.....	15
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>17</b>
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
2.1.	Antecedentes.....	17

2.2.	Introducción.....	18
2.3.	Requerimientos de calidad del servicio eléctrico. ....	19
2.3.1.	La calidad del suministro eléctrico. ....	19
2.4.	El Generador síncrono. ....	23
2.4.1.	Consideraciones básicas. ....	23
2.4.2.	Principio de funcionamiento.....	23
2.4.3.	Aspectos físicos y constructivos.....	25
2.4.4.	Circuito equivalente.....	28
2.4.5.	El generador síncrono conectado a una red de potencia infinita. ....	29
2.4.6.	Límites de operación de la máquina. ....	35
2.5.	Excitación del generador. ....	36
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>38</b>
<b>3.</b>	<b>MODELAMIENTO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA TENSIÓN</b>	
<b>(AVR).</b>	<b>38</b>	
3.1.	Introducción.....	38
3.2.	Comparador y amplificador.....	40
3.3.	Excitatriz.....	41
3.4.	Generador síncrono.....	43
3.5.	Función de transferencia en bucle abierto. ....	45
3.6.	Función de transferencia en bucle cerrado. ....	45
3.7.	Respuesta del bucle de regulación AVR en régimen permanente. ....	46
3.8.	Respuesta del bucle de regulación AVR en régimen transitorio. ....	48
3.9.	Compensadores para estabilizar el régimen dinámico.....	51
3.10.	Control automático de la tensión (AVR). ....	54
3.11.	Tipos de sistemas de excitación.....	55

3.11.1.	Sistemas de excitación tipo DC. ....	56
3.11.2.	Sistemas de excitación tipo AC. ....	56
3.11.3.	Sistemas de excitación tipo ST. ....	59
3.12.	Modelamiento de componentes. ....	60
3.12.1.	Excitatrices de corriente continua (DC). ....	60
3.12.2.	Excitatrices de corriente alterna (AC). ....	62
3.12.3.	Sistema de rectificación. ....	63
3.12.4.	Amplificadores. ....	63
3.12.5.	Circuitos de estabilización. ....	64
3.12.6.	Transductor de tensión y compensador de carga. ....	65
3.13.	Representación de sistemas de excitación. ....	66
3.13.1.	Sistemas de excitación tipo DC1A. ....	66
3.13.2.	Sistemas de excitación tipo AC1A. ....	67
3.13.3.	Sistemas de Excitación Tipo AC4A. ....	68
3.13.4.	Sistemas de Excitación Tipo ST1A. ....	69
3.13.5.	Sistemas de Excitación Tipo ST2A. ....	71
3.13.6.	Parámetros típicos. ....	72
3.14.	Estabilizador de sistemas de potencia. ....	74
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>77</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.</b> .....	<b>77</b>
4.1.	Introducción. ....	77
4.2.	Características de la micro central hidroeléctrica de Hercca. ....	77
4.2.1.	Reseña histórica. ....	77
4.2.2.	Antecedentes. ....	77
4.2.3.	Ubicación de la muestra. ....	78

4.2.4.	Descripción del Estado Actual: .....	79
4.2.5.	Generación de la micro central. ....	79
4.2.6.	Conexiones de los grupos. ....	79
4.2.7.	Instalaciones. ....	79
4.2.8.	Aprovechamiento hidro energético.....	80
4.2.9.	Obras de toma. ....	80
4.2.10.	Canal de aducción.....	80
4.2.10.1.	<i>Desarenador.</i> .....	81
4.2.10.2.	<i>Cámara de Carga.</i> .....	81
4.2.11.	Tubería forzada.....	81
4.2.12.	Canal de descarga. ....	82
4.2.13.	Otras construcciones.....	82
4.2.14.	Obras Electromecánicas.....	82
4.3.	Modelamiento matemático del sistema de excitación. ....	89
4.3.1.	Amplificador rotativo. ....	90
4.3.2.	Sistema de excitación. ....	91
4.3.3.	Sistema de generación. ....	93
4.4.	Modelo del regulador de tensión automático.....	94
4.4.1.	Datos de los componentes de regulación de tensión. ....	94
4.5.	Modelo implementado en el Simulink del Matlab. ....	95
4.5.1.	Modelo implementado sin controlador PID. ....	95
4.5.1.1.	<i>Salida de tensión sin PID.</i> .....	95
4.5.2.	Modelo implementado con controlador PID. ....	96
4.5.2.1.	<i>Parámetros considerados controlador PID.</i> .....	96
4.5.2.2.	<i>Salida de tensión con PID.</i> .....	97

CONCLUSIONES .....	98
SUGERENCIAS .....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	100
ANEXOS DE LA TESIS. ....	102

### ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 1.1</b> Ubicación a nivel departamental, provincial, distrital y local. ....	2
<b>Figura 2.1</b> Rotor del alternador. ....	25
<b>Figura 2.2</b> Armadura del Alternador. ....	27
<b>Figura 2.3</b> Circuito equivalente del generador síncrono. ....	28
<b>Figura 2.4</b> Máquina síncrona de rotor cilíndrico conectada a una red de potencia infinita funcionando como generador (sobree excitado). ....	30
<b>Figura 2.5</b> Máquina síncrona de polos salientes conectada a una red de potencia infinita funcionando como generador (sobree excitado). ....	33
<b>Figura 3.1</b> Sistema de regulación AVR sin escobillas. ....	39
<b>Figura 3.2</b> Función de transferencia de lazo abierto .....	45
<b>Figura 3.3</b> Función de transferencia en bucle abierto representando en forma global .....	45
<b>Figura 3.4</b> Función de transferencia en bucle cerrado. ....	46
<b>Figura 3.5</b> Función de transferencia en bucle cerrado simplificada.....	46
<b>Figura 3.6</b> Posición de los polos para valores de la ganancia K pequeños. ....	49
<b>Figura 3.7</b> Posición de los polos para valores de la ganancia K intermedios. ....	50
<b>Figura 3.8</b> Posición de los polos para valores de la ganancia K elevados. ....	50

<b>Figura 3.9</b> Partes del sistema de excitación. ....	55
<b>Figura 3.10</b> Sistema de excitación Tipo DC. ....	56
<b>Figura 3.11</b> Sistema de excitación con rectificación no-controlada .....	57
<b>Figura 3.12</b> Sistema de excitación con rectificación controlada.....	58
<b>Figura 3.13</b> Sistema de excitación sin escobillas. ....	58
<b>Figura 3.14</b> Excitación con fuente de potencia con rectificación controlada. ....	59
<b>Figura 3.15</b> Excitación con fuente de potencia con rectificación compuesta .....	60
<b>Figura 3.16</b> Diagrama de bloques de la excitatriz DC .....	61
<b>Figura 3.17</b> Diagrama de bloques de la excitatriz no lineal.....	62
<b>Figura 3.18</b> Diagrama de bloques del excitador AC. ....	63
<b>Figura 3.19</b> Modelo del proceso de rectificación. ....	64
<b>Figura 3.20</b> Modelo del amplificador.....	64
<b>Figura 3.21</b> Circuito de estabilización. ....	65
<b>Figura 3.22</b> Transductor de tensión y compensador de carga. ....	65
<b>Figura 3.23</b> Sistema de excitación tipo DC1A.....	66
<b>Figura 3.24</b> Sistema de excitación Tipo AC1A .....	67
<b>Figura 3.25</b> Sistema de excitación Tipo AC4A .....	68
<b>Figura 3.26</b> Sistema de excitación Tipo ST1A .....	70
<b>Figura 3.27</b> Sistema de excitación Tipo ST2A. ....	71
<b>Figura 3.28</b> Esquema básico de un PSS. ....	76
<b>Figura 4.1</b> Ubicación geográfica de la micro central hidroeléctrica de Hercca. ....	78
<b>Figura 4.2</b> Casa de máquinas de la central hidroeléctrica de Hercca. ....	80
<b>Figura 4.3</b> Unidad de generación (Turbina y placa de datos grupo 1).....	83
<b>Figura 4.4</b> Unidad de generación (Turbina y placa de datos grupo 2).....	84
<b>Figura 4.5</b> Unidad generadora I (Generador y placa de datos grupo 1).....	85

<b>Figura 4.6</b> Unidad generadora I (Generador y placa de datos grupo 2).....	85
<b>Figura 4.7</b> Unidad generadora II (turbina). .....	86
<b>Figura 4.8</b> Unidad generadora II (generador y placa da valores).....	87
<b>Figura 4.9</b> Unidad generadora II (excitatriz y placa de datos). .....	88
<b>Figura 4.10</b> Diagrama unifilar del sistema eléctrico. ....	90
<b>Figura 4.11</b> Esquema del amplificador rotativo. ....	91
<b>Figura 4.12</b> Determinación de la corriente de excitación. ....	92
<b>Figura 4.13</b> Sistema de excitación. ....	93
<b>Figura 4.14</b> Diagrama de bloques del modelo matemático del regulador de tensión. ....	94
<b>Figura 4.15</b> Diagrama implementado en Matlab.....	95
<b>Figura 4.16</b> Modelo con controlador PID .....	96

### ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 3.1</b> Respuesta temporal de la tensión de salida. ....	53
<b>Tabla 3.2</b> Características modos de operación del rectificador.....	63
<b>Tabla 3.3</b> Parámetros típicos. ....	72

### ÍNDICE DE CUADROS.

<b>Cuadro 1.1</b> Ubicación geográfica.....	1
<b>Cuadro 1.2</b> Cuadro resumen del SAIFI(Número de Interrupciones) Año 2019.. .....	6
<b>Cuadro 1.3</b> Cuadro resumen del SAIFI(Número de Interrupciones) Año 2020.. .....	6
<b>Cuadro 1.4</b> Cuadro resumen del SAIDI(Duración de Interrupciones) Año 2019.....	6
<b>Cuadro 1.5</b> Cuadro resumen del SAIDI(Duración de Interrupciones) Año 2020.....	7

<b>Cuadro 1.6</b> Operacionalización de variables.....	12
<b>Cuadro 1.7</b> Micro centrales hidroeléctricas de la región del Cusco según ministerio de energía y minas .....	14
<b>Cuadro 1.6</b> Matriz de consistencia.....	12
<b>Cuadro 2.1</b> Valores límites de calidad de suministro por sector típico.....	19
<b>Cuadro 2.2</b> Variaciones admisibles en la tensión y la frecuencia.....	21
<b>Cuadro 4.1</b> Características tubería forzada.....	81
<b>Cuadro 4.2</b> Características técnicas unidad generadora I.....	82
<b>Cuadro 4.3</b> Características técnicas unidad generadora II (turbina).....	86
<b>Cuadro 4.4</b> Características técnicas unidad generadora II (generador).....	87
<b>Cuadro 4.5</b> Características técnicas unidad generadora II (excitatriz).....	88
<b>Cuadro 4.6</b> Características técnicas subestación.....	89
<b>Cuadro 4.7</b> Datos de los componentes del regulador de tensión.....	94
<b>Cuadro 4.8</b> Parámetros considerados controlador PID.....	96

### ÍNDICE DE GRÁFICOS.

<b>Gráfico 3.1</b> Respuesta en el dominio del tiempo de la tensión de salida, frente a una variación de la tensión de referencia en forma de escalón de valor 100%.....	54
<b>Gráfico 4.1</b> Salida de la amplitud de la tensión con respecto a la referencia.....	95
<b>Gráfico 4.2</b> Resultados del comportamiento de la tensión con controlador PID.....	97

## ÍNDICE DE ANEXOS.

<b>La Figura 1</b> (Anexos) muestra el Entorno del MATLAB.....	103
<b>Figura 2</b> (Anexos) Entorno del MATLAB. ....	103
<b>Figura 3</b> (Anexos) Ventana de comandos del MATLAB.....	104
<b>Figura 4</b> (Anexos) Historial de comandos ejecutados en MATLAB. ....	105
<b>Figura 5</b> (Anexos) Espacio de trabajo en MATLAB. ....	106
<b>Figura 6</b> (Anexos) Editor de matriz del MATLAB.....	107
<b>Figura 7</b> (Anexos) Directorio activo del MATLAB.....	108
<b>Figura 8</b> (Anexos) Creador y depurador de archivos del MATLAB. ....	109
<b>Figura 9</b> (Anexos) Entorno de ayuda en MATLAB.....	110
<b>Figura 10</b> (Anexos) Tiempo de ejecución de la CPU en MATLAB. ....	111
<b>Figura 11</b> (Anexos) Implementación del lenguaje de programación ejemplo 1. ....	112
<b>Figura 12</b> (Anexos) Gráfica de respuesta en régimen dinámico caso 1. ....	113
<b>Figura 13</b> (Anexos) Gráfica de respuesta en régimen dinámico caso 2. ....	114
<b>Figura 14</b> (Anexos) Implementación del lenguaje de programación ejemplo 2. ....	115
<b>Figura 15</b> (Anexos) Gráfica de respuesta del bucle de regulación AVR en régimen transitorio. .....	116
<b>Figura 16</b> (Anexos) Implementación del modelo sin PID.....	117
<b>Figura 17</b> (Anexos) Respuesta Transitoria implementación del modelo sin PID. ....	118
<b>Figura 18</b> (Anexos) Implementación del modelo con PID.....	119
<b>Figura 19</b> (Anexos) Respuesta Transitoria implementación del modelo con PID. ....	120

## GLOSARIO DE TERMINOS

**GENERADOR:** Un generador eléctrico es cualquier dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica que puede mantener la diferencia eléctrica entre sus dos puntos (polos o terminales).

**ESTATOR:** El estator o estator es la parte fija de una máquina giratoria y es uno de los dos componentes principales de transferencia de energía (en el caso de los motores eléctricos) o corriente (en el caso de los generadores eléctricos), siendo la otra parte con movilidad el rotor portátil.

**ROTOR:** Un rotor es una parte giratoria de una máquina eléctrica, ya sea un motor eléctrico o un generador. Junto con su contraparte permanente, el estator, forma la unidad básica para la transmisión de energía. en motores y vehículos eléctricos en general.

**TENSIÓN ELÉCTRICA:** El voltaje o diferencia de potencial (también conocido como voltaje) es una cantidad física que describe la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. También se puede definir como el trabajo realizado por unidad de carga por el campo eléctrico. entre la partícula cargada y dos posiciones específicas para moverla. Se puede medir con un voltímetro. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el voltio.

**CORRIENTE ELÉCTRICA:** El flujo de cargas eléctricas a través de un conductor. También se puede definir como el flujo de partículas cargadas como electrones o iones que se mueven a través de un vehículo o espacio eléctrico. Se mide como el flujo neto de carga eléctrica desde la superficie o en el volumen de control.

**FRECUENCIA:** En el caso de la corriente eléctrica, la frecuencia es el número de repeticiones de la onda sinusoidal, o completa un ciclo de positivo a negativo.

**LISTADO DE TÉRMINOS USADOS**

<b>SEIN</b>	:	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional del Perú.
<b>NTCSE</b>	:	Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos.
<b>AVR</b>	:	Por sus siglas en inglés Automatic Voltage Regulator (Regulador Automático De Voltage).
<b>AGC</b>	:	Por sus siglas en inglés Automatic Gain Control (Control Automático De Ganancia).
<b>SAIDI</b>	:	Por sus siglas en inglés System Average Interruption Duration Index.
<b>SAIFI</b>	:	Por sus siglas en inglés System Average Interruption Frequency Index.
<b>OSINERGMIN</b>	:	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía.
<b>DC</b>	:	Por sus siglas en inglés Direct Current (Corriente Continua).
<b>AC</b>	:	Por sus siglas en inglés Alternating current (Corriente Alterna).
<b>PSS</b>	:	Por sus siglas en inglés Power System Stabilizer
<b>kW</b>	:	Kilovatio.
<b>kV</b>	:	Kilovoltio.
<b>ONAN</b>	:	Circulación del aceite en forma natural y enfriamiento por aire en forma natural (por termosifón en ambos casos).
<b>S.E.</b>	:	Sub estación.
<b>SINAC</b>	:	Sistema Interconectado Nacional.
<b>PID</b>	:	Proporcional, Integral y Derivativo.

## CAPÍTULO I

### 1. ASPECTOS GENERALES.

#### 1.1. Nombre de la tesis.

Modelamiento del sistema de regulación secundaria para micro centrales hidroeléctricas de la región Cusco 2019.

#### 1.2. Responsable.

Br. Mac Junior Carrillo Moscoso.

Br. Freddy Pinares Mendoza.

#### 1.3. Ubicación geográfica.

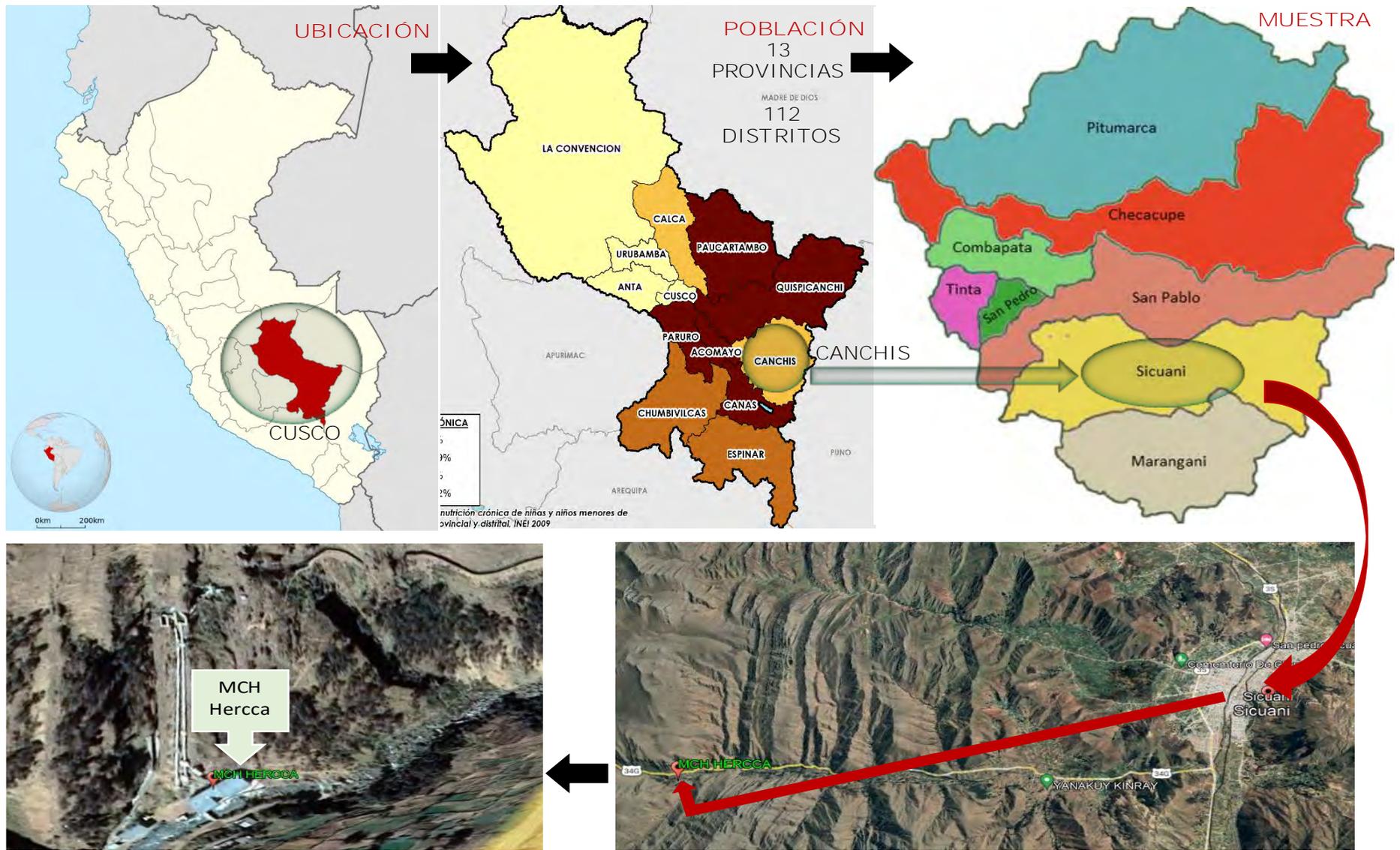
La tesis se desarrolla en la micro central de Hercca ubicada en el departamento del Cusco, la provincia de Canchis, distrito de Sicuani, sector Hercca. A una altitud de 3878 msnm, Cuyas coordenadas UTM se detallan en el **cuadro 1.1** y el recorrido geográfico en la **figura 1.1**.

**Cuadro 1.1** Ubicación geográfica.

Ítems	Departamento	provincia	distritos	Altitud(msnm)
Población	Cusco	13	112	532-6372
Ítems	Departamento	provincia	distritos	Altitud(msnm)
Muestra	Cusco	Canchis	Sicuani	3475-5661
Coordenadas UTM muestra (Micro central Hidroeléctrica de Hercca)				
NORTE			8411373.807 N	
ESTE			252088.8019 E	
m.s.n.m.			3878.00	

*Fuente: Elaboración basado en datos del instituto geográfico nacional.*

|



**Figura 1.1** Ubicación a nivel departamental, provincial, distrital y local.

*Fuente: Elaboración en base a Google Earth.*

## **1.4. El problema.**

### **1.4.1. Ámbito de influencia de la tesis.**

El crecimiento poblacional trae consigo la necesidad de incrementar el volumen de producción de energía para dar una mejor calidad de vida a la población, requiriéndose un conjunto de obras de infraestructura eléctrica que ayuden cubrir las necesidades de los usuarios sin alterar o deteriorar sustancialmente el medio ambiente, por tanto el ámbito de ejecución del presente trabajo abarca a la región Cusco ubicada en el sur del país, enmarcado dentro del ámbito de operación del Sistema Interconectado Nacional.

### **1.4.2. Descripción de la situación actual.**

La definición de generación hidroeléctrica depende del uso de productos renovables, es decir, agua de ríos, lagos y embalses según el caudal (energía cinética) y la distancia a la que se encuentra el agua (energía potencial). El agua se capta en presas o embalses y la energía cinética se convierte en electricidad mediante el sistema de turbina-generator. La principal forma de aprovechar el agua de los ríos en el Perú es la construcción de centrales hidroeléctricas. De acuerdo con el sistema de flujo y el tipo de tamiz, los sistemas de potencia se clasifican generalmente en:

**1. Centrales de agua fluyente o pasada.** El caudal o transmisión de la energía hidroeléctrica depende del caudal natural del agua del río y del caudal regular, que varía mucho según la hidrología. Su tarea es dirigir el flujo de agua del río a las turbinas. Este proceso suele comenzar con una presa o corte a través del cual se hace avanzar el agua a través de un canal. A partir de aquí se pone en marcha una bomba que abastece de agua a la turbina del edificio de la estación junto con el generador eléctrico. Luego, el agua regresa al río a través del canal. Las turbinas reciben las corrientes de los ríos con los cambios estacionales, por lo que a veces se pierde mucha agua como resultado de los picos de tensión. (Zoppetti, 2004)

**2. Centrales de embalse.** La corriente de agua del río es almacenada a través de una presa, la que aguas arriba establece un espejo de agua, el que en grandes cantidades ocasiona

problemas ecológicos considerables, en la parte inferior en forma externa o interna con la presa se dispone la casa de máquinas en la que la altura útil la determina la corona de la presa y el punto de ubicación de la turbina, al interior de la presa se disponen los sistemas de conducción del agua “tuberías de presión” que proporcionan la energía hidráulica a las turbinas que en una adecuada disposición proporcionan la energía mecánica a los generadores y así producir la energía eléctrica; este tipo de instalaciones no se recomiendan en generación eléctrica a pequeña escala por el elevado costo que significan las obras civiles; luego, el agua es regresada río abajo, gracias a un canal de descarga. (Zoppetti, 2004)

Un grupo de turbinas y generadores, a menudo interconectados, generan beneficios en la diferencia en el precio de la energía durante las horas pico y las horas valle. Usarlo para recolectar energía puede ser muy interesante para apoyar instalaciones que no pueden recolectarla, como algunas solares e hidráulicas. Este Plan Estratégico contempla centrales de agua fluyente de pasada o de filo de agua, es decir, las que no tienen embalsamiento (almacenamiento de agua), ya que aprovechan el caudal del río para generar electricidad. (Zoppetti, 2004)

### **1.4.3. Planteamiento del problema.**

La generación eléctrica del sistema interconectado nacional (SEIN) está compuesta principalmente por las centrales de generación hidráulica, llegando a representar un porcentaje mayoritario con respecto a otros tipos de generación eléctrica. (OSINERMING)

Aunque solamente una parte de la potencia hidráulica ha sido explotada en nuestro país, especialmente las micro centrales hidráulicas las cuales tienen siempre un impacto positivo como son ecológicos, económicos y sociales. Pero también debemos de tener en cuenta la confiabilidad que estas nos pueden dar en el suministro de la energía eléctrica.

El cual está “es la capacidad de un componente, equipo o sistema, de no descomponerse o fallar durante el tiempo previsto para su funcionamiento bajo condiciones de trabajo

perfectamente definidas” (NTCSE). Por tanto, tenemos a nuestro alcance dos indicadores que son el SAIFI y SAIDI los cuales nos ayudan a determinar el número y duración de interrupciones de la calidad de suministro, que en nuestro caso es la variación de la tensión de salida en las micro centrales hidroeléctricas del Cusco, tomando de muestra la micro central hidroeléctrica de Hercca, la misma que se integra al SEIN a través de la línea de transmisión L-6001. Por lo tanto, cualquier problema en la línea de transmisión adquiere una importante determinante en la operación de la micro central e interrupción de la misma así también en la estabilidad en la regulación secundaria o de tensión.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende mejorar la estabilidad del sistema de regulación secundaria frente a las inyecciones de potencia, esto ante cualquier fallo no programado de las redes próximas de las redes cercanas conectadas a la misma. Para esto se comparan algunos modelos de sistema de excitación para micro centrales hidroeléctricas o generadores de control eléctrico y se determina qué método permite que el sistema obtenga la mayor potencia. El análisis se realiza para diferentes situaciones de investigación para revelar una visión integral, que permita brindar los parámetros necesarios para elegir la mejor opción al elegir una de las estrategias.

#### **En resumen:**

Las micro hidro generaciones del Cusco Presentan deficiencias en el control y el modelamiento del proceso de regulación secundaria de tensión con la finalidad de controlar la estabilidad de tensión frente a las inyecciones de potencia provenientes de esta, a su inserción o por las interrupciones de origen no programadas como las fallas en las redes cercanas o interconectadas a ella. por tanto adquiere una importancia determinante en la operación de la Micro Central Hidroelectrica de Hercca, y su correspondiente interconexión al SEIN. veremos

a continuación un resumen de las interrupciones de operación por desconexión que se muestran en los cuadros 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5 respectivamente.

**Cuadro 1.2** Cuadro resumen del SAIFI(Número de Interrupciones) Año 2019.

<b>INTERRUPCIONES DE OPERACIÓN POR DESCONEXIÓN DE L-6001 (SAIFI) AÑO 2019</b>		
<b>SEMESTRE</b>	<b>FECHAS</b>	<b>TOTAL</b>
I	28 de enero	2 interrupciones por semestre
	1 de mayo	
II	11 de octubre	2 interrupciones por semestre
	1 de diciembre	

*Fuente: COES-SINAC/Elaboración: Propia.*

**Cuadro 1.3** Cuadro resumen del SAIFI(Número de Interrupciones) Año 2020.

<b>INTERRUPCIONES DE OPERACIÓN POR DESCONEXIÓN DE L-6001 (SAIFI) AÑO 2020</b>		
<b>SEMESTRE</b>	<b>FECHAS</b>	<b>TOTAL</b>
I	26 de enero	3 interrupciones por semestre
	15 de febrero	
	23 de mayo	
II	28 de setiembre	8 interrupciones por semestre
	29 de setiembre	
	10 de octubre	
	10 de octubre	
	21 de octubre	
	21 de octubre	
	21 de octubre	
	17 de diciembre	

*Fuente: COES-SINAC/Elaboración: Propia.*

**Cuadro 1.4** Cuadro resumen del SAIDI(Duración de Interrupciones) Año 2019.

<b>TIEMPO DE INTERRUPCIONES DE OPERACIÓN POR DESCONEXIÓN (SAIDI) AÑO 2019</b>			
<b>SEMESTRE</b>	<b>FECHAS</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>TIEMPO PROMEDIO TOTAL</b>
I	28 de enero	7 min	6 min por semestre
	1 de mayo	5 min	
II	11 de octubre	48.23 min	26.32 min por semestre
	1 de diciembre	4.41 min	

*Fuente: COES-SINAC/Elaboración: Propia.*

**Cuadro 1.5** Cuadro resumen del SAIDI(Duración de Interrupciones) Año 2020.

<b>TIEMPO DE INTERRUPCIONES DE OPERACIÓN POR DESCONEXIÓN (SAIDI) AÑO 2020</b>			
<b>SEMESTRE</b>	<b>FECHAS</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>TIEMPO PROMEDIO TOTAL</b>
I	26 de enero	4.06 min	10.3 min por semestre
	15 de febrero	20.66 min	
	23 de mayo	6.18 min	
II	28 de setiembre	1.03 horas	15.17 min por semestre
	29 de setiembre	7.15 min	
	10 de octubre	19 min	
	10 de octubre	4.93 min	
	21 de octubre	7.81 min	
	21 de octubre	7.96 min	
	21 de octubre	7.1 min	
	17 de diciembre	5.31 min	

*Fuente: COES-SINAC/Elaboración: Propia.*

#### **1.4.4. Formulación del problema.**

#### **1.4.5. Problema general.**

¿Cómo desarrollar el modelamiento del sistema de regulación secundaria para las micro centrales hidroeléctricas de la región cusco 2019?

#### **1.4.6. Problemas específicos.**

1. ¿El modelo desarrollado para representar el comportamiento del sistema de regulación secundaria en las micro centrales hidroeléctricas del cusco se adecúan correctamente a sus características operativas?

2. ¿El modelo utilizado para representar el sistema de regulación secundaria frente a la dinámica del sistema de excitación del generador, es el más adecuado?

### **1.5. Objetivos.**

#### **1.5.1. Objetivo general.**

Modelar el sistema de regulación secundaria para la micro centrales hidroeléctricas de la región de Cusco 2019.

#### **1.5.2. Objetivos específicos.**

1. Desarrollar modelos para representar el comportamiento del sistema de regulación secundaria en la micro hidro generación que se adecúen correctamente a sus características operativas.
2. Desarrollar un modelo simplificado para representar el sistema de regulación secundaria frente a la dinámica del sistema de excitación del generador.

## **1.6. Justificación de la tesis.**

### **1.6.1. Técnica.**

El trabajo de Investigación es importante porque permitirá dar a conocer las incidencias que se presentan en el suministro energético mediante la incorporación de la micro hidro generación al sistema. Los aspectos que frecuentemente se manifiestan en la operación de los sistemas eléctricos relacionados con la calidad y que ocasionan insatisfacción del cliente son:

- A. Reducción de la vida útil de las máquinas eléctricas.
- B. Deterioro temprano de los equipos que usan componentes electrónicos.
- C. La deficiente calidad del producto.

La antigüedad de las instalaciones y equipos de las micro centrales de la región carecen de propuestas para mejorar su operación, ya que para ello se requiere el conocimiento del modelo de la central.

### **1.6.2. Relevancia social.**

El adecuado análisis de operatividad reducirá la insatisfacción que afecta a la población en especial grupos sociales alejados de los centros de consumo, permitiendo también la mejora de la calidad del suministro.

### **1.6.3. Implicancias prácticas.**

La implementación de un modelo adecuado de la excitación en los sistemas de generación a pequeña escala ayudará a disminuir y/o eliminar los puntos críticos de operación, se logrará una nueva imagen de los productores de energía en la zona.

#### **1.6.4. Implicancia metodológica.**

La implementación del modelamiento del sistema de excitación servirá de guía para otros productores de energía que aún no tienen implementado el modelo adecuado del sistema de excitación de los generadores eléctricos.

#### **1.7. Alcances de la tesis.**

El alcance de la investigación está dado principalmente por la pretensión de formular un modelo adecuado para representar la dinámica de la operación de las micro centrales hidroeléctricas, desarrollando como herramientas principales el análisis estadístico y técnico de los datos permanentes de errores, así como los resultados de los cálculos eléctricos (nivel de potencia, fallas de tensión y corto circuito), cálculos matemáticos a través de programas computacionales, para la determinación de valores de corriente en condiciones regulares y en condiciones de falla.

Este presente estudio de investigación se pretende concluir con la formulación del modelo matemático más representativo para la regulación secundaria de las micro centrales hidroeléctricas.

#### **1.8. Limitaciones de la tesis.**

Así este trabajo constituya un grano de arena dentro de la ciencia. Lo importante es que se analice de manera adecuada, porque luego surge toda una serie de ramificaciones que le dan importancia y valor, en ese sentido:

- La tesis no incluye evaluaciones de estabilidad de frecuencia.

- La tesis no incluye estabilidad del ángulo rotor del generador síncrono.

## **1.9. Hipótesis.**

### **1.9.1. Hipótesis general.**

En el modelamiento del sistema de regulación secundaria se requiere la implementación del controlador PID en las micro centrales hidroeléctricas de la región cusco 2019.

### **1.9.2. Hipótesis específicas.**

1. El modelo para representar el comportamiento del sistema de regulación secundaria, con la implementación del controlador PID.

2. El modelo simplificado para representar el sistema de regulación secundaria mejora el control en la dinámica del sistema de excitación del generador.

## **1.10. Variables**

### **1.10.1. Variable independiente.**

- Modelamiento

#### **Indicado**

- Demanda de potencia

### **1.10.2. Variable dependiente.**

- Sistema de regulación secundaria

#### **Indicador**

- Variación de tensión

### **1.10.3. Operacionalización de variables.**

Se explica en el **cuadro 1.6.**

**Cuadro 1.6** Operacionalización de variables.

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Modelamiento	Es la representación matemática de un objeto físico, biológico o de información. Los modelos nos permiten razonar sobre un sistema y hacer predicciones sobre cómo se comportará un sistema. En control, nos interesaremos principalmente en los modelos de sistemas dinámicos que describen el comportamiento de entrada/salida de los sistemas. (Kundur, 1994).	Demanda de potencia	Simulaciones
VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Sistema de regulación secundaria	Un adecuado perfil de tensiones es necesario para mantener el sistema eléctrico de potencia operando en forma segura, existen una serie de eventos que pueden afectar este perfil, conexiones y desconexiones no programadas de cargas, de generación, de líneas de transmisión, operación incorrecta, o cualquier otro dispositivo que pueda salir o entrar en servicio en forma programada o no; el elemento de control para mitigar estas contingencias es la potencia reactiva, la cual es provista básicamente por el sistema de generación (Kundur, 1994).	Variación de tensión	Simulaciones

*Fuente: Elaboración propia.*

## **1.11. Metodología.**

### **1.11.1. Tipo de investigación.**

Esta tesis emplea un enfoque CUANTITATIVO, por lo que busca primordialmente recopilar y cuantificar los datos o información. Siendo una investigación de índole deductivo en el cual hace énfasis en la comprobación de teorías, mediante la recopilación y análisis de información que se obtiene a través de distintas fuentes de información.

### **1.11.2. Nivel de la investigación.**

Este trabajo se encuentra dentro del nivel DESCRIPTIVO, porque se realiza un diagnóstico del objeto en estudio, que se conoce en su generalidad y que se describirá las principales características rasgos definitivos, los cuales lo distinguirán de los otros objetivos.

Es también Explicativo porque permite determinar las causas del problema analizado.

### **1.11.3. Método de la investigación.**

La tesis combina los métodos INDUCTIVO y DEDUCTIVO. Dicho de otra manera, utilizamos el método mixto, ya que puede establecer o guiar una generalización de efectos y resultados por la relación de estos métodos. Evidentemente coincide la referencia a los conocimientos teóricos, sin estrategias y modelos simplificados mayor inestabilidad de tensión, siendo estas el incumplimiento en la calidad de producto, este punto se deriva una relación de causalidad.

## **1.12. Población y muestra.**

### **1.12.1. Población.**

La población serán las micro centrales de la región del Cusco, los cuales se muestra en el **cuadro 1.4**:

**Cuadro 1.4** Micro centrales hidroeléctricas de la región del Cusco según ministerio de energía y minas.

N°	Micro central	Distrito	Provincia	Departamento	PI (MW)
1	M.C. CHUYAPI	Echarate	La convención	Cusco	0.400
2	M.C. COCLA	Santa Ana	La convención	Cusco	0.120
3	M.C PAUCARTAMBO	Paucartambo	Paucartambo	Cusco	0.240
4	M.C QUILLABAMBA	Cusco	Cusco	Cusco	0.400
5	M.C HERCCA	Sicuani	Canchis	Cusco	0.820

*Fuente: Elaboración propia.*

### 1.12.2. Muestra.

La muestra está dada en micro central hidroeléctrica de Hercca ubicado dentro del departamento del Cusco.

### 1.13. Técnicas e instrumentos de investigación.

Para conseguir la información necesaria se aplica la técnica de observación científica y de estudio de contenido. En una búsqueda del tipo y diseño de la presente, para desarrollar la investigación de los datos conseguidos, es necesario el desarrollo de herramientas estadísticas, a través de la estadística se analizan los datos obtenidos para representar, estructurar, analizar e interpretar de una manera correcta los resultados.

De esta manera, una vez conseguida la información y representada en tablas, el análisis de esta se realizará a través de la estadística descriptiva. Igualmente, para este análisis se utilizó la media como medida de tendencia central, y como medida de dispersión la desviación estándar.

La técnica de observación se realiza de forma sistemática, tal es que:

- Se ha conseguido la información de la base de datos de las empresas eléctricas.
- Para el cotejo y actualización de datos se ha desarrollado un proceso de inspección directa consiguiendo datos de campo.

- La técnica documental y de análisis de contenido:
- La selección de la muestra es intencionada, se desarrolla de una estadística de cargas para analizar su naturaleza.
- Para conseguir el diagnóstico operativo del sistema, se evalúan los reportes de operación con el que se elaborará una base de datos adecuada.

#### **1.14. Tratamiento de datos.**

Se incluyeron actividades de organización, selección, recolección, recepción, organización, extracción, almacenamiento y presentación en tablas, cuadros, gráficos de la información.

#### **1.15. Herramientas para el procesamiento de datos.**

Se realizó la aplicación de los softwares:

- Herramientas de simulación.
- Herramientas de ofimática.
- Herramientas de georreferenciación.
- Google Earth.

#### **1.16. Análisis de datos.**

Una vez recopilado los datos de primera mano, empleando el conocimiento de ingeniería a partir de la información presentada, se procedió a sacar las conclusiones respectivas de nuestro aporte investigativo.

#### **1.17. Matriz de consistencia**

Se muestra a continuación en el **cuadro 1.4.**

Cuadro 1.4 Matriz de consistencia.

MATRIZ DE CONSISTENCIA					
MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN SECUNDARIA PARA MICROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE LA REGION DE CUSCO 2019					
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA	CONCLUSIONES
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL.	HIPÓTESIS GENERAL.	VARIABLE INDEPENDIENTE	TIPO DE INVESTIGACIÓN	
¿Cómo desarrollar el modelamiento del sistema de regulación secundaria para las micro centrales hidroeléctricas de la región cusco 2019?	Modelar el sistema de regulación secundaria para la micro centrales hidroeléctricas de la región de Cusco 2019.	En el modelamiento del sistema de regulación secundaria se requiere la implementación del controlador PID en las micro centrales hidroeléctricas de la región cusco 2019.	• Modelamiento	Esta tesis emplea un enfoque CUANTITATIVO, por lo que busca primordialmente recopilar y cuantificar los datos o información. Siendo una investigación de índole deductivo en el cual hace énfasis en la comprobación de teorías, mediante la recopilación y análisis de información que se obtiene a través de distintas fuentes de información.	1.Se ha logrado modelar el sistema de regulación secundario para la muestra micro central eléctrica de Hercca, por lo tanto, se puede implementar en las micro centrales de la región del Cusco. El modelo se ha implantado en el software Matlab (Simulink), demostrando así, que existe causalidad de la incidencia de la inyección de potencia y su estabilidad.
			INDICADOR		
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.	VARIABLES DEPENDIENTES	Este trabajo se encuentra dentro del nivel DESCRIPTIVO, porque se realiza un diagnóstico del objeto en estudio, que se conoce en su generalidad y que se describirá las principales características rasgos definitivos, los cuales lo distinguirán de los otros objetivos. Es también Explicativo porque permite determinar las causas del problema analizado.	2.Se demostró un modelo para representar el comportamiento del sistema de regulación secundaria o de tensión en la micro hidro generación que se adecúan correctamente a sus características operativas. En cuanto, uno de los sistemas de compensación más sencillos para estabilizar el régimen dinámico consiste en añadir al bucle de regulación un elemento en serie en adelante de fase. Por otra parte, añadir el controlador o regulador PID compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa y que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado, por lo que las condiciones de operación influyen en su estabilidad de tensión.
1. ¿El modelo desarrollado para representar el comportamiento del sistema de regulación secundaria en las micro centrales hidroeléctricas del cusco se adecúan correctamente a sus características operativas? 2. ¿El modelo utilizado para representar el sistema de regulación secundaria frente a la dinámica del sistema de excitación del generador, es el más adecuado?	1. Desarrollar modelo para representar el comportamiento del sistema de regulación secundaria en la micro hidro generación que se adecúan correctamente a sus características operativas. 2. Desarrollar un modelo simplificado para representar el sistema de regulación secundaria frente a la dinámica del sistema de excitación del generador.	1.El modelo para representar el comportamiento del sistema de regulación secundaria, con la implementación del controlador PID. 2.El modelo simplificado para representar el sistema de regulación secundaria mejora el control en la dinámica del sistema de excitación del generador.	• Sistema de regulación secundaria	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.  La tesis combina los métodos INDUCTIVO y DEDUCTIVO. Dicho de otra manera, utilizamos el método mixto, ya que puede establecer o guiar una generalización de efectos y resultados por la relación de estos métodos. Evidentemente coincide la referencia a los conocimientos teóricos, sin estrategias y modelos simplificados mayor inestabilidad de tensión, siendo estas el incumplimiento en la calidad de producto, este punto se deriva una relación de causalidad.	3.Se ha desarrollado un modelo simplificado para representar la regulación secundaria o de tensión frente a la dinámica del sistema de excitación del generador en la micro hidro generación. En tanto, este modelo se desarrolló en el software Matlab, para dos casos: Con la implementación de un modelo sin PID y con PID o controlador proporcional, integral, derivativo, siendo el segundo modelo el más adecuado y con la mejor respuesta en cuanto al desempeño del sistema de regulación de tensión, es decir, se logró obtener una mejor respuesta oscilatoria frente a la señal de salida de la central hidroeléctrica de Hercca ya que este modelo simplificado tiene mejor control en la dinámica del sistema de excitación.
			INDICADOR		
			• Variación de tensión	La población serán las micro centrales de la región del Cusco, los cuales se muestra en el cuadro 1.3.	
				MUESTRA	
				La muestra está dada en micro central hidroeléctrica de Hercca ubicado dentro del departamento del Cusco.	

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO.

#### 2.1. Antecedentes.

Sobre el análisis bibliográfico y documental del tema:

1. “Modernización del Sistema de Regulación de Velocidad en la Central Hidroeléctrica Carlos Mora”, presentado por: Carrera, J. El 2011, para optar al Título Profesional de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.

**Conclusión:** Todas las pruebas realizadas por los participantes permitieron determinar el funcionamiento y movimiento de la vía en términos de velocidad y frecuencia y potencia, si la estabilidad del sistema alcanza o disminuye, los valores especificados en frecuencia y potencia.

2. “Estudio del Sistema de Regulación de Frecuencia En Centrales Hidroeléctricas a partir de Modelos Experimentales”, presentado por: Bertrán, E. & Herranz, J. & Munilla, I. El 2011, para conseguir el Título Profesional de Ingeniero Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Catalunya.

**Conclusión:** En esta tesis no solo tocaron el tema de estabilidad de frecuencia, también el de la estabilidad de tensión. Realizada la identificación del regulador de una turbina Kaplan por medios relativamente simples y muy relacionados con la estructura física del sistema. Los resultados obtenidos se ajustan bien a los valores normales en este tipo de regulador.

- “Determinación del Lazo de regulación de velocidad de la planta Hidroeléctrica “La Joya”, presentado por: Vaglio, D. El 2010, para optar al Título Profesional de Ingeniero Electrónico del Instituto Tecnológico De Costa Rica.

**Conclusión:** En la presente tesis plantearon alternativas de solución para el regulador de velocidad del gobernador utilizando modelos simplificados, diagramas de bloque y

funciones de transferencia, razón por la cual se cita esta tesis como antecedente al nuestro, obteniendo mejores respuestas de los reguladores de velocidad.

- “Modelamiento y Control de una Central Micro Hidráulica”, presentado por: Jiménez, P. El 2013, para obtener al grado de magíster en ciencias de la Ingeniería, mención Eléctrica de la universidad de Chile.

**Conclusión:** Desarrollaron estrategias como la aplicación para el control de tensión y frecuencia operando de generador aislado del sistema eléctrico. Donde incluyeron etapas de modelamiento de la planta, formulación de la función objetivo, cálculo del estado mediante el Filtro Extendido de Kalman (EKF). Demostrando la probabilidad de amortiguar oscilaciones de tensión y frecuencia tomando en consideración criterios de optimalidad y usando el conocimiento de la dinámica de la planta, en cada decisión de control.

- “Control Digital de la Excitación de un Generador Síncrono”, presentado por: Nizama, J. El 2013, para postular al título de Ingeniero Mecánico – Eléctrico, de la universidad de Piura.

**Conclusión:** Desarrollo una estrategia de control de tensión basado en un microcontrolador de 8 bits actualizado y de poco presupuesto, logrando un óptimo desempeño de la regulación de voltaje, siendo la más exacta para la ejecución del control.

## **2.2. Introducción.**

La energía eléctrica no se puede almacenar ni en grandes cantidades ni de forma económica, por lo que la que se utiliza debe producirse de forma continua. La potencia requerida varía de un día a otro y a lo largo del día, por lo que la generación también debe seguir y mantener una frecuencia de 60 Hz, tensión de 220 V y otras condiciones del sistema eléctrico, todo ello con el objetivo económico de reducir los costes de producción.

Para conseguirlo, el control y gestión de los sistemas de generación instalados en las centrales tiene como principal objetivo ajustar la fiabilidad de la producción en función de la potencia necesaria en cada momento, la continuidad del suministro y los parámetros de funcionamiento de las mismas, el sistema por dentro los límites está fijados por la norma de calidad de servicio (NTCSE). Esto se realiza de forma automática en los generadores y puntos de control con regulación automática de tensión (AVR, "regulador automático de tensión") y, sobre todo, control automático de producción (AGC, "control automático de producción").

### 2.3. Requerimientos de calidad del servicio eléctrico.

#### 2.3.1. La calidad del suministro eléctrico.

Todo esto puede ser apreciado por el cliente que quiere un buen servicio a un precio bajo. La calidad del servicio está determinada por los siguientes tres factores:

##### A. Continuidad de suministro.

La duración de la media y baja tensión se mide mediante dos parámetros: SAIDI y SAIFI, que se miden como el tiempo de inactividad correspondiente según la alta tensión instalada y la cantidad de interrupción correspondiente, respectivamente, los cuales podemos observar en el **cuadro 2.1**. Estos parámetros se pueden calcular por cliente o para un área geográfica específica. Según el Osinergmin, esta tolerancia es la siguiente:

**Cuadro 2.1** Valores límites de calidad de suministro por sector típico.

Sector	SAIDI	SAIFI
Típico 2	13horas/semestre	8/semestre

*Fuente: NTCSE.*

Las mismas que se calculan como:

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) = Índice de frecuencia media de interrupción al sistema.(NTCSE,1997)

$$\mathbf{SAIDI} = \frac{\sum U_i N_i}{N_T} \quad (2.1)$$

- SAIDI (System Average Interruption Duration Index) = Índice de duración media de interrupción al sistema. (NTCSE,1997)

$$\mathbf{SAIFI} = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (2.2)$$

Donde :

$N_i$  : Es el número de clientes afectados.

$U_i$  : El tiempo de interrupción anual por cliente

$N_T$  : Número total de clientes atendidos

En el análisis de estos dos parámetros se debe tener en consideración las interrupciones del flujo eléctrico de más de tres minutos de duración en el sistema de alta tensión, esto incluye tanto los cortes causados por trabajos programados, que se califican como “programadas”, así como por hechos en las instalaciones de producción, transporte y distribución a las que se les llama “imprevistas”.

## **B. Límites de variación de la tensión y de la frecuencia.**

La energía suministrada a los receptores del usuario provoca un flujo de electricidad en función de la demanda que provoca una caída de tensión a medida que se desplaza por los conductores de la red. La cantidad de tensión suministrada al cliente en cada momento es función de la caída de tensión acumulada en todos los elementos de la red suministrados por el cliente, tanto determinada individualmente según la necesidad como bajo demanda. de otros clientes. El suministro eléctrico varía ya que los requerimientos de cada cliente son diferentes, y también existe una variación en la carga total debido a la similitud entre las necesidades de los diferentes clientes. (Osinergmin, 2012)

Por otro lado, para mantener la frecuencia constante, es necesario tener una técnica de producción que siempre se pueda ajustar de acuerdo con la demanda actual de todos los clientes (Ley de Frecuencia Eléctrica). Las máquinas electrónicas pueden soportar fluctuaciones de voltaje (típicamente 10%), pero la frecuencia debe mantenerse dentro de un rango operativo estrecho para mantener la precisión de la gran cantidad de relojes y automatización conectados a la red, no solo el error de frecuencia de un cierto valor, sino el error que se acumula con el tiempo.

Norma técnica existente (NTCSE, 1997) que regula las actividades de transmisión, distribución, comercialización, distribución y homologación de instalaciones eléctricas para determinar la calidad de los productos eléctricos y normas que validan la diferencia de valor aceptable voltaje con respecto a la fuente de alimentación especificada y las diferencias de frecuencia máximas permitidas con respecto a la frecuencia nominal de 60 Hz. El cual podemos observar en el **cuadro 2.1**.

**Cuadro 2.2** Variaciones admisibles en la tensión y la frecuencia.

Tipo de suministro	Máxima variación admisible	
	para el valor eficaz de la tensión de suministro consumidores finales,	Máxima variación admisible para la frecuencia
En baja o en media tensión	7%	1%, durante el 99,5% del año +4%, -6%, permanentemente

Fuente: NTCSE.

Para mantener un cierto valor de voltaje y frecuencia, es necesario utilizar un control automático de voltaje y salida, que luego se regula.

### C. Calidad de onda.

Los cambios tecnológicos de los últimos años se caracterizan por el desarrollo de equipos industriales de alta capacidad y presión, tales como hornos de inducción, resistencia, infrarrojos y rectificadores de absorción y electrólisis. Por esta y otras razones, el estándar de calidad se aplica a los dispositivos y materiales que causan interferencias ya las personas que pueden verse afectadas por dichas interferencias. El objetivo principal de este manual es garantizar que los equipos o dispositivos puedan soportar cualquier interferencia o interferencia que pueda ocurrir durante el funcionamiento y que la interferencia causada por este dispositivo esté dentro de los límites especificados. en términos prácticos (NTCSE, 1997).

Las leyes nacionales también enfatizan que, en este caso, no en el dispositivo, sino en la instalación, los usuarios deben tomar precauciones para que los daños causados por su instalación no afecten a otros usuarios (por ejemplo, daños de tipo corriente armónica y flicker). (NTCSE, 1997).

Esta distorsión afecta la forma de onda de la fuente de alimentación y hace que otros consumidores conectados a la misma área reciban voltajes de frecuencia variable. Este último punto es particularmente importante para clientes industriales con equipos sensibles a distorsiones y altos requerimientos de potencia debido a la forma de onda del voltaje.

Los inconvenientes en la calidad se solucionan a través de un convenio entre proveedor y usuario, para marcar de una parte las distorsiones interpuestas dentro de la red y de otra, para asegurar una calidad de provisión conveniente. Visto de un punto técnico la salida es implementar localmente en menor tensión (así de esta manera, por ejemplo, a través de filtros o compensadores eficaces de armónicos). Así la eficacia de frecuencia de la tensión entregada, y la coincidencia electromagnética de los aparatos receptores, se convierte en algo primordial en la sociedad contemporánea. (Osinergmin, 2020)

## **2.4. El Generador síncrono.**

### **2.4.1. Consideraciones básicas.**

Un generador síncrono o alternador es un tipo de máquina eléctrica giratoria que puede (por rotación) convertir energía mecánica en energía eléctrica. (Zoppetti,2004)

Son responsables de producir la mayor parte de la energía eléctrica agotada de la red, y su respuesta dinámica determina la estabilidad del sistema posterior a una falla. Por lo tanto, para simular la respuesta dinámica de un sistema de potencia, es importante calibrar correctamente los generadores síncronos.

Cuando funciona como generador, puede convertir energía mecánica en energía eléctrica, y cuando se usa como motor, puede convertir energía eléctrica en energía mecánica.

Los Generadores síncronos trabajan mediante la regla de que en un circuito colocado en un campo magnético variable produzca una tensión eléctrica inducida cuya polaridad depende de la dirección del campo y su valor de la corriente que circula por él.

El motivo por el que se denomina generador síncrono es el equilibrio entre la corriente eléctrica y la frecuencia angular, es decir el generador gira a la velocidad del campo magnético, y este equilibrio de frecuencia se le llama sincronismo.

Este equipo trabaja alimentando el rotor o circuito de campo a través de estos alimentadores en corriente continua. Siempre que en el estator o circuito de armadura la corriente es alterna CA.

Cuando el generador síncrono se somete a carga, la tensión provocada experimenta transformaciones por lo que se precisa manejar dispositivos complementarios que avalen una inmejorable manipulación del mismo. (Zoppetti,2004)

### **2.4.2. Principio de funcionamiento.**

El funcionamiento de un generador síncrono se basa en la ley de Faraday. Para crear un voltaje inducido en el circuito de armadura (estator), debemos crear un campo magnético en el

rotor(inductor) o circuito de campo, esto lo lograremos alimentado el rotor con un sistema de corriente continua, este campo magnético inducirá una tensión en el devanado de armadura por lo que tendremos una corriente alterna fluyendo a través de él. (Happoldt, 1974)

Al operar como generador, la energía es suministrada a la máquina por la aplicación de un torque y por la rotación del eje de la misma, una fuente de energía mecánica puede ser, por ejemplo, una turbina hidráulica, a gas o a vapor. Una vez estando el generador conectado a la red eléctrica, su rotación es dictada por la frecuencia de la red, pues la frecuencia de la tensión trifásica depende directamente de la velocidad de la máquina.

Para que la máquina síncrona sea capaz de efectivamente convertir energía mecánica aplicada a su eje, es necesario que el enrollamiento de campo localizado en el rotor de la máquina sea alimentado por una fuente de tensión continua de forma que al girar el campo magnético generado por los polos del rotor tengan un movimiento relativo a los conductores de los enrollamientos del estator.

Debido a ese movimiento relativo entre el campo magnético de los polos del rotor, la intensidad del campo magnético que atraviesa los enrollamientos del estator irá a variar el tiempo, y así tendremos por la ley de Faraday una inducción de tensiones en las terminales de los enrollamientos del estator.

Debido a distribución y disposición espacial del conjunto de enrollamientos del estator, las tensiones inducidas en sus terminales serán alternas senoidales trifásicas.

La corriente eléctrica utilizada para alimentar el campo es denominada corriente de excitación. Cuando el generador está funcionando aisladamente de un sistema eléctrico (o sea, está en una isla de potencia), la excitación del campo irá a controlar la tensión eléctrica generada. Cuando el generador está conectado a un sistema eléctrico que posee diversos generadores interconectados, la excitación del campo irá a controlar la potencia reactiva generada. (Happoldt, 1974)

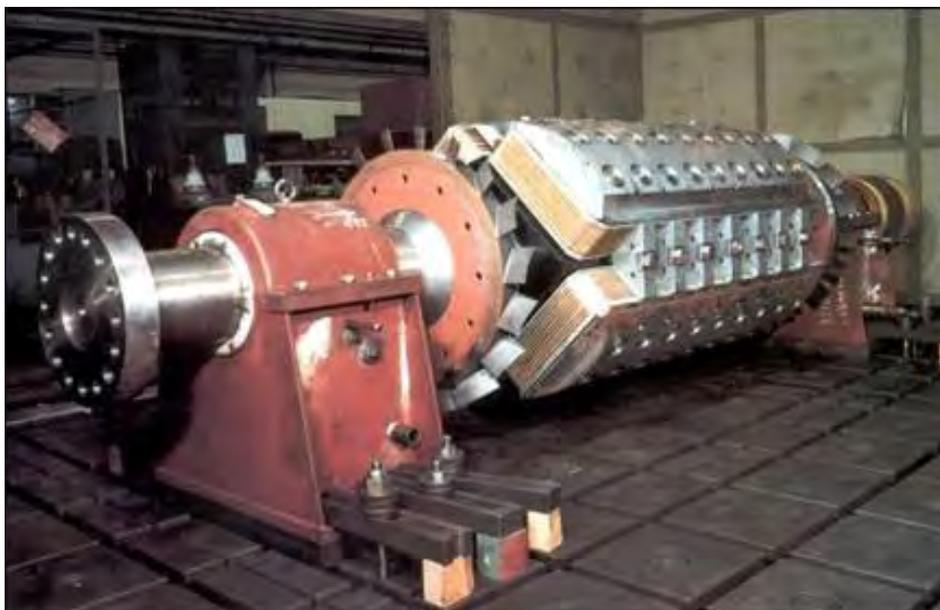
### 2.4.3. Aspectos físicos y constructivos.

De manera fundamental, el alternador está compuesto por las siguientes partes:

#### A. Rotor o campo del generador síncrono:

Es la parte de la máquina que realiza el movimiento rotatorio, constituido de un material envuelto llamado "arrollamiento de campo", que tiene como función producir un campo magnético constante así como en el caso del generador de corriente continua para interactuar con el campo producido por el enrollamiento del estator. Como se muestra en la **figura 2.1**.

La tensión aplicada en ese enrollamiento es continua y la intensidad de la corriente soportada por ese enrollamiento es mucho más pequeña que el enrollamiento del estator, además de eso el rotor puede contener dos o más arrollamientos, siempre en número par y todos conectados en serie siendo que cada enrollamiento será responsable por la producción de uno de los polos del electroimán. (Happoldt, 1974)



**Figura 2.1** Rotor del alternador.

*Fuente: Happoldt, 1974.*

## **B. Estator o armadura:**

Parte fija de la máquina, montada envuelta del rotor de forma que el mismo pueda girar en su interior, también constituido de un material ferromagnético envuelto en un conjunto de enrollamientos distribuidos al largo de su circunferencia. Los enrollamientos del estator son alimentados por un sistema de tensiones alternadas trifásicas.

Por el estator circula toda la energía eléctrica generada, siendo que tanto la tensión en cuanto a corriente eléctrica que circulan son bastante elevadas en relación al campo, que tiene como función sólo producir un campo magnético para "excitar" la máquina de forma que fuera posible la inducción de tensiones en las terminales de los enrollamientos del estator.

La máquina síncrona está compuesta básicamente de una parte activa fija que se conoce como inducido o ESTATOR y de una parte giratoria coaxial que se conoce como inductor o ROTOR. El espacio comprendido entre el rotor y el estator, es conocido como entrehierro.

Esta máquina tiene la particularidad de poder operar ya sea como generador o como motor. Como se muestra en la **figura 2.2**.

Su operación como alternador se realiza cuando se aplica un voltaje de c-c en el campo de excitación del rotor y a su vez éste es movido o desplazado por una fuente externa, que da lugar a tener un campo magnético giratorio que atraviesa o corta los conductores del estator, induciéndose con esto un voltaje entre terminales del generador. (Happoldt, 1974)



**Figura 2.2 Armadura del Alternador.**

*Fuente: Happoldt, 1974.*

### **C. Regulador de tensión (AVR).**

El regulador automático de voltaje, proporciona una excitación al rotor, el rotor debe tener un campo magnético constante en cuanto a la dirección de sus líneas magnéticas (no en cuanto a intensidad del campo) y este se logra excitándolo con corriente directa (alterna rectificadas) la corriente alterna generada por el generador, debe ser de una frecuencia constante 60hz; y para eso el rotor siempre gira a la misma velocidad independientemente de que carga esté produciendo (se mide en mega watts) no en voltaje, como los requerimientos de carga (consumo de la energía producida) son variables, la generación de potencia activa es variable a frecuencia y voltaje constante, si no tienes un regulador automático de voltaje (llamado AVR en inglés) esto no se puede lograr. (Prabha Kundur,1994)

### **D. Regulador de velocidad (ACG).**

No debemos confundir estos dispositivos con el regulador de tensión del alternador, ya que, si bien actúan en grupo, sus funciones como elementos de regulación que son, aunque estén relacionadas, pero completamente delimitadas

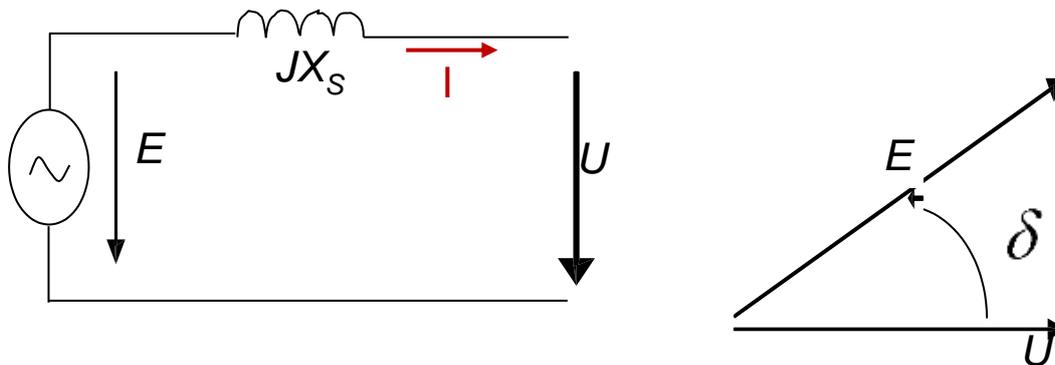
De lo dicho hasta ahora, podemos manifestar que todos los reguladores de velocidad son mecanismos de diferente tipo, diseñados para lograr en todos los casos un equilibrio entre el motor y el arrastre de la turbina y para mantener la velocidad de la turbina, esencialmente constante, la velocidad de sincronización del grupo antes de cualquier carga solicitada, dándole protección adicional contra el exceso de velocidad que pueda ocurrir.

Supongamos como dato significativo diremos que si contáramos con un motor Diesel que no se viese afectado por ningún controlador de velocidad, ocurriría que se rompería en pedazos tan pronto como la carga se retiraría repentinamente.

Existe un gran número de reguladores automáticos de diferentes marcas y tipos instalados en centrales hidroeléctricas por reconocidas organizaciones constructoras especializadas en su producción e instalación. (Prabha Kundur,1994)

#### 2.4.4. Circuito equivalente.

El esquema eléctrico básico equivalente de un generador síncrono, despreciando la resistencia del devanado del estator, como se muestra en la **figura 2.3**, es el siguiente:



**Figura 2.3** Circuito equivalente del generador síncrono.

*Fuente: Happoldt, 1974.*

Donde :

$E$  : Tensión en vacío de la máquina o fuerza electromotriz interna.

$U$  : Tensión en bornes de la máquina.

$X_s$  : Reactancia síncrona del generador.

$I$  : Intensidad suministrada por el generador.

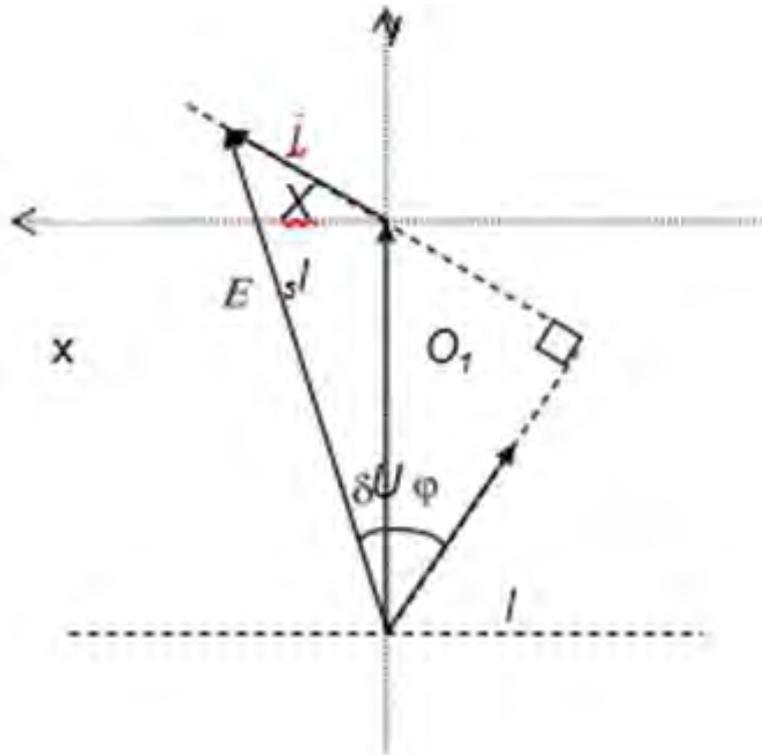
$\delta$  : ángulo entre  $E$  y  $U$ , tomando como origen el vector  $U$ .

#### **2.4.5. El generador síncrono conectado a una red de potencia infinita.**

Cualquier red eléctrica se puede representar mediante su equivalente Thévenin como un generador de tensión ideal que representa la tensión de la red a circuito abierto, en serie con una impedancia. A medida que aumenta la potencia de cortocircuito de la red, el valor de esta impedancia disminuye, de forma que para una potencia infinita la impedancia serie sería nula.

Una red de potencia infinita representa un conjunto muy amplio de generadores trabajando en paralelo en una red eléctrica, de forma que el sistema es capaz de mantener la tensión,  $U$ , y la frecuencia,  $f$ , constantes ante cualquier tipo de incidencia, como por ejemplo en caso de conexión o desconexión de alguno de los generadores de la red o la variación de la carga. La tensión y frecuencia también permanecen constantes si se cambia la excitación de alguno de los generadores de la red.

En la **figura 2.4** se representa el diagrama vectorial de una máquina síncrona de rotor cilíndrico trabajando como generador y conectada a una red de potencia infinita de tensión,  $U$ .  
(Zoppetti, 2004)



**Figura 2.4** Máquina síncrona de rotor cilíndrico conectada a una red de potencia infinita funcionando como generador (sobree excitado).

*Fuente: Zopetti, 2004*

Teniendo en cuenta el esquema equivalente del generador según la figura 2.3, la potencia activa cedida por un generador trifásico a la red, considerando que la tensión  $U$  es la tensión de fase o simple, será:

$$P = UI \cos \varphi \quad (2.3)$$

De la figura anterior y por trigonometría se tiene:

$$IX_s \cos \varphi = E \sin \delta \quad (2.4)$$

En consecuencia:

$$P = \frac{UE}{X_s} \sin \delta \quad (2.5)$$

Si la fuerza electromotriz interna de la máquina,  $E$ , está adelantada respecto de la tensión de la red de potencia infinita,  $U$ , la máquina trabaja como generador cediendo potencia activa a la red, y si está en retraso como motor absorbiendo potencia activa de la red, ya que la potencia activa cedida sería negativa. De forma similar se demuestra que la potencia reactiva cedida por la máquina a la red sigue la expresión:

$$Q = UI \operatorname{sen} \varphi \quad (2.6)$$

por trigonometría básica según la figura 2.3 se deduce que:

$$IX_s \operatorname{sen} \varphi = E \cos \delta - U \quad (2.7)$$

Por lo tanto, sustituyendo esta equivalencia en la expresión anterior de la potencia reactiva se tiene que:

$$Q = \frac{EU}{X_s} \cos \delta - \frac{U^2}{X_s} \quad (2.8)$$

Se deduce de aquí que las corrientes son:

**A. corriente activa.**

$$I_{\text{act}} = \frac{E \operatorname{sen} \delta}{X_s} \quad (2.9)$$

**B. y la corriente reactiva.**

$$I_{\text{react}} = \frac{E \cos \delta}{X_s} - \frac{U}{X_s} \quad (2.10)$$

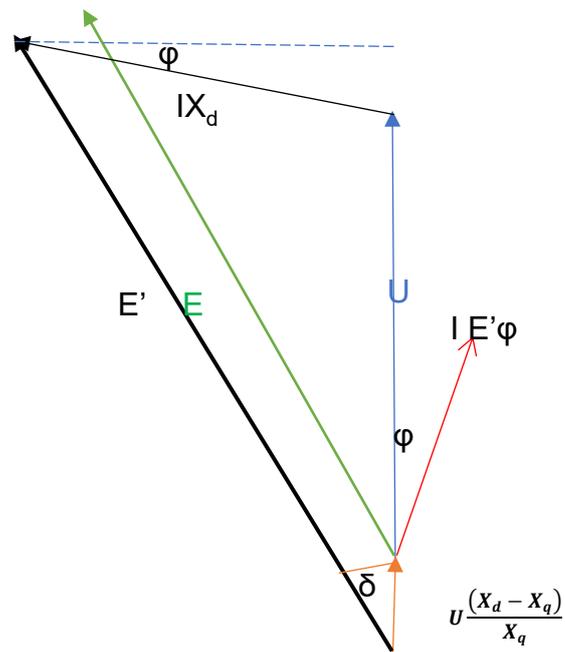
Es así que, si el generador que está conectado a una red de potencia infinita está cediendo una potencia activa, la variación de su intensidad excitación y por tanto del valor de  $E$  no modifica

el valor de esta potencia activa, sino sólo de la reactiva, y también modifica el valor de la intensidad entregada  $I$ , que se adelanta respecto de la tensión,  $U$ . (Happoldt, 1974)

Lo anterior se entiende fácilmente ya que la potencia activa suministrada por el generador depende fundamentalmente de la potencia entregada por la turbina que mueve al alternador, y no de la corriente de excitación. En concreto para cada valor de intensidad de excitación y por tanto de valor de  $E$ , el ángulo de par o de avance del vector  $E$ , respecto del vector  $U$  es tanto mayor cuanto mayor es la potencia eléctrica entregada a la red. Como esta potencia procede de la turbina que mueve al alternador un aumento del par motor entregado por la turbina implica un mayor avance de la rueda polar del alternador respecto del campo magnético giratorio creado por las corrientes del estator.

Si como consecuencia de una avería en la turbina ésta dejara de suministrar un par motor, la máquina no se para, ya que la tensión,  $U$  en su punto de conexión permanece constante, y además sigue excitada y por lo tanto se mantiene el valor de  $E$ . El efecto es que la máquina pasaría a funcionar como motor moviendo la turbina que haría de par resistente. De la misma manera se desarrolla el diagrama fasorial del generador de polos salientes por cuanto en nuestro medio casi la totalidad de los alternadores utilizados en las centrales especialmente en la hidroeléctricas son de este tipo. (Happoldt, 1974)

En la **figura 2.5** se representa el diagrama vectorial de una máquina síncrona de polos salientes trabajando como generador y conectada a una red de potencia infinita de tensión,  $U$ . (Zoppetti, 2004)



**Figura 2.5** Máquina síncrona de polos salientes conectada a una red de potencia infinita funcionando como generador (sobree excitado).

*Fuente: Zopetti, 2004*

Del esquema mostrado se deduce que:

$$\mathbf{P} = \mathbf{U} \mathbf{I} \cos \varphi \quad (2.11)$$

De la figura anterior y por trigonometría se tiene:

$$\mathbf{I} \mathbf{X}_d \cos \varphi = \mathbf{E}' \operatorname{sen} \delta \quad (2.12)$$

En consecuencia:

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{U} \mathbf{E}'}{\mathbf{X}_d} \operatorname{sen} \delta \quad (2.13)$$

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \frac{\mathbf{U} (\mathbf{X}_d - \mathbf{X}_q)}{2 \mathbf{X}_d \mathbf{X}_q} \cos \delta \quad (2.14)$$

de donde:

$$P = \frac{UE}{X_d} \text{sen}\delta + \frac{U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \text{sen}2\delta \quad (2.15)$$

se deduce de aquí que las corrientes son:

**A. corriente activa.**

$$I_{\text{act}} = \frac{E}{X_d} \text{sen}\delta + \frac{U (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \text{sen}2\delta \quad (2.16)$$

**B. y la corriente reactiva.**

$$I_{\text{react}} = \frac{E}{X_d} \text{cos}\delta - \frac{U}{X_d} + \frac{U (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} (\text{cos}2\delta - 1) \quad (2.17)$$

En la ecuación de la potencia activa se observa un segundo término que lo hace diferente al de la máquina de rotor cilíndrico a este se le denomina **potencia de reacción**, que es la potencia que la máquina puede entregar aún sin excitación tomando un valor máximo para un ángulo de par de  $\delta=45^\circ$ . (Happoldt, 1974)

**En conclusión:**

Una máquina síncrona conectada a una red de potencia infinita puede funcionar como generador cediendo potencia activa a la red o como motor absorbiendo potencia activa de la red, según que el par mecánico aplicado en su eje sea motor (el de una turbina) o resistente (el de una carga). Tanto funcionando como generador o como motor puede suministrar o absorber potencia reactiva de la red, según sea su excitación.

El valor máximo de la potencia activa que puede entregar la máquina se obtiene para un ángulo de par,  $\delta$ , de  $90^\circ$  (límite de estabilidad estática). La magnitud de esta potencia máxima depende también del valor de E.

Manteniendo constante la excitación, a medida que el ángulo de par crece, la máquina pasa de generar reactiva a absorber reactiva, o lo que es equivalente de estar sobreexcitada a estar subexcitada.

En particular si el ángulo de par es de  $90^\circ$ , la potencia reactiva absorbida por la máquina es la máxima posible, lo que significa que la red suministra energía reactiva a la máquina, que se encuentra subexcitada.

El ángulo de par para el cual la potencia reactiva es nula varía en función del valor de  $E$ .

#### **2.4.6. Límites de operación de la máquina.**

El incremento de potencias nominales de estas máquinas está condicionado a la aplicación de las técnicas de refrigeración necesarias que compatibilicen el aumento de tamaño con unos calentamientos admisibles de los devanados inductor e inducido dentro de los límites de diseño. Por otra parte, las turbinas que mueven a estos generadores no soportan muy bien las sobrecargas mantenidas, por consiguiente, otro límite de funcionamiento lo constituye la potencia nominal de la máquina motriz.

Las máquinas síncronas tienen sus circuitos reguladores de la excitación con objeto de adaptar el nivel de excitación a las variaciones de tensión en bornes, debidas a su vez a las variaciones de la carga. Adicionalmente se instalan protecciones que limitan la mínima corriente de excitación, de forma que, ante una pérdida o disminución de la excitación, y por tanto del valor de  $E$ , pero manteniéndose constante la potencia activa motriz que mueve el generador, el ángulo de par no aumente hasta alcanzarse el límite estático o dinámico de estabilidad de la máquina.

Por lo tanto, y resumiendo los límites de funcionamiento del generador síncrono se pueden resumir como:

- Límite de intensidad máxima en los devanados del estátor y del rotor.
- Límite de potencia de la turbina o en general de la máquina motriz.

- Valor mínimo admisible de la excitación o intensidad en el rotor.
- Ángulo de par por debajo del límite de estabilidad estático y dinámico.

Para garantizar que el generador trabaje dentro de estos límites se instalan los correspondientes relés de protección.

## **2.5. Excitación del generador.**

Es necesario distinguir entre el control automático de la tensión que constituye un sistema de regulación sencillo, del control automático de la generación que resulta más complicado y que requiere de varios bucles de control.

Los recursos de control pueden ser de tipo discreto, como la conexión o desconexión de reactancias o condensadores, transformadores con tomas, o continuos como en el caso de la regulación de un generador. Todo lo que sigue se refiere a la regulación mediante el generador síncrono.

Los mecanismos de regulación de la tensión y de la generación se pueden considerar con bastante aproximación como desacoplados, siendo mucho más rápida la regulación de la tensión.

Los valores de la tensión en los nodos de un sistema eléctrico están relacionados con los flujos de potencia reactiva en las líneas del sistema. Esta relación tiene un carácter marcadamente local ya que la relación entre el flujo de reactiva y las tensiones en los extremos de la línea considerada es muy fuerte, pero se debilita rápidamente a medida que se consideran nudos más alejados. (interacción Q-U).

El control automático de la tensión (AVR) tiene por objetivo mantener la tensión en bornes del generador, mediante el control de la fuerza electromotriz interna del generador. Para ello se actúa sobre la corriente de excitación del generador. La respuesta de estos elementos de control es bastante rápida, del orden de los segundos. (Prabha Kundur,1994)

El regulador automático de tensión (AVR) mide la magnitud de la tensión en bornes del generador, valor que es rectificado y filtrado hasta obtener una señal de corriente continua proporcional al valor eficaz original. Esta señal de continua  $V$  se compara con un valor de referencia,  $V_{ref}$ , siendo la diferencia entre ambas el error de tensión,  $e$ , que después de su amplificación se utiliza como tensión de alimentación de la excitatriz principal del generador y que finalmente se convierte en la tensión de excitación del generador.

El objetivo del control, además de mantener el valor de la frecuencia en su valor nominal de 60 Hz y la tensión en 220 V, debe de cumplir dos requisitos adicionales:

Se deben mantener los valores acordados o contratados de intercambios de potencia con otras partes del sistema a través de las líneas de interconexión entre áreas. (Zopetti, 2004)

Las potencias activas generadas deben ser los valores resultantes según el despacho económico.

El sistema de regulación está formado por tres lazos de control: los dos primeros están, junto al AVR en el propio generador, mientras que el tercero corresponde al centro de control del área de control (que puede ser un conjunto de centrales o, generalmente, una empresa eléctrica). (Prabha Kundur, 1994)

## CAPÍTULO III

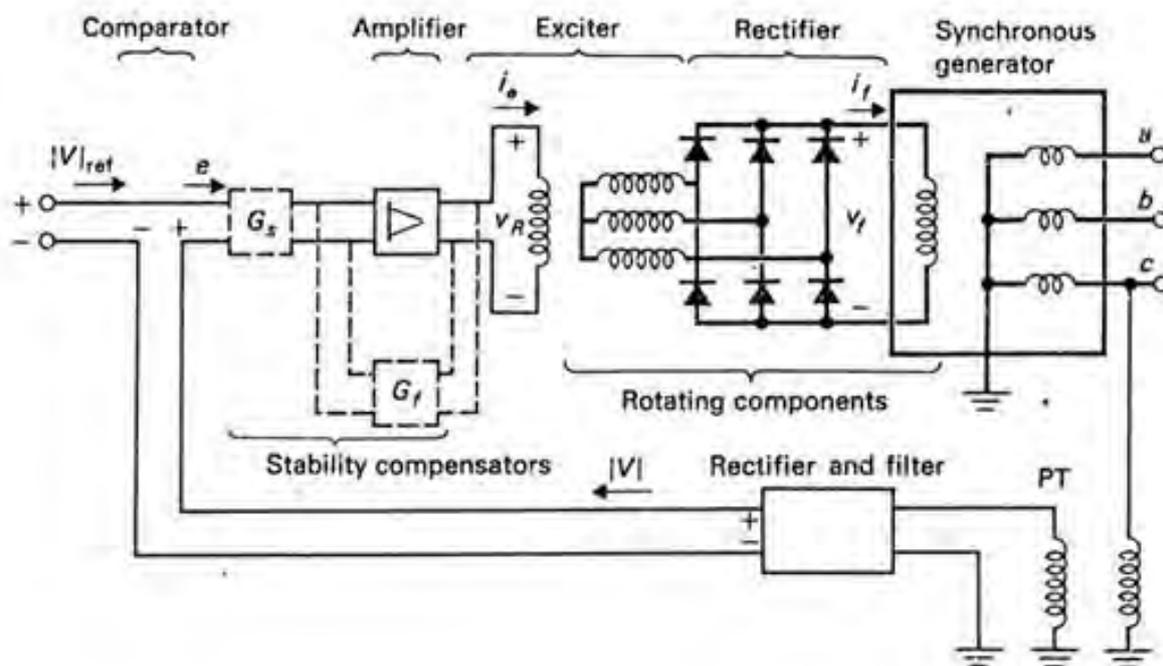
### 3. MODELAMIENTO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA TENSION (AVR).

#### 3.1. Introducción.

El control automático de la tensión tiene por objeto mantener la tensión de salida del generador,  $V$ , dentro de unos pequeños límites de variación respecto de un valor de referencia o nominal prefijado, aun cuando la carga conectada al generador varíe según las necesidades de consumo en cada momento. Dicho de otra manera, el control de tensión del generador permite mantener constante una consigna de tensión en los distintos nudos del sistema eléctrico.

Las medidas para controlar la tensión en los nudos del sistema son de carácter local sin necesidad de tener que considerar el sistema en su conjunto (conexión o desconexión de baterías de condensadores o reactancias, utilización de un compensador síncrono o la regulación de la tensión de otros generadores). A continuación, se describe el control de la tensión mediante la regulación del generador síncrono, también denominado control secundario o AVR, con un tiempo de actuación de segundos.

La excitatriz es el principal elemento del AVR. La excitatriz proporciona la corriente continua necesaria para generar el campo magnético del generador. En la **Figura 3.1** se representa el esquema típico de una regulación de tensión AVR, que utiliza una excitatriz moderna compuesta de un generador síncrono asociado a un rectificador trifásico giratorio. Este generador que gira solidario al eje de la turbina tiene en el estator una bobina alimentada en corriente continua y en el rotor los tres devanados independientes que generan un sistema trifásico de tensiones que se rectifica mediante el puente de diodos. La salida de corriente continua del puente de diodos alimenta a la bobina de excitación del generador síncrono principal ubicada en el rotor. Mediante este diseño se elimina la necesidad de las escobillas y de los anillos rozantes. (Elgerd, 1970)



**Figura 3.1** Sistema de regulación AVR sin escobillas.

*Fuente: Elgerd, 1970.*

A continuación, se procede a modelar la función de transferencia de los principales elementos del bucle de regulación: amplificador, excitatriz y el propio generador síncrono, con objeto de poder definir la función de transferencia de todo el sistema o bucle de regulación. En el bucle de regulación existen unos elementos fundamentales, marcado a trazos en la figura 3.1, cuyas funciones de transferencia se estudiarán en último lugar (funciones  $G_s$  y  $G_f$  según la figura 3.1) y que sirven para estabilizar todo el bucle de control.

Para definir las funciones de transferencia de estos elementos se utilizará la transformada de Laplace, que efectúa un cambio de variable, pasando de la variable tiempo,  $t$ , a la variable compleja de Laplace,  $s$ , ( $s = \sigma + j\omega$ ). Mediante este cambio de variable las ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo se transforman en ecuaciones algebraicas que admiten una solución en la variable  $s$ . Una vez obtenida la solución en el dominio de la variable “ $s$ ”, se puede pasar de nuevo al dominio del tiempo mediante la transformada inversa de Laplace.

$$\mathbf{F}(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (3.1)$$

Una propiedad muy útil de la transformada de Laplace es la conocida con el nombre del teorema del valor final. Según este teorema el valor de  $f(t)$  para un tiempo infinito, es decir, en régimen estacionario, se puede obtener en el dominio de la transformada de Laplace, multiplicando la función de transferencia por  $s$ , y calculando su límite cuando “ $s$ ” tiende a cero.

### 3.2. Comparador y amplificador.

La alta tensión simple de salida,  $V$ , de una de las fases del generador síncrono se transforma en baja tensión mediante un transformador de medida de tensión unipolar que por ejemplo se conecta según la figura 3.1 entre la fase  $c$  y tierra. La salida de este transformador se rectifica y filtra, para obtener una tensión continua proporcional que se representará como  $|V|$ . Cuando la tensión  $|V|$  no es igual a la tensión de referencia o de consigna prefijada,  $V_{ref}$ , se obtiene un error de tensión,  $e$ , a la salida del comparador. (*Elgerd, 1970*).

$$e = |V|_{ref} - |V| \quad (3.2)$$

Como los cambios de tensión son pequeños respecto de los valores de referencia o normales de funcionamiento, la expresión anterior se puede escribir también con incrementos.

$$\Delta e = |\Delta V|_{ref} - |\Delta V| \quad (3.3)$$

Si la tensión de referencia permanece constante el error de tensión será:  $\Delta e = -\Delta|V|$

El error de tensión se convierte en una tensión mayor  $V_R$  mediante un amplificador de ganancia  $K_a$ . La tensión  $V_R$  alimenta el devanado de excitación de la excitatriz.

$$\Delta V_R = k_a \Delta e \quad (3.4)$$

Esta expresión se puede escribir en el dominio de la variable  $s$ , como:

$$\Delta V_R(s) = k_a \Delta e(s) \quad (3.5)$$

La función de transferencia del amplificador se puede definir como:

$$G_a(s) = \frac{\Delta V_R(s)}{\Delta e(s)} = k_a \quad (3.6)$$

Sin, embargo en la realidad este amplificador no es de funcionamiento instantáneo, sino que tiene un tiempo de retardo en su respuesta, lo cual se modela mediante una constante de tiempo,  $T_a$ , cuyo valor típico varía entre **0,02 y 1.0 s**. Esto quiere decir que la salida del amplificador ante una entrada de tipo escalón llega al nivel de respuesta en régimen permanente, pero tras haber transcurrido el tiempo necesario (se alcanza el 98 % del valor final de la respuesta para  $t = 3 T_a$ ).

Para considerar este tiempo de retardo es necesario completar la función de transferencia del amplificador, teniendo en cuenta la constante de tiempo,  $T_a$ .

$$G_a(s) = \frac{\Delta V_R(s)}{\Delta e(s)} = \frac{k_a}{1 + sT_a} \quad (3.7)$$

### 3.3. Excitatriz.

La bobina del estator de la excitatriz está alimentada a la salida del amplificador con la tensión continua,  $V_R$ . Esta bobina tiene una resistencia,  $R_e$ , y una inductancia,  $L_e$ . Por tanto, la ecuación que relaciona en el dominio del tiempo la variación de la tensión de excitación,  $V_R$ , con la variación de la intensidad de excitación, (*Elgerd, 1970*). será la siguiente:

$$\Delta V_R = R_e \Delta I_e + L_e \frac{d\Delta I_e}{dt} \quad (3.8)$$

Por otra parte, los tres devanados del rotor de la excitatriz se encuentran acoplados a un puente rectificador trifásico de diodos que permite obtener una tensión continua de salida,  $V_f$ ,

Como la excitatriz es un generador síncrono para el que existe una relación directamente proporcional entre su fuerza electromotriz interna y su intensidad de excitación:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} [M(2\pi f)I_f] \quad (3.9)$$

existirá también una relación proporcional entre la tensión rectificadora  $V_f$ , obtenida de las tres tensiones de salida de la excitatriz y la intensidad de excitación  $I_e$ , con una constante que se denominará  $K_1$ . Esta proporcionalidad se mantendrá también para incrementos pequeños de la tensión y de la intensidad.

$$\Delta V_f = k_1 \Delta I_e \quad (3.10)$$

Finalmente, la tensión  $V_f$  será la excitación aplicada al rotor del generador principal.

En el dominio de la transformada de Laplace las dos expresiones anteriores se transforman en las siguientes:

$$\Delta V_R(s) = R_e \Delta I_e(s) + L_e s \Delta I_e(s) \quad (3.11)$$

$$\Delta V_f(s) = k_1 \Delta I_e(s) \quad (3.12)$$

De la combinación de las dos expresiones anteriores se obtiene la función de transferencia para el conjunto excitatriz y rectificador con puente de diodos.

$$\frac{\Delta V_f(s)}{\Delta V_R(s)} = \frac{k_1 \Delta I_e(s)}{R_e \Delta I_e(s) + L_e s \Delta I_e(s)} = \frac{k_1}{R_e + sL_e} \quad (3.13)$$

de donde:

$$\frac{\Delta V_f(s)}{\Delta V_R(s)} = \frac{\frac{k_1}{R_e}}{1 + s \frac{L_e}{R_e}} \quad (3.14)$$

$$\frac{\Delta V_f(s)}{\Delta V_R(s)} = \frac{k_e}{1 + s T_e} \quad (3.15)$$

Siendo:

$$k_e = \frac{k_1}{R_e}, \quad y \quad T_e = \frac{L_e}{R_e} \quad (3.16)$$

El valor de la constante de tiempo,  $T_e$ , varía típicamente ente **0,5 y 1 s**.

### 3.4. Generador síncrono.

Para construir el modelo del generador, se sigue el mismo razonamiento que para la excitatriz, ya que la bobina del rotor que es el devanado de excitación del generador tendrá su resistencia,  $R_f$ , y su inductancia,  $L_f$ . Se podrá escribir por tanto la ecuación diferencial en el dominio del tiempo para relacionar las variaciones entre la tensión del devanado de excitación,  $\Delta V_f$ , y la intensidad de excitación resultante,  $\Delta I_f$ . (*Elgerd, 1970*).

$$\Delta V_f = R_f \Delta I_f + L_f \frac{d\Delta I_f}{dt} \quad (3.17)$$

La fuerza electromotriz interna del generador síncrono,  $E$ , es directamente proporcional la intensidad de excitación en el devanado del rotor,  $I_f$ , según la expresión:

$$E = \frac{(2\pi f) M I_f}{\sqrt{2}} \quad (3.18)$$

Siendo  $M$ , la inductancia mutua entre el devanado de excitación del rotor y el del estátor.

Aunque en función de la carga del generador existe una diferencia entre su fuerza electromotriz interna,  $E$ , y su tensión de salida,  $V$ ; en condiciones normales de funcionamiento ambas tensiones se pueden considerar aproximadamente iguales. La expresión anterior se puede escribir por tanto sustituyendo  $E$  por  $V$ , y utilizando incrementos.

$$\Delta V = \frac{\omega M \Delta I_f}{\sqrt{2}} \quad (3.19)$$

Combinando se llega la siguiente expresión:

$$\Delta V_f = \frac{\sqrt{2}}{\omega M} (R_f \Delta V + L_f \frac{d\Delta V}{dt}) \quad (3.20)$$

Esta expresión se puede transformar al dominio de la transformada de Laplace:

$$\Delta V_f(s) = \frac{\sqrt{2}}{\omega M} (R_f \Delta V(s) + L_f s \Delta V(s)) \quad (3.21)$$

A partir de la ecuación anterior se deduce la función de transferencia del generador en el dominio de Laplace.

$$\frac{\Delta V(s)}{\Delta V_f(s)} = \frac{1}{\frac{\sqrt{2}}{\omega M} (R_f + L_f s)} \quad (3.22)$$

$$\frac{\Delta V(s)}{\Delta V_f(s)} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\omega M R_f}}{1 + s \frac{L_f}{R_f}} \quad (3.23)$$

$$\frac{\Delta V(s)}{\Delta V_f(s)} = \frac{k_g}{1 + s T_g} \quad (3.24)$$

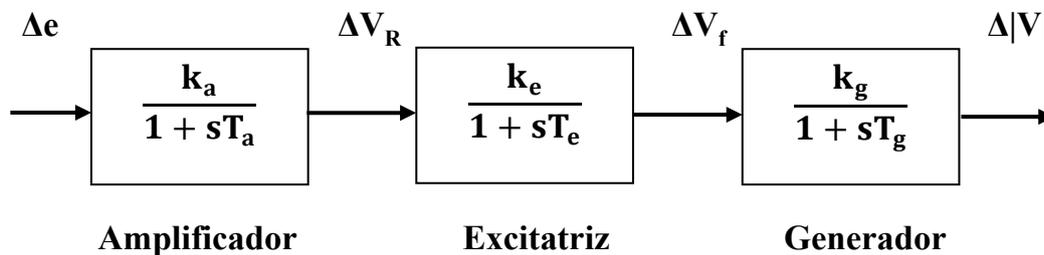
Donde:

$$\mathbf{k}_g = \frac{\omega M}{\sqrt{2}R_f}, \quad \text{y} \quad T_g = \frac{L_f}{R_f} \quad (3.25)$$

El valor de la constante de tiempo,  $T_g$ , varía típicamente ente **5 y 10 s**.

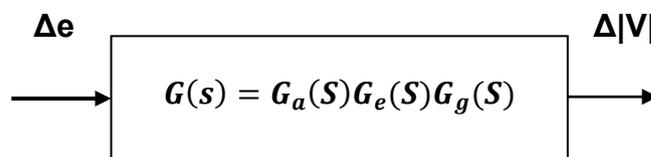
### 3.5. Función de transferencia en bucle abierto.

Combinando las funciones de transferencia del amplificador, de la excitatriz y del generador síncrono se obtiene la función de transferencia global en bucle abierto, tal y como se representa en la **figura 3.2** y **figura 3.3** respectivamente.



**Figura 3.2** Función de transferencia de lazo abierto

*Fuente: Elgerd, 1970.*



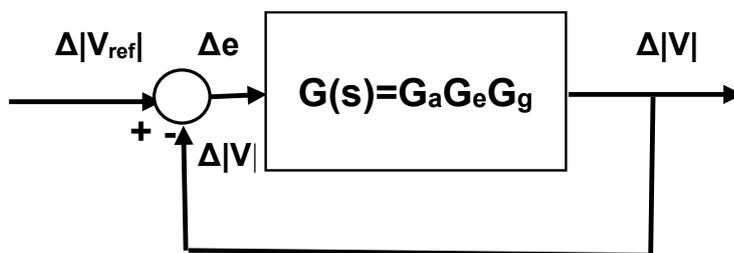
**Figura 3.3** Función de transferencia en bucle abierto representando en forma global

*Fuente: Elgerd, 1970.*

La ganancia en bucle abierto se denomina  $G(s)$  y se obtiene como producto de las ganancias individuales de los tres elementos que constituyen el bucle de regulación. El sistema de regulación requiere no obstante de un bucle cerrado ya que la señal del error de tensión,  $e$ , se obtiene a partir de la tensión de salida del generador síncrono. (*Elgerd, 1970*).

### 3.6. Función de transferencia en bucle cerrado.

La función de transferencia en bucle cerrado se representa en la **figura 3.4**.



**Figura 3.4** Función de transferencia en bucle cerrado.

*Fuente: Elgerd, 1970.*

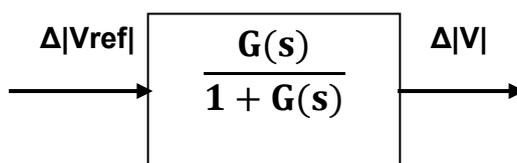
Si se tiene en cuenta que según la figura 3.4.

$$(\Delta V_{\text{ref}} - \Delta|V|)G(s) = \Delta|V| \quad (3.26)$$

Se puede obtener el modelo de la función de transferencia en bucle cerrado como:

$$\frac{\Delta|V|(s)}{\Delta V_{\text{ref}}(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (3.27)$$

Esta función de transferencia final se puede representar también mediante el diagrama de bloques siguiente, como se representa en la **figura 3.5**.



**Figura 3.5** Función de transferencia en bucle cerrado simplificada.

*Fuente: Elgerd, 1970.*

### 3.7. Respuesta del bucle de regulación AVR en régimen permanente.

La respuesta del bucle de regulación en régimen permanente tiene que garantizar una exactitud adecuada de la tensión de salida,  $V$ , cuando se varíe el valor de la tensión de

referencia,  $V_{ref}$ . Esto quiere decir que una vez pasado el período transitorio,  $V$ , debe ser igual a  $V_{ref}$ , con una discrepancia o error muy pequeño. Este error se expresa como un tanto por ciento de la tensión de referencia, con la notación,  $p$ . (Elgerd, 1970).

Partiendo de la figura 3.4 en régimen permanente se cumplirá que:

$$\Delta e_0 = \Delta V_{ref,0} - \Delta |V| \quad (3.28)$$

Para obtener la respuesta en régimen permanente de la función de transferencia global de la figura 3.5 ante un cambio de  $V_{ref}$  en forma de escalón, se aplica el teorema del valor final de la transformada de Laplace, haciendo  $s=0$ . Por tanto:

$$\Delta |V_0| = \frac{G(0)}{1 + G(0)} \Delta V_{ref,0} \quad (3.29)$$

Si se combinan las dos expresiones anteriores se obtiene la siguiente:

$$\Delta e_0 = \frac{1}{1 + G(0)} \Delta V_{ref,0} \quad (3.30)$$

Por lo tanto, se puede escribir también 3.30 en función de la constante,  $K$ .

$$\Delta e_0 = \frac{1}{1 + k} \Delta V_{ref,0} \quad (3.31)$$

La expresión anterior se puede interpretar de la siguiente forma: para obtener un error de tensión,  $\Delta e$ , menor que un porcentaje,  $p$ , de la tensión de referencia  $V_{ref}$ , se debe cumplir que:

$$\frac{1}{1 + k} < \frac{p}{100} \Rightarrow k > \frac{100}{p} - 1 \quad (3.32)$$

Por ejemplo, si se quiere un error,  $p$ , en régimen permanente menor del 0,5% se debe cumplir que  $K$  (ganancia del sistema de regulación en bucle abierto) sea mayor de 199.

### 3.8. Respuesta del bucle de regulación AVR en régimen transitorio.

La respuesta dinámica del regulador AVR está determinada por la función de transferencia en bucle cerrado de la figura 3.4. En concreto, esta respuesta dependerá de los valores de  $s$  que hacen cero el denominador de la función de transferencia. (*Elgerd, 1970*).

$$G(s) + 1 = 0 \quad (3.33)$$

Estos valores de  $s$  se denominan polos o raíces de la función de transferencia en bucle cerrado. Como  $G(s)$  es un polinomio de tercer orden, los polos que serán tres se ajustarán a una de las dos posibilidades siguientes:

#### A. Tres polos reales.

En este caso la tensión de salida,  $V$ , en el dominio del tiempo, tendrá componentes de la forma:  $A_1 e^{s_1 t}$ ,  $A_2 e^{s_2 t}$ ,  $A_3 e^{s_3 t}$ . Esto quiere decir que para obtener un control estable es necesario que estos términos exponenciales tiendan a cero para un tiempo infinito, y, por lo tanto, las tres raíces ( $s_1, s_2, s_3$ ) deben ser negativas.

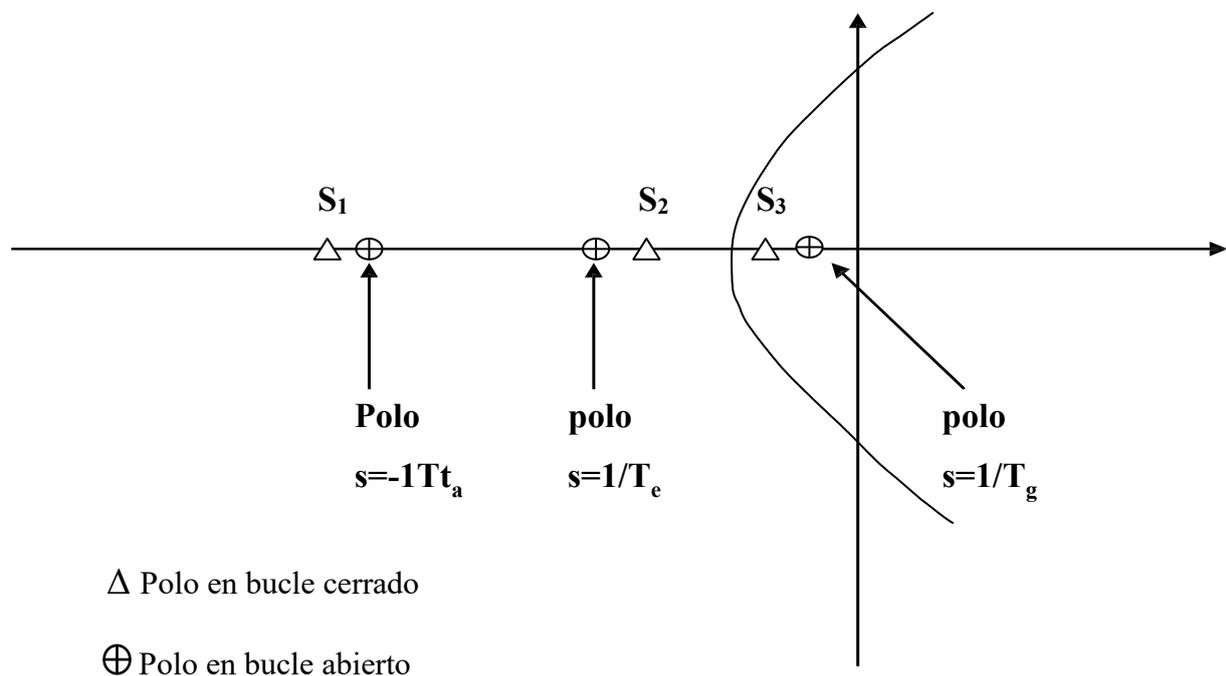
#### B. Un polo real y los otros dos complejos conjugados.

Supongamos que las raíces,  $s_2, s_3$  son complejas conjugadas ( $\sigma + j\omega$ ). En este caso la tensión de salida,  $V$ , en el dominio del tiempo, tendrá una componente oscilatoria de la forma:  $A_1 e^{\sigma t} \sin(\omega t + \beta)$ . Esto quiere decir que para obtener un control estable es necesario que el término exponencial tienda a cero para un tiempo infinito ( $\sigma$  debe ser negativa).

La posición en el plano de  $s$ , de los tres polos depende tanto de la ganancia,  $K$ , como de las constantes de tiempo:  $T_a, T_e, T_g$ , aunque sólo el valor de la ganancia  $K$  es ajustable. Para valores pequeños de  $K$  las tres raíces son reales y negativas. Sin embargo, a medida que  $K$  aumenta aparecen las dos raíces complejas conjugadas, lo cual quiere decir que la respuesta es oscilatoria y menos amortiguada.

Si se requieren valores todavía mayores de  $K$  se obtienen las dos raíces complejas con la parte real ( $\sigma$ ) positiva lo cual quiere decir que el control se hace inestable. En las siguientes Figuras se ilustra gráficamente el lugar geométrico de los polos para tres situaciones distintas en función del valor de la ganancia  $K$ .

**B.1.** Para valores pequeños de  $K$ , los tres polos son reales y están muy próximas a los polos en bucle abierto de la función de transferencia. Los polos en bucle abierto se obtienen para los valores de  $s = -1/T_a$ ;  $-1/T_e$ ;  $-1/T_g$  respectivamente. El término dominante es el correspondiente al polo con valor absoluto menor,  $s_2$  (de mayor constante de tiempo), lo cual implica una respuesta exponencial muy lenta. Por otra parte, el valor de  $K$  es tan pequeño que el error en la tensión de salida es inadmisibles en régimen permanente. cómo se representa en la **figura 3.6**.

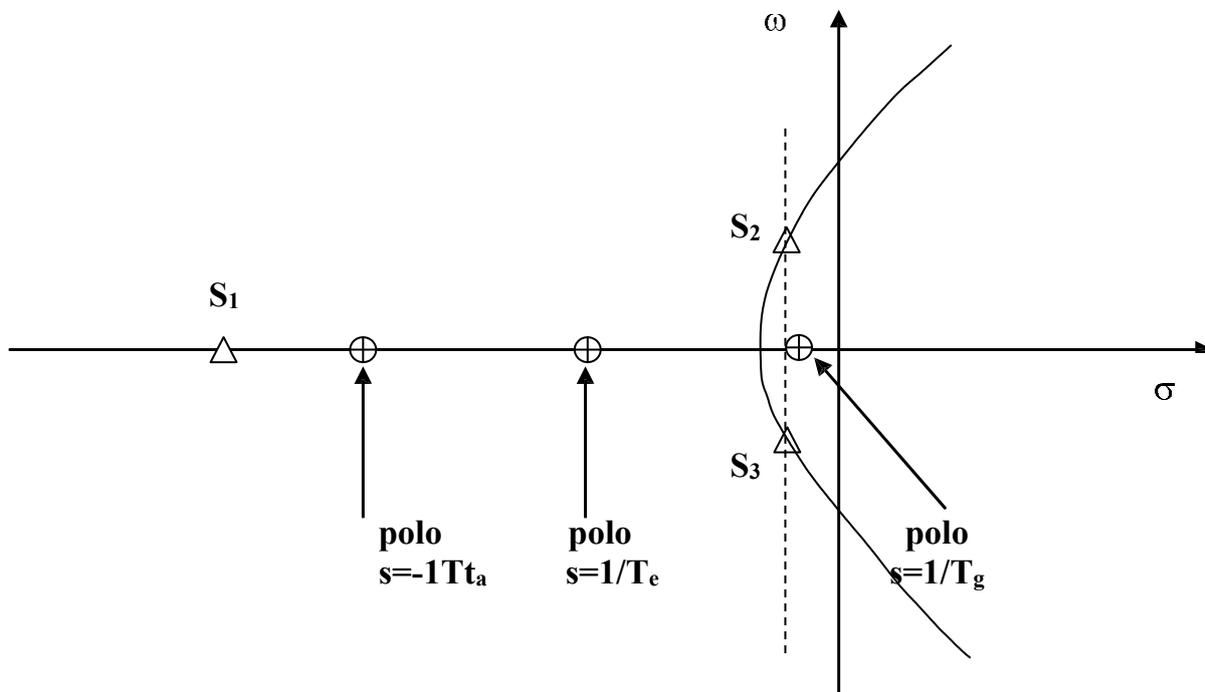


**Figura 3.6** Posición de los polos para valores de la ganancia  $K$  pequeños.

*Fuente: Elgerd, 1970.*

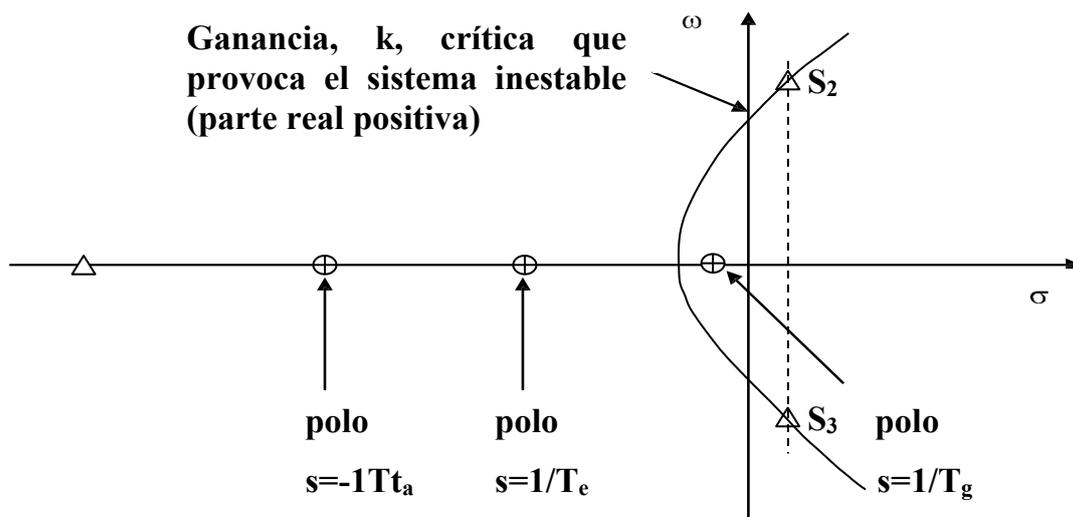
**B.2.** Para valores intermedios de  $K$ , el polo  $s_2$  se desplaza hacia la izquierda y el polo  $S_3$  hacia la derecha, de forma que, para un cierto valor de la ganancia,  $K$ , ambos valores coinciden,

y para valores mayores de  $K$  se obtienen las dos raíces complejas conjugadas. Esta pareja de polos hace la respuesta oscilatoria y poco amortiguada. como se representa en la **figura 3.7**.



**Figura 3.7** Posición de los polos para valores de la ganancia  $K$  intermedios.  
Fuente: Elgerd, 1970.

**B.3.** Para grandes valores de  $K$  la parte real de los polos conjugados se hace positiva y por lo tanto el sistema se vuelve inestable. como se representa en la **figura 3.8**.



**Figura 3.8** Posición de los polos para valores de la ganancia  $K$  elevados.  
Fuente: Elgerd, 1970.

Todo esto significa que con este diseño de bucle de regulación es imposible combinar una respuesta dinámica aceptable con un error admisible en régimen permanente, por lo que es necesario incluir un bucle de regulación adicional que consiga la estabilización de la respuesta en régimen dinámico.

### 3.9. Compensadores para estabilizar el régimen dinámico.

Uno de los sistemas de compensación más sencillos consiste en añadir al bucle de regulación un elemento en serie en adelanto de fase, cuya función de transferencia responde a la expresión:

$$\mathbf{G_c(s)} = \mathbf{1 + sT_c} \quad (3.34)$$

Por tanto, la función de transferencia  $G(s)$  pasará a tomar la siguiente forma, conteniendo un cero para  $s = -1/T_c$ .

$$\mathbf{G(s)} = \frac{\mathbf{k(1 + sT_c)}}{\mathbf{(1 + sT_a)(1 + sT_e)(1 + sT_g)}} \quad (3.35)$$

La constante de tiempo,  $T_c$ , se elige generalmente de forma que se compense con uno de los polos de  $G(s)$ , por ejemplo, haciendo  $T_c = T_e$ . Por lo tanto, la nueva función de transferencia en bucle abierto resulta:

$$\mathbf{G(s)} = \frac{\mathbf{k}}{\mathbf{(1 + sT_a)(1 + sT_g)}} \quad (3.36)$$

La red de estabilización o compensación añadida al bucle de regulación no afecta a la ganancia  $K$ , y por tanto no afecta a la exactitud de la respuesta del sistema en régimen permanente. La nueva función de transferencia tiene ahora sólo dos polos que corresponderán con los valores de  $s$  que hacen  $G(s)+1 = 0$ . Estas dos raíces pueden ser reales o complejas conjugadas. Ahora no se produce el efecto de desestabilización del sistema al aumentar el valor de  $K$ , ya que la parte real de las raíces resulta siempre negativa.

En la función de transferencia del sistema de regulación de tensión en bucle cerrado se sustituye  $G(s)$  por la expresión anterior se obtiene:

$$\frac{\Delta|V|(s)}{\Delta V_{\text{ref}}(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (3.37)$$

$$\frac{\Delta|V|(s)}{\Delta V_{\text{ref}}(s)} = \frac{\frac{k}{k+1}}{1 + s \frac{(T_g + T_a)}{k+1} + s^2 \frac{T_g T_a}{k+1}} \quad (3.38)$$

La expresión anterior puede tomar la siguiente forma simplificada mediante unos simples cambios de variable:

$$\frac{\Delta|V|(s)}{\Delta V_{\text{ref}}(s)} = \frac{k_p}{1 + 2\xi\gamma s + \gamma^2 s^2} \quad (3.39)$$

Con:

$$k_p = \frac{k}{k+1}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{T_a T_g}{k+1}}, \quad \xi = \frac{T_g + T_a}{2\sqrt{T_g T_a (k+1)}} \quad (3.40)$$

Si se produce una variación en la tensión de referencia,  $\Delta V_{\text{ref}}$  de tipo escalón con magnitud la unidad, la variación de la tensión de salida del generador,  $\Delta|V|$  seguirá la siguiente expresión:

$$\Delta|V|(s) = \frac{k_p}{(1 + 2\xi\gamma s + \gamma^2 s^2)} \quad (3.41)$$

La variación de la tensión de salida del generador,  $\Delta|V|$  en el dominio del tiempo, se calculará como la transformada inversa de Laplace de la expresión anterior, y tendrá una forma diferente según el valor del coeficiente,  $\xi$ .

Si  $\xi > 1$ , la función  $\Delta|V|(s)$  tiene dos polos reales y distintos y la respuesta temporal es una función de segundo orden sobre amortiguada.

$\xi Si = 1$ , la función  $\Delta|V|(s)$  tiene un polo real doble y la respuesta temporal es una función de segundo orden críticamente amortiguada.

$\xi Si < 1$ , la función  $\Delta|V|(s)$  tiene dos polos complejos conjugados y la respuesta temporal es una función de segundo orden sub amortiguada. Esta es una situación que se presenta en la realidad, teniendo en cuenta los valores habituales de las constantes de tiempo del generador,  $T_g$ , y del amplificador,  $T_a$ , así como el valor de la ganancia  $K$ . En este caso la respuesta temporal,  $V(t)$ , sigue la siguiente expresión:

$$\Delta V(t) = k \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\frac{\xi}{\gamma} t} \text{sen}(\omega t + \varphi) \right] \quad (3.42)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\gamma}, \text{ y } \varphi = \text{arctg} \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (3.43)$$

En la figura siguiente se presenta la respuesta temporal para dos casos siguientes:

Se puede apreciar en la **tabla 3.1** los valores para la respuesta temporal de tensión de salida.

**Tabla 3.1** Respuesta temporal de la tensión de salida.

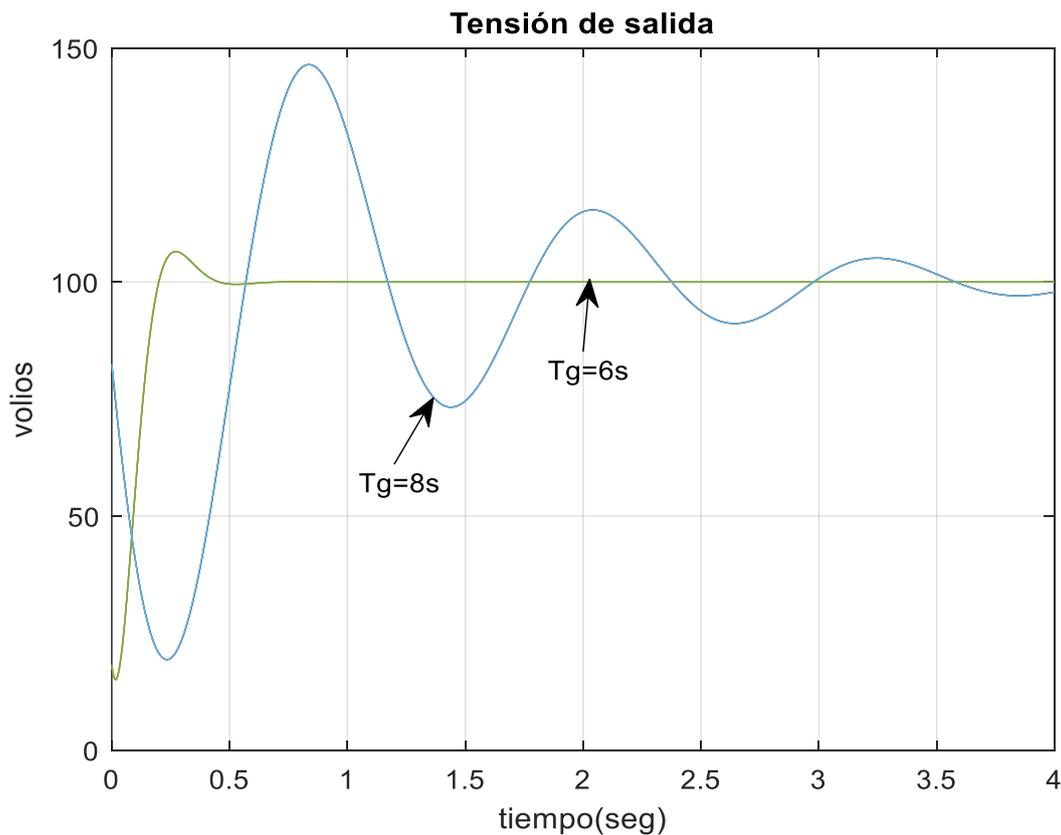
Ejemplo Respuesta Temporal de la Tensión de Salida.										
<b>CASO 01</b>										
<b>K</b>	=	100	;	<b>T<sub>g</sub></b>	=	8 s	;	<b>T<sub>a</sub></b>	=	0.05 s
<b>CASO 02</b>										
<b>K</b>	=	100	;	<b>T<sub>g</sub></b>	=	6 s	;	<b>T<sub>a</sub></b>	=	0.60 s

*Fuente: Elaboración propia.*

El primer caso resulta una respuesta muy amortiguada,  $V_1(t)$ , mientras que en el segundo resulta una respuesta muy oscilante que resulta inaceptable  $V_2(t)$ . Se puede comprobar cómo cuanto

menor es la constante de tiempo del amplificador y mayor la constante de tiempo del generador más amortiguado resulta el sistema. los cuales podemos observarlos en el **Gráfico 3.1**

**Gráfico 3.2** Respuesta en el dominio del tiempo de la tensión de salida, frente a una variación de la tensión de referencia en forma de escalón de valor 100%.



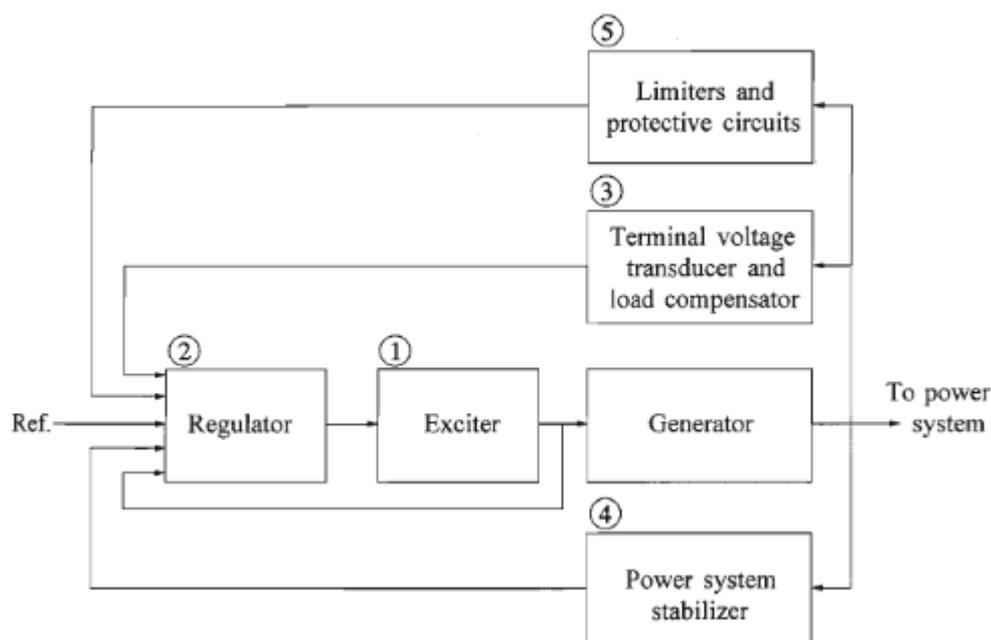
*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.10. Control automático de la tensión (AVR).

Los sistemas de excitación deben suministrar y ajustar automáticamente la corriente de campo del generador síncrono para mantener la tensión en bornes cuando la potencia de generación varía dentro de los rangos de servicio continuo.

Deben ser capaces de responder a disturbios transitorios mediante el forzamiento del campo en coherencia con las capacidades instantáneas de corta duración del generador. Proven funciones de limitación y protección para prevenir el daño en sus componentes y el generador.

Contribuir al control efectivo de la tensión y al mejoramiento de la estabilidad del sistema, respondiendo rápidamente frente a un gran disturbio y modulando el campo del generador para mejorar la respuesta ante pequeñas perturbaciones. (Prabha Kundur,1994), como podemos observar en la **figura 3.9**.



**Figura 3.9** Partes del sistema de excitación.

*Fuente: Prabha Kundur,1994.*

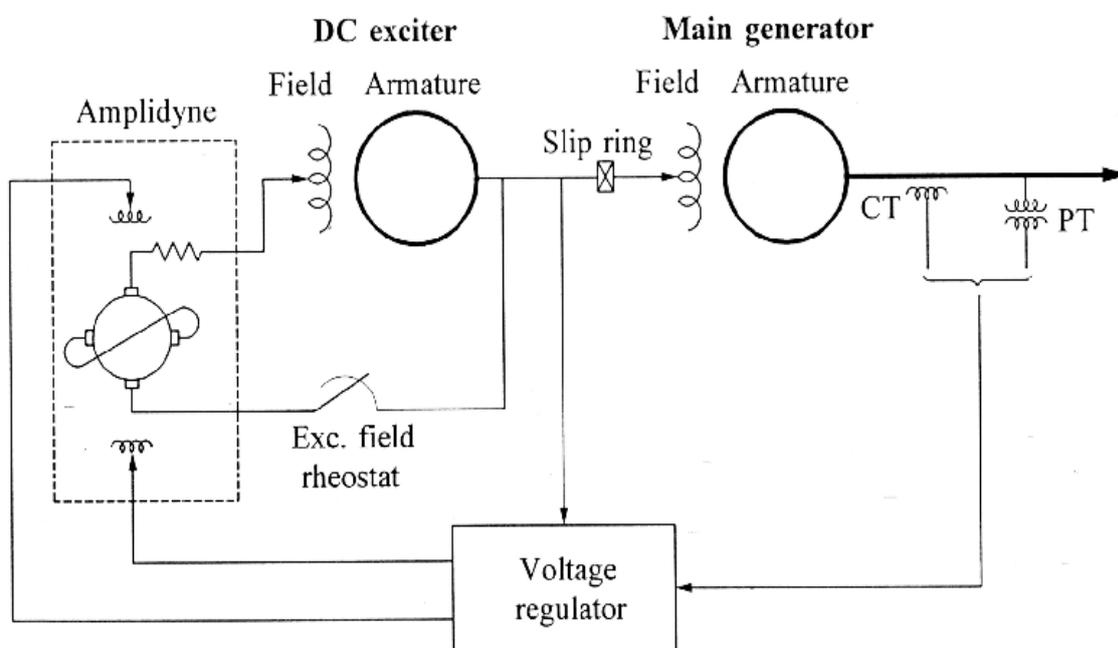
### 3.11. Tipos de sistemas de excitación.

En función de la fuente de potencia los sistemas de excitación pueden agruparse en tres tipos: sistemas de excitación en continua (DC), sistemas de excitación en alterna (AC) y sistemas de excitación estáticos (ST).

### 3.11.1. Sistemas de excitación tipo DC.

Son los sistemas de excitación que utilizan como excitatriz a un generador (de conmutador) convencional de corriente continua y que fueron ampliamente utilizados en las centrales eléctricas hasta los años 60, en que empezaron a ser reemplazados por los del tipo AC. Sin embargo, aún existen en el mundo muchos de estos sistemas de excitación que están aún en servicio. (Prabha Kundur,1994)

El generador de continua puede ser de excitación independiente o auto excitado. En la **figura 3.10** muestra esquemáticamente un típico sistema de excitación DC.



**Figura 3.10** Sistema de excitación Tipo DC.

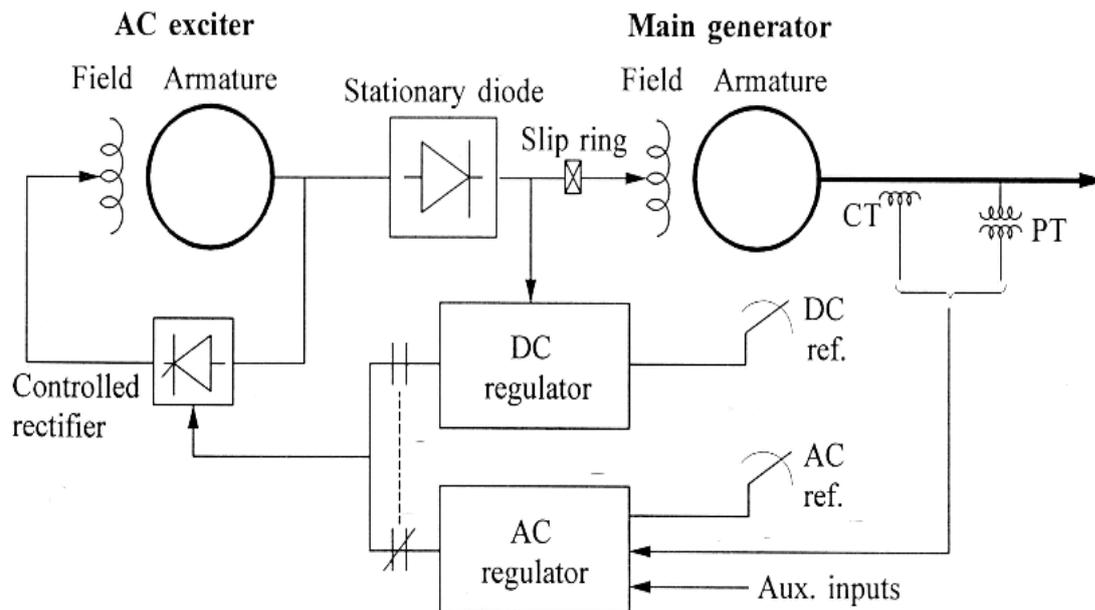
*Fuente:* Prabha Kundur 1994.

### 3.11.2. Sistemas de excitación tipo AC.

Utilizan alternadores de alta frecuencia (400-500 Hz) como excitatrices. La tensión de salida de los alternadores ingresa a rectificadores controlados o no-controlados para proveer la corriente continua al campo del generador. Los rectificadores pueden ser estacionarios o rotatorios. (Prabha Kundur,1994)

### A. Alternador de campo controlado alimentando a rectificadores no controlados.

En la **figura 3.11**. se muestra un sistema típico en el cual el excitador AC es auto excitado, rectificando la tensión en bornes y aplicándola a su campo. La tensión alterna generada es rectificada con diodos estacionarios para alimentar el campo del generador síncrono.

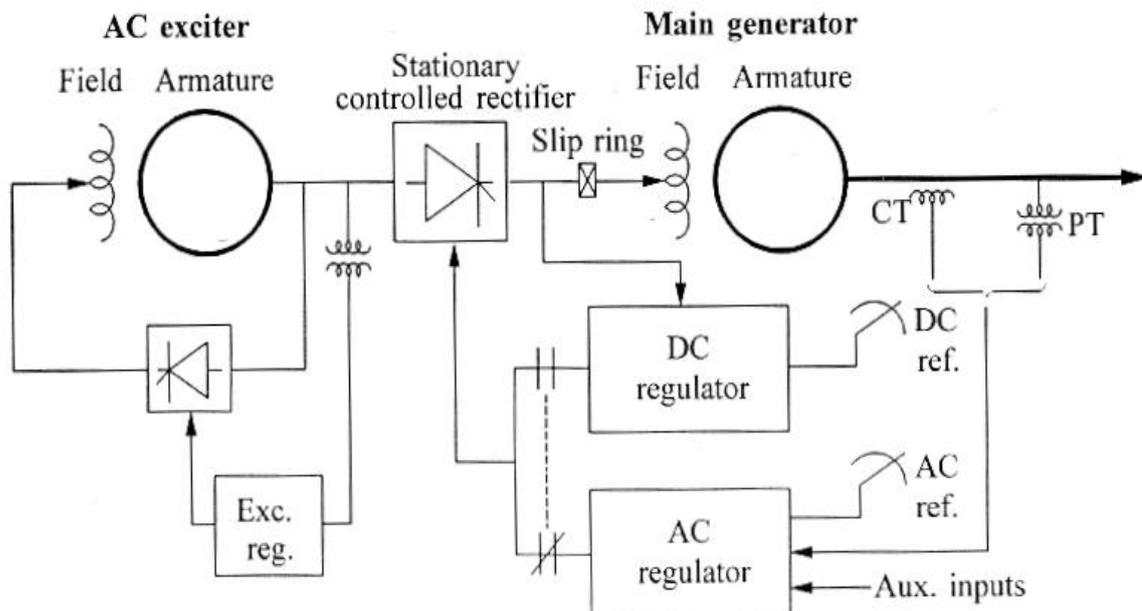


**Figura 3.11** Sistema de excitación con rectificación no-controlada

*Fuente: Prabha Kundur 1994.*

### B. Sistema con alternador alimentando a rectificadores controlados.

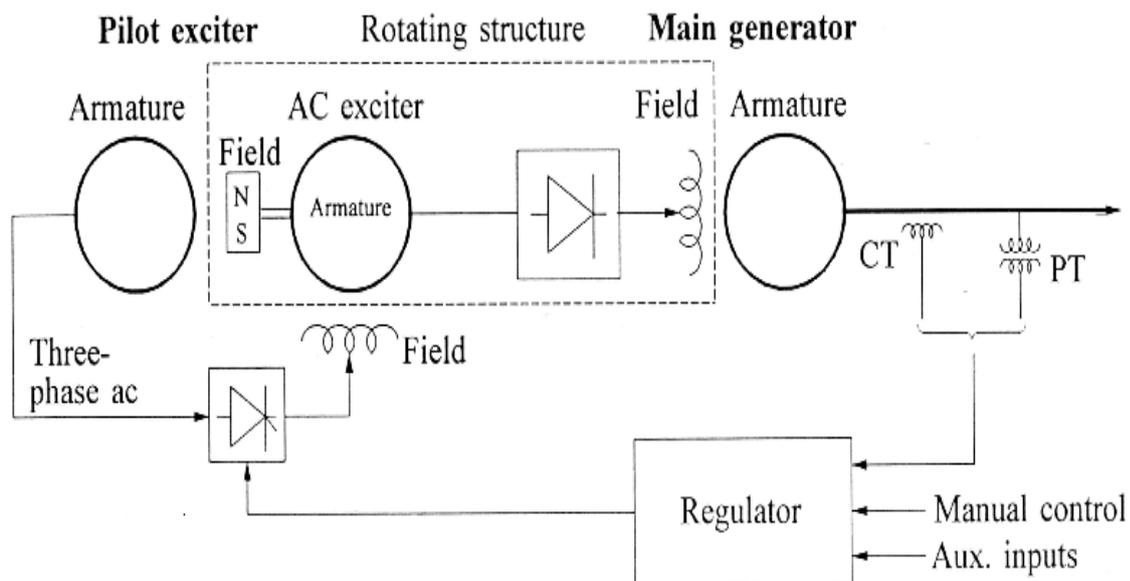
En este sistema de excitación (**figura 3.12**) el regulador controla directamente la tensión de salida del excitador.



**Figura 3.12** Sistema de excitación con rectificación controlada  
*Fuente:* Prabha Kundur 1994.

### C. Sistema con alternador alimentando a rectificadores rotativos.

Se les conoce como sistemas excitación sin escobillas (**figura 3.13**) el regulador controla directamente la tensión de salida del excitador.



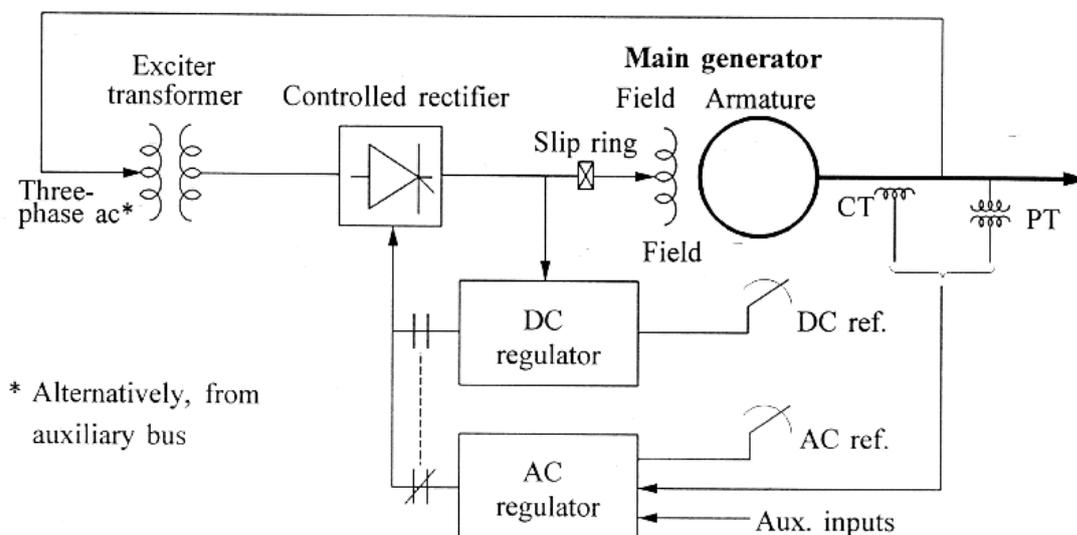
**Figura 3.13** Sistema de excitación sin escobillas.  
*Fuente:* Prabha Kundur 1994.

### 3.11.3. Sistemas de excitación tipo ST.

Utilizan como excitatriz a un transformador y rectificadores. Si los transformadores están conectados a los terminales del generador o a la barra de servicios auxiliares entonces se les llama " sistemas de excitación estáticos autoalimentados" (self-fed static excitation systems). Cuando los transformadores se energizan desde una fuente independiente (la red), se les denomina " sistemas de excitación estáticos con alimentación separada". Los rectificadores pueden ser controlados, caso en el cual el regulador controla el ángulo de disparo de los tiristores, y no-controlados. (Prabha Kundur,1994)

#### A. Sistema con fuente de potencia con rectificación controlada.

En este sistema de excitación (**figura 3.14**) el regulador controla directamente la tensión de salida del excitador, aplicada al campo del generador.

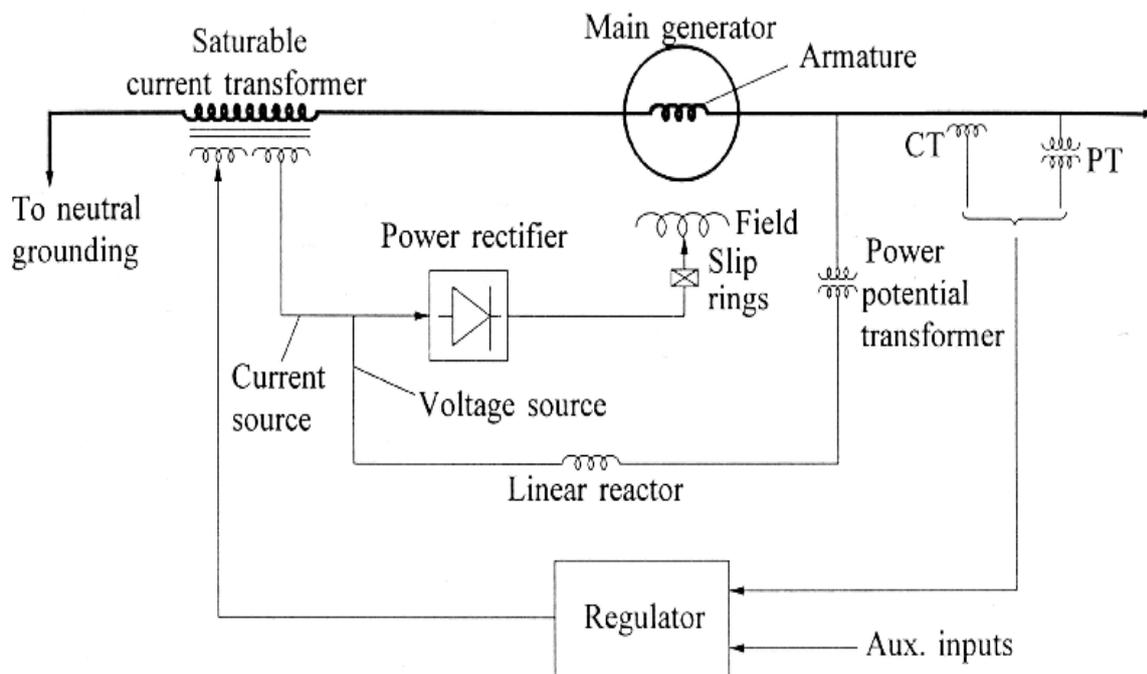


**Figura 3.14** Excitación con fuente de potencia con rectificación controlada.

Fuente: Prabha Kundur 1994.

#### B. Sistema con fuente de potencia y rectificación compuesta.

Se les conoce con este nombre porque la potencia para el sistema de excitación está formada por las señales de corriente y tensión del generador síncrono, que se observa en la **figura 3.15**.



**Figura 3.15** Excitación con fuente de potencia con rectificación compuesta  
*Fuente:* Prabha Kundur, 1994.

### 3.12. Modelamiento de componentes.

El detalle del modelo requerido depende del propósito del estudio. Con respecto a la **Figura 3.17**, los bloques que impactan sobre los estudios de estabilidad transitoria y la estabilidad de pequeña señal, son el regulador de tensión, estabilizador de sistemas de potencia y el lazo de estabilización de excitación. Los limitadores y circuitos de protección normalmente deben ser considerados solo para los estudios de media y larga duración y de estabilidad de tensión.

#### 3.12.1. Excitatrices de corriente continua (DC).

La señal de entrada a la excitatriz DC es la tensión de salida del regulador de tensión ( $V_R$ ); su tensión de salida es la tensión aplicada campo del generador síncrono ( $E_{fd}$ ). (Elgerd,1970)

Para obtener la función de transferencia de este tipo de excitatriz se toma un generador de excitación independiente, al despreciar la resistencia y la inductancia de armadura del generador, las ecuaciones resultan:

$$\mathbf{V}_R = (\mathbf{r}_e + \mathbf{L}_e \mathbf{p}) \mathbf{i}_e \quad (3.44)$$

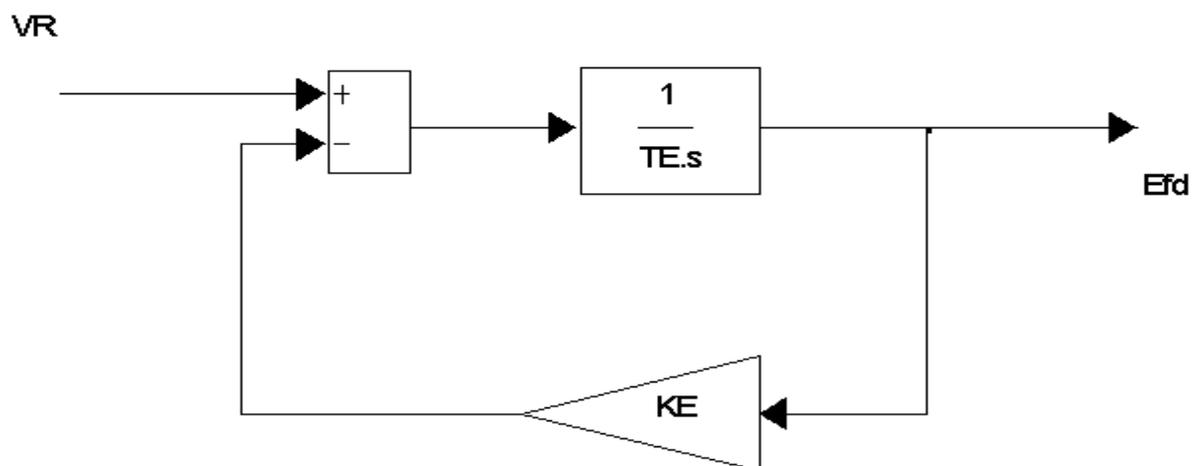
$$\mathbf{E}_{fd} \cong \mathbf{G}_{ae} \omega_m^r \mathbf{i}_e \quad (3.45)$$

Donde:

En la **Figura 3.16** se muestra el diagrama de bloques de esta excitatriz, suponiendo que  $G_{ae}$  es constante (circuito magnético lineal). La idea es por la saturación la tensión  $E_{fd}$  real (considerando la no-linealidad) es menor, por lo tanto, para incorporar este efecto se disminuye la tensión ( $V_R$ ) para incorporar este efecto.

La magnitud  $\Delta V_{fd}$  a disminuir se expresa como una función exponencial de la tensión de salida  $E_{fd}$ :

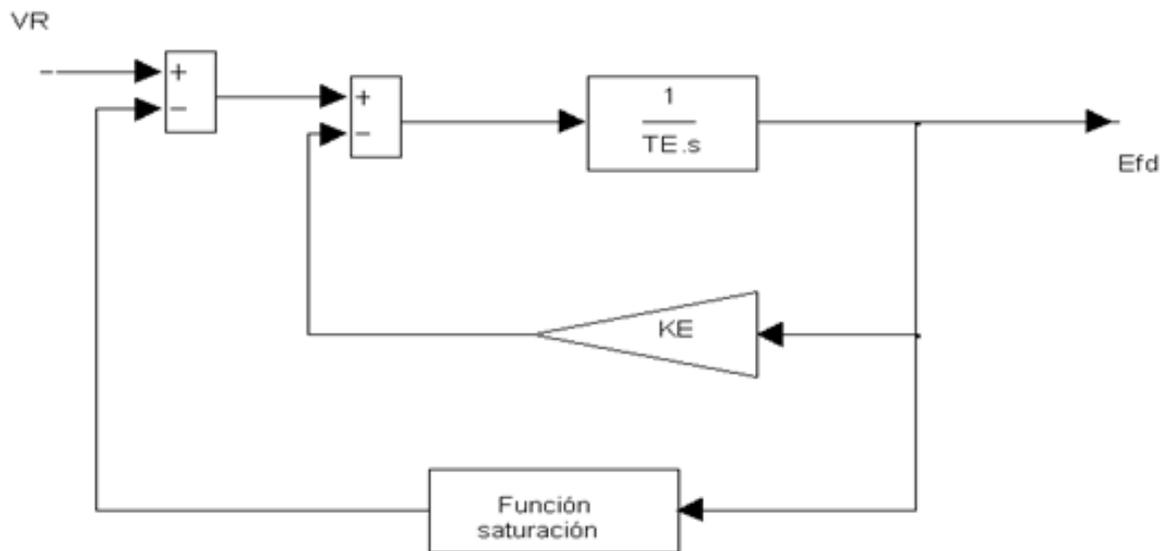
$$\Delta v_{fd} = A_{EX} e^{B_{EX} E_{fd}} \quad (3.46)$$



**Figura 3.16** Diagrama de bloques de la excitatriz DC

*Fuente: Elgerd, 1970.*

En la **Figura 3.17** se aprecia la incorporación de la función saturación.

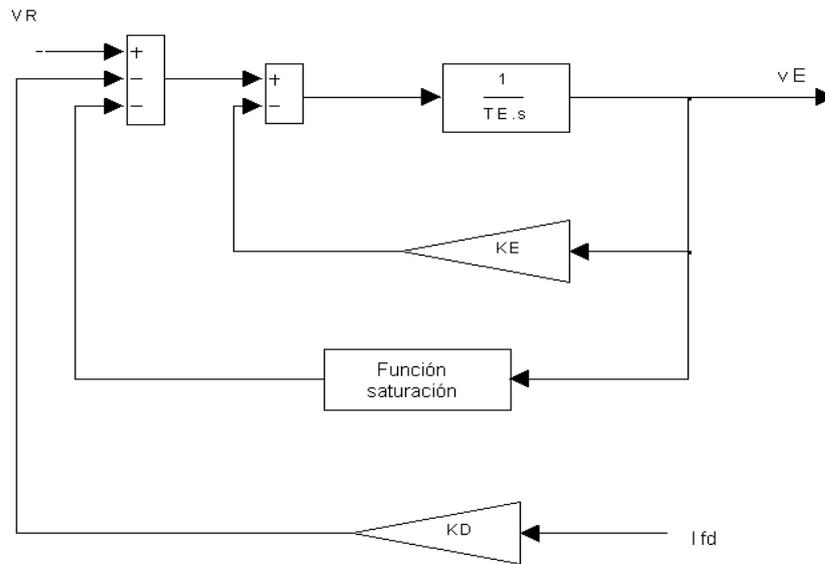


**Figura 3.17** Diagrama de bloques de la excitatriz no lineal  
*Fuente: Elgerd, 1970.*

### 3.12.2. Excitatrices de corriente alterna (AC).

La condición del método del excitador de AC es similar al método del excitador de DC, el voltaje de salida del excitador (VE) debe cambiarse para proporcionar un campo de generador síncrono. En este caso está incorporado el efecto de la reacción de armadura del excitador AC que depende de su corriente de carga, que en este caso es la corriente de campo ( $I_{fd}$ ) del generador síncrono, (Elgerd,1970).

### 3.12.3. Sistema de rectificación.



**Figura 3.18** Diagrama de bloques del excitador AC.

Fuente: Elgerd, 1970.

En la **figura 3.18** se muestra el modelo de la rectificación de onda completa donde,  $K_C$  depende de la reactancia de conmutación y  $f(I_N)$  caracteriza los modos de operación del rectificador y en la **tabla 3.2** se muestra los valores de operación del mismo:

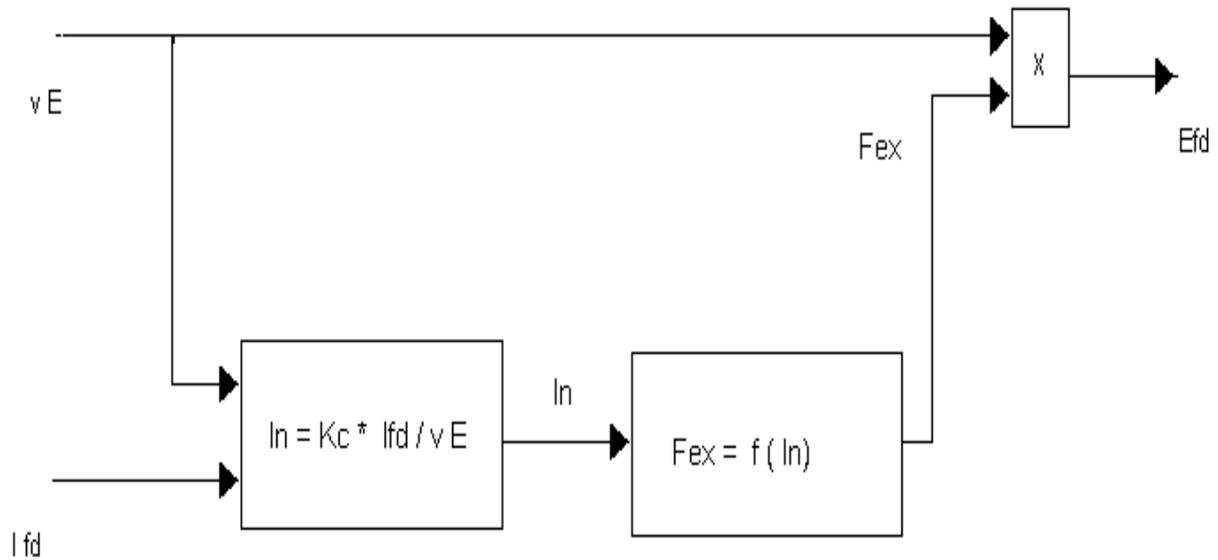
**Tabla 3.2** Características modos de operación del rectificador.

Modos de Operación del Rectificador							
<b>MODO 01</b>							
$f(I_N)$	=	$1.0 - 0.577 I_N$	; si			$I_N \leq 0.433$	
<b>MODO 02</b>							
$f(I_N)$	=	$\sqrt{0.75 - I_N^2}$	; si	$0.433 \leq I_N \leq 0.75$			
<b>MODO 03</b>							
$f(I_N)$	=	$\sqrt{3}(1.0 - I_N)$	; si	$0.75 \leq I_N \leq 1.00$			

Fuente: Elgerd, 1970.

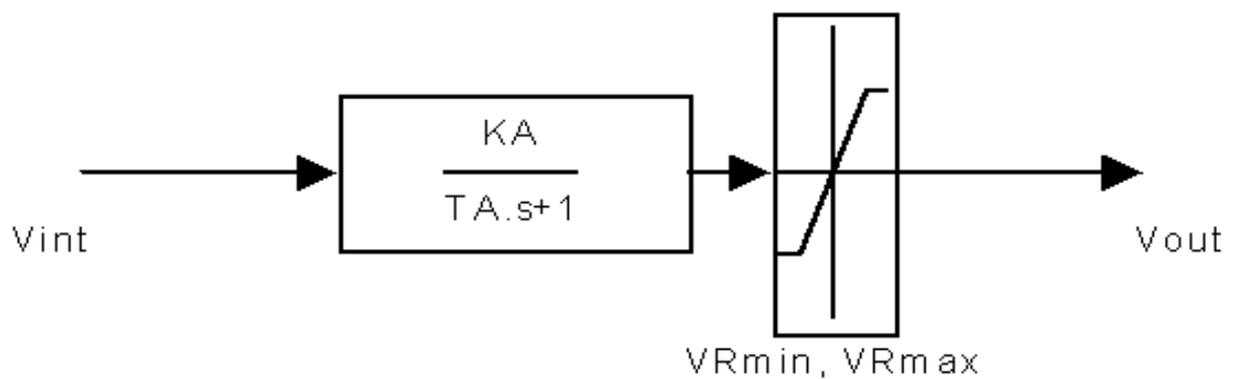
### 3.12.4. Amplificadores.

El amplificador puede ser magnético, rotativo o electrónico, expresados usualmente por una ganancia  $K_A$  y constante de tiempo  $T_A$ . (Elgerd, 1970), como se muestra en la **figura 3.19** y **figura 3.20** podemos observar el modelo de rectificación final y del amplificador respectivamente.



**Figura 3.19** Modelo del proceso de rectificación.

*Fuente: Elgerd, 1970.*

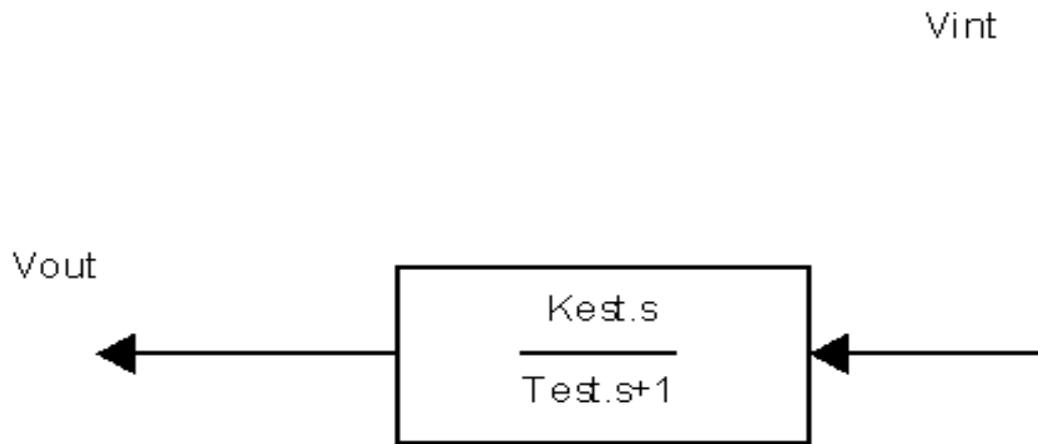


**Figura 3.20** Modelo del amplificador.

*Fuente: Elgerd, 1970.*

### 3.12.5. Circuitos de estabilización.

La señal de entrada al circuito de estabilización es normalmente la tensión de salida de la excitatriz, la señal de salida ingresa al regulador. Usualmente se utiliza un transformador como elemento de realimentación. (Elgerd, 1970), como se observa en la **figura 3.21**

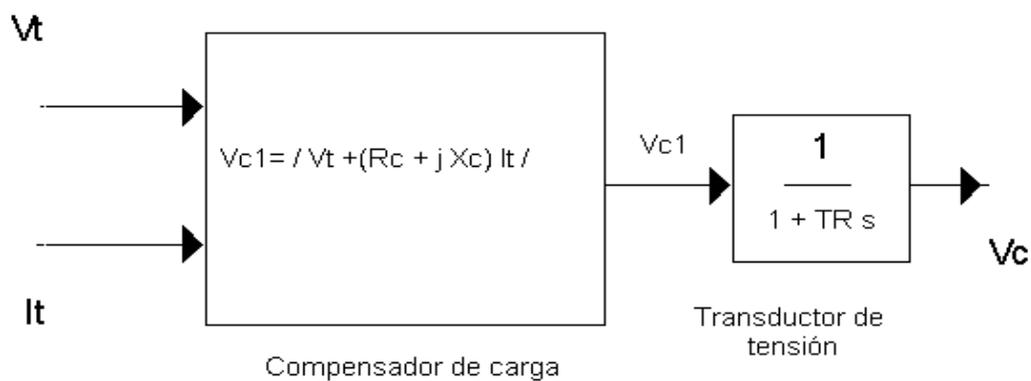


**Figura 3.21** Circuito de estabilización.

*Fuente: Elgerd, 1970.*

### 3.12.6. Transductor de tensión y compensador de carga.

El bloque de medición, rectificación, filtrado se expresa mediante una función de primer orden, con una constante de tiempo  $T_R$ . El bloque de compensación se utiliza cuando la tensión a controlar es la del secundario del transformador o la medición no está precisamente en los bornes del generador. (Elgerd, 1970), como se observa en la **figura 3.22**



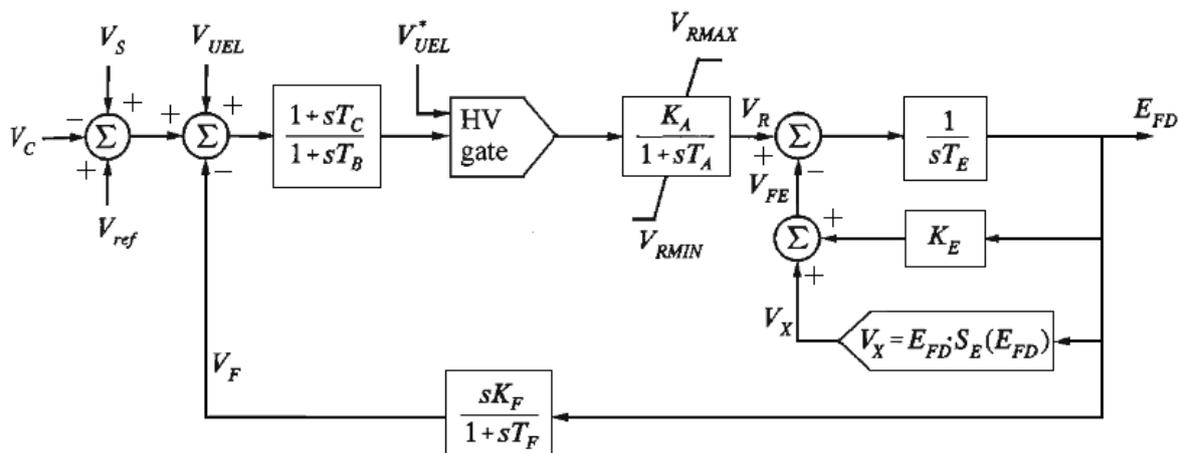
**Figura 3.22** Transductor de tensión y compensador de carga.

*Fuente: Elgerd, 1970.*

### 3.13. Representación de sistemas de excitación.

#### 3.13.1. Sistemas de excitación tipo DC1A.

En la **figura 3.23** se muestra un sistema de excitación tipo DC1A, que posee un regulador de tensión de acción continua. El excitador puede ser de excitación independiente o auto excitado.



**Figura 3.23** Sistema de excitación tipo DC1A.

Fuente: Prabha Kundur, 1994.

En este diagrama se tiene:

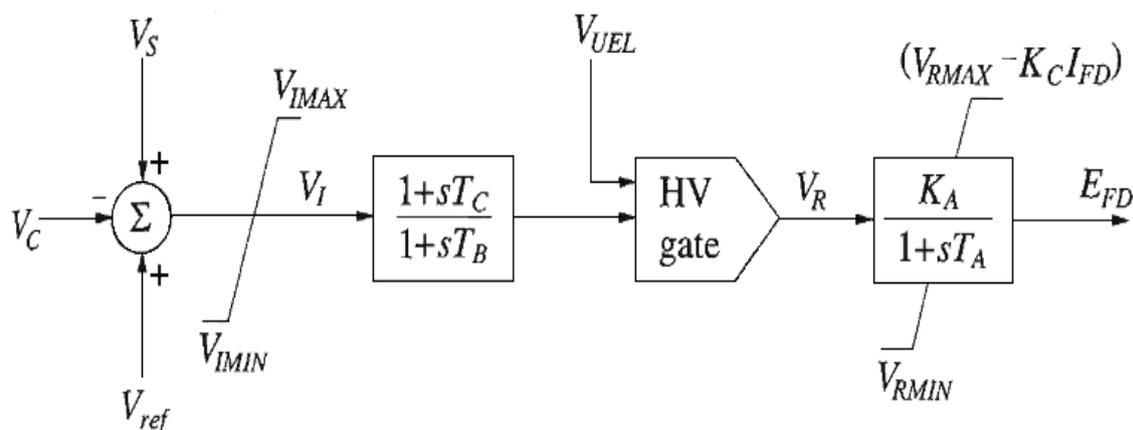
- $V_C$  : Señal de salida del bloque de compensación de carga y el transductor de tensión (bloque de rectificación y filtrado de la tensión alterna medida).
- $V_{ref}$  : Tensión de referencia del regulador.
- $V_S$  : Señal de salida del estabilizador (PSS).
- $V_{UEL}$  : Señal de adicional del limitador de subexcitación.
- $V_R$  : Tensión de salida del regulador, aplicada a la excitatriz.
- $V_{RMAX}, V_{RMIN}$  : Valores límites de la tensión de salida del regulador.
- $E_{fd}$  : Salida del sistema de excitación, aplicada al campo del generador.
- $T_C, T_B$  : Constantes de tiempo del compensador en adelante-atraso.



- $V_R$  : Tensión de salida del regulador, aplicada a la excitatriz.  
 $V_{RMAX}, V_{RMIN}$  : Valores límites de la tensión de salida del regulador.  
 $E_{fd}$  : Salida del sistema de excitación, aplicada al campo del generador.  
 $I_{fd}$  : Corriente de excitación del generador.  
 $T_C, T_B$  : Constantes de tiempo del compensador en adelanto-atraso.  
 $K_A, T_A$  : Ganancia y constante de tiempo del regulador de tensión.  
 $V_{AMAX}, V_{AMIN}$  : Valores límites de la tensión de salida del amplificador.  
 $K_F, T_F$  : Ganancia y constante de tiempo del lazo de estabilización.  
 $K_E, K_D, T_E$  : Ganancias y constante de tiempo de la excitatriz de alterna.  
 $S_E (V_E)$  : Función saturación de la excitatriz de alterna.  
 $K_C$  : Constante que depende de la rectificación.

### 3.13.3. Sistemas de Excitación Tipo AC4A.

En la **figura 3.25** se muestra un sistema de excitación tipo AC4A, que representa un sistema de excitación con una "excitatriz de alterna con campo controlado y rectificación controlada por tiristores".



**Figura 3.25** Sistema de excitación Tipo AC4A

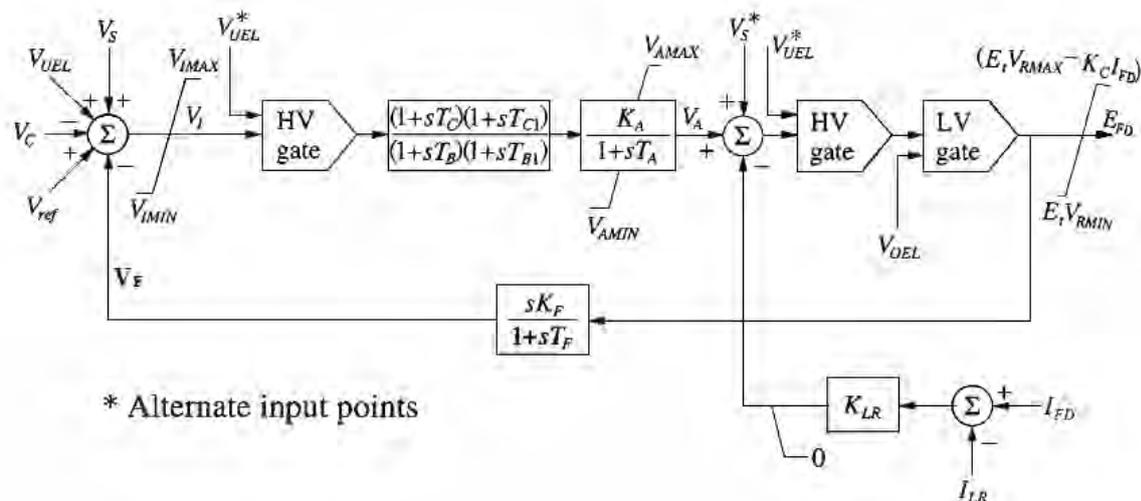
*Fuente: Prabha Kundur, 1994.*

En este diagrama se tiene:

$V_{ref}$	:	Tensión de referencia del regulador.
$V_C$	:	Señal de salida del bloque de compensación de carga y el transductor de tensión (bloque de rectificación y filtrado de la tensión alterna medida).
$V_S$	:	Señal de salida del estabilizador (PSS).
$V_{UEL}$	:	Señal de adicional del limitador de subexcitación.
$V_R$	:	Tensión de salida del regulador, aplicada a la excitatriz.
$V_{RMAX}, V_{RMIN}$	:	Valores límites de la tensión de salida del regulador.
$E_{fd}$	:	Salida del sistema de excitación, aplicada al campo del generador.
$T_C, T_B$	:	Constantes de tiempo del compensador en adelanto-atraso.
$K_A, T_A$	:	Ganancia y constante de tiempo del regulador de tensión.
$V_{IMAX}, V_{IMIN}$	:	Valores límites internos del regulador.
$K_C$	:	Constante que depende de la rectificación.

#### 3.13.4. Sistemas de Excitación Tipo ST1A.

En la **figura 3.26** se muestra un sistema de excitación tipo ST1A, que representa un sistema de excitación con una "fuente de potencia con rectificación controlada por tiristores".



**Figura 3.26** Sistema de excitación Tipo ST1A

Fuente: Prabha Kundur, 1994.

En este diagrama se tiene:

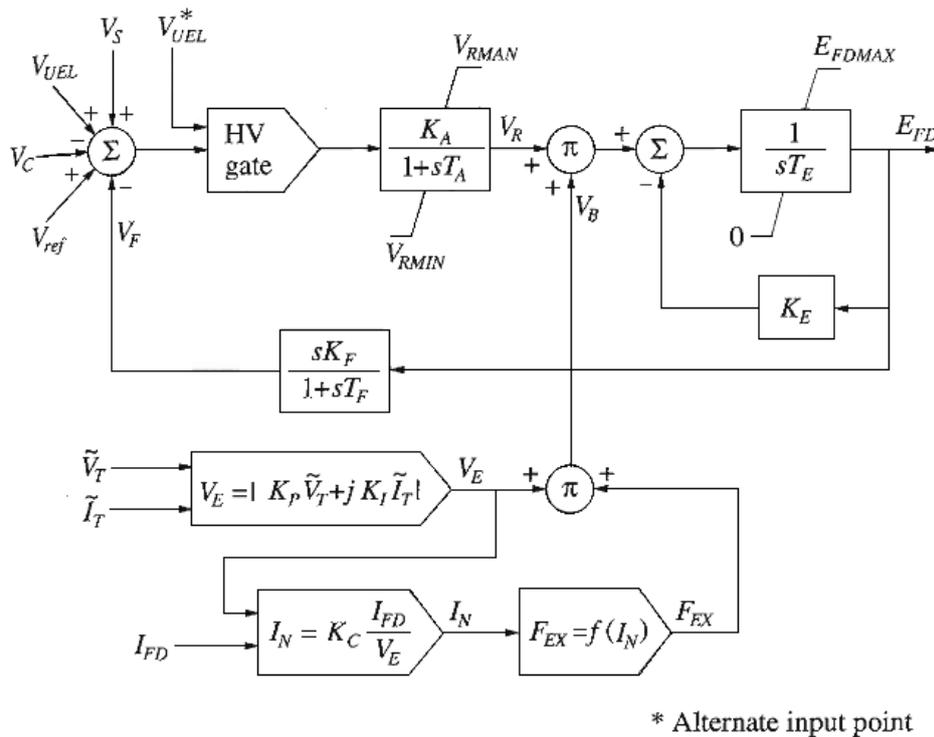
- $V_S$  : Señal de salida del estabilizador (PSS).
- $V_{UEL}$  : Señal de adicional del limitador de subexcitación
- $V_{OEL}$  : Señal de adicional del limitador de sobrexitación
- $V_{IMAX}, V_{IMIN}$  : Valores límites internos del regulador
- $V_R$  : Tensión de salida del regulador, aplicada a la excitatriz
- $V_{RMAX}, V_{RMIN}$  : Valores límites de salida regulador
- $E_{fd}$  : Salida del sistema de excitación, aplicada al campo del generador
- $I_{fd}$  : Corriente de excitación del generador
- $T_C, T_B$  : Constantes de tiempo del compensador en adelanto-atraso
- $K_A, T_A$  : Ganancia y constante de tiempo del regulador de tensión
- $V_{AMAX}, V_{AMIN}$  : Valores límites de la tensión de salida del amplificador
- $K_F, T_F$  : Ganancia y constante de tiempo del lazo de estabilización
- $K_E, K_D, T_E$  : Ganancias y constante de tiempo de la excitatriz de alterna
- $S_E (V_E)$  : Función saturación de la excitatriz de alterna

$K_C$  : Constante de rectificación

$I_{LR}, K_{LR}$  : Limitadores de refuerzo del campo

### 3.13.5. Sistemas de Excitación Tipo ST2A.

En la **figura 3.27** se muestra un sistema de excitación tipo ST2A, que representa un sistema de excitación con una "fuente de potencia con rectificación compuesta".



**Figura 3.27** Sistema de excitación Tipo ST1A.

Fuente: Prabha Kundur, 1994.

En este diagrama se tiene:

$V_{ref}$  : Tensión de referencia del regulador

$V_C$  : Señal de salida del bloque de compensación de carga y el transductor de tensión

$V_S$  : Señal de salida del estabilizador (PSS).

$V_{UEL}$  : Señal de adicional del limitador de subexcitación

$V_R$  : Tensión de salida del regulador, aplicada a la excitatriz

- $V_{RMAX}, V_{RMIN}$  : Valores límites de salida regulador
- $E_{fd}$  : Salida del sistema de excitación, aplicada al campo del generador
- $I_{fd}$  : Corriente de excitación del generador
- $K_A, T_A$  : Ganancia y constante de tiempo del regulador de tensión
- $K_F, T_F$  : Ganancia y constante de tiempo del lazo de estabilización
- $K_E, T_E$  : Ganancia y constante de tiempo de la excitatriz
- $K_C$  : Constante de rectificación
- $V_T, I_T$  : Fasores tensión y corriente del generador
- $K_P, K_I$  : Constantes de tensión y corriente en el generador

### 3.13.6. Parámetros típicos.

Se puede apreciar en la **tabla 3.3** los diferentes valores típicos para los diferentes sistemas de excitación.

**Tabla 3.3** Parámetros típicos.

Parámetros Típicos											
<b>TIPO DC1A</b>											
$T_R$	=	0.05	$A_{ex}$	=	0.014	$B_{ex}$	=	1.550			
$K_E$	=	(*)	$T_E$	=	1.150	$K_F$	=	0.058	$T_F$	=	0.620
$T_B$	=	0.06	$T_C$	=	0.173	$K_A$	=	187.0	$T_A$	=	0.890
$V_{Rmax}$	=	1.70	$V_{Rmin}$	=	-1.700						
<b>TIPO AC1A</b>											
$T_R$	=	0.0	$A_{ex}$	=	0.1	$B_{ex}$	=	0.03			

$K_E$	=	1.0	$T_E$	=	0.8	$K_F$	=	0.03	$T_F$	=	1.00
$T_B$	=	0.0	$T_C$	=	0.0	$K_A$	=	400.0	$T_A$	=	0.020
$V_{Rmax}$	=	7.3	$V_{Rmin}$	=	-6.6						
$V_{Amax}$	=	15.0	$V_{Amin}$	=	-15.0						
<b>TIPO AC1A</b>											
$T_R$	=	0.00	$A_{ex}$	=	0.10	$B_{ex}$	=	0.030			
$K_E$	=	1.00	$T_E$	=	0.80	$K_F$	=	0.030	$T_F$	=	1.00
$T_B$	=	0.00	$T_C$	=	0.00	$K_A$	=	400.0	$T_A$	=	0.02
$V_{Rmax}$	=	7.30	$V_{Rmin}$	=	-6.60						
$V_{Amax}$	=	15.00	$V_{Amin}$	=	-15.00						
<b>TIPO AC4A</b>											
$T_B$	=	12.00	$T_C$	=	1.00	$K_A$	=	200.0	$T_A$	=	0.04
$V_{Rmax}$	=	5.64	$V_{Rmin}$	=	-4.53						
$V_{Imax}$	=	1.00	$V_{Imin}$	=	-1.00						
$K_C$	=	0.00									
<b>TIPO ST1A</b>											
$T_R$	=	0.015	$K_F$	=	0.00	$T_F$	=	0.00			
$T_B$	=	0.000	$T_C$	=	0.00	$K_A$	=	200.00	$T_A$	=	0.00

$V_{Rmax}$	=	7.000	$V_{Rmin}$	=	-6.40	$K_C$	=	0.04				
$K_{LR}$	=	4.540	$I_{LR}$	=	4.40							
<b>TIPO ST2A</b>												
$K_E$	=	1.00	$T_E$	=	0.50	$K_F$	=	0.02	$T_F$	=	0.56	
$K_C$	=	0.65	$K_A$	=	120.0	$T_A$	=	0.15				
$V_{Rmax}$	=	1.20	$V_{Rmin}$	=	-1.20							
$K_P$	=	1.19	$K_I$	=	1.62							
$E_{fdmax}$	=	3.55										

Fuente: Prabha Kundur, 1994.

### 3.14. Estabilizador de sistemas de potencia.

La función básica de un estabilizador de sistemas de potencia (PSS), el cual se observa en la **figura 3.28**, es adicionar amortiguamiento a las oscilaciones del rotor del generador, para lo cual debe producir una componente de torque eléctrico en fase con las variaciones de la velocidad del rotor.

La estructura básica de un PSS consiste de un compensador de fase, el filtro pasa alto y un bloque de amplificación.

La compensación de fase proporciona una característica de avance de fase adecuada para compensar el retraso de fase entre la señal de entrada del excitador y el par eléctrico del generador. En algunos casos esta función se cumple en la práctica con dos o más bloques de primer orden. Los requerimientos de mayores grados de compensación dependen de  $T'd_0$ . Generadores hidráulicos con bajos valores de esta constante de tiempo requieren un bloque de primer orden.

El filtro pasa alto debe tener una constante de tiempo lo suficientemente grande para que las señales asociadas con las oscilaciones de la velocidad del rotor pasen sin sufrir ningún cambio.

Ganancia del estabilizador  $K_{stab}$ , tiene un efecto importante sobre el amortiguamiento de las oscilaciones del rotor. El valor se escoge para lograr un alto amortiguamiento de los modos críticos del sistema, sin deteriorar la estabilidad de los modos restantes. (Prabha Kundur, 1994)

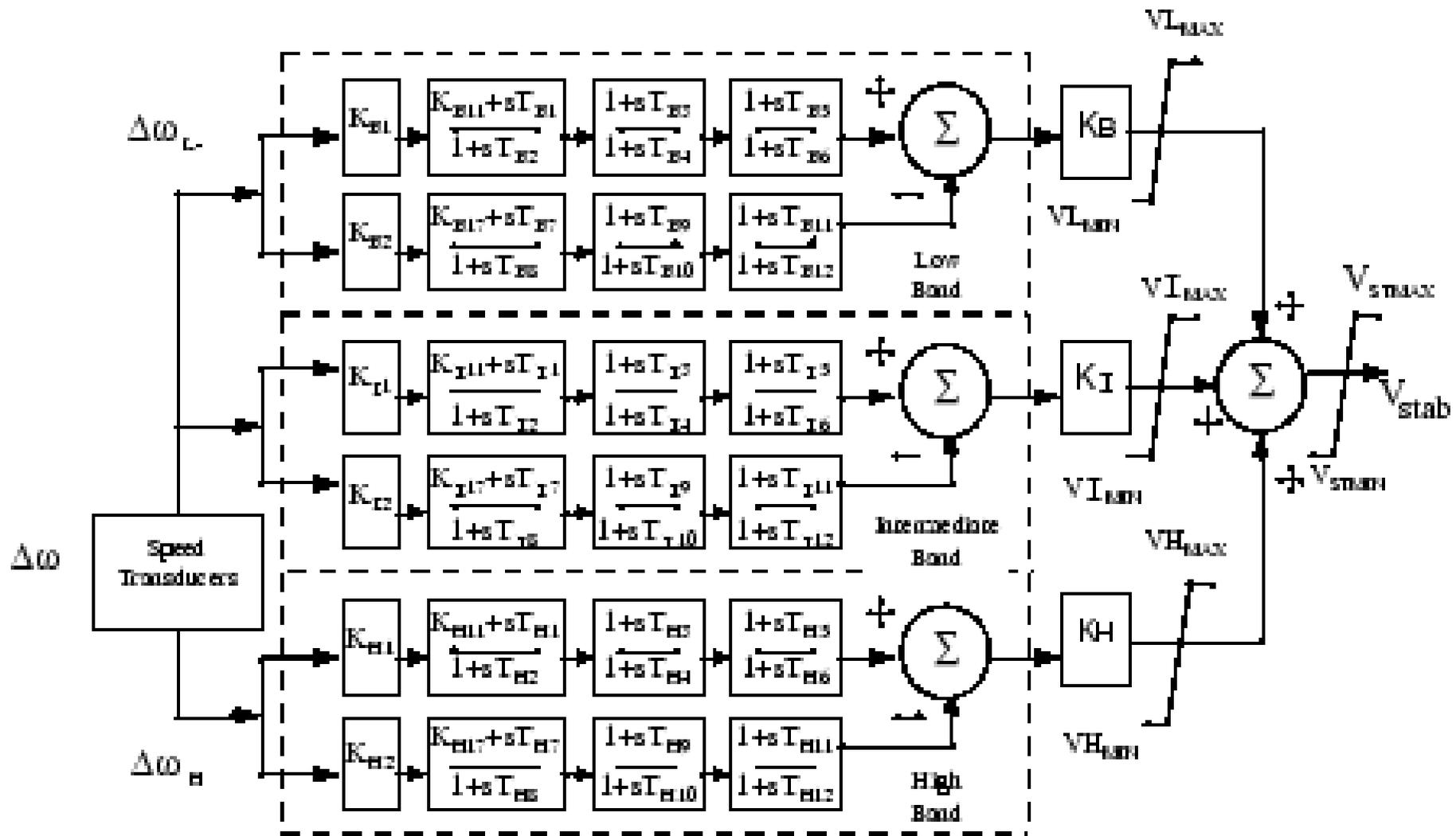


Figura 3.28 Esquema básico de un PSS.

Fuente: Elgerd, 1970.

## CAPÍTULO IV

### **4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.**

#### **4.1. Introducción.**

Las micro centrales hidroeléctricas que operan en nuestra región a través de las empresas concesionarias o por privados, tienen potencias muy variadas con reguladores de tensión de diversas características y procedencia, es decir, de diversas marcas, este hecho hace que los operadores deben asumir variados criterios para la operación de los sistemas de regulación de tensión.

Teniendo en consideración que las micro centrales operadas por los distribuidores se encuentran insertadas en el SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional), estas deben cumplir con la normatividad vigente en lo referente a las condiciones de: calidad del producto y del suministro; en lo referente a la calidad del producto se deben cumplir con los estándares de frecuencia y nivel de tensión, es este último el que analizaremos en la microcentral Hidroeléctrica de Hercca, siendo la muestra o estudio de caso de nuestra tesis para su respectiva validación de la hipótesis.

El análisis presentado está sustentado en las características actuales de los equipos de regulación de tensión que están operando.

#### **4.2. Características de la micro central hidroeléctrica de Hercca.**

##### **4.2.1. Reseña histórica.**

La micro central hidroeléctrica de Hercca es una instalación antigua con fecha de funcionamiento a partir de 1924 con la instalación del primer grupo de fuentes de alimentación de 416 kW para fines industriales y la ciudad de Sicuani. En 1936 se instaló una segunda unidad con una capacidad de 400 kW, que ahora se encuentra fuera de servicio. (Memoria ELSE,1996)

##### **4.2.2. Antecedentes.**

La micro central hidroeléctrica Hercca opera y entrega su energía al SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional), de tal manera que ayuda en la alimentación a toda su área de influencia.

La micro central hidroeléctrica Hercca, tiene actualmente una capacidad instalada de 0.624 MW en operación permanente y 0.416 MW en operación intermitente; sin embargo, la hidrología del río tributario Hercca proporciona garantías para un mayor aprovechamiento; siendo el equipamiento existente de una tecnología poco actualizada. La ampliación de la capacidad de esta central asegura la atención del servicio, fundamentalmente en la ciudad de Sicuani, cerca de la cual se encuentra instalada.

#### 4.2.3. Ubicación de la muestra.

El Proyecto Ampliación de la microcentral hidroeléctrico Hercca, se desarrolla sobre el río tributario Hercca, en la provincia de Canchis, distrito de Sicuani, departamento de Cusco, entre las coordenadas  $14^{\circ}21'31.16''$  S  $71^{\circ}17' 55.45''$ O. como se aprecia en la **figura4.1**



**Figura 4.1** Ubicación geográfica de la micro central hidroeléctrica de Hercca.

*Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.2.4. Descripción del Estado Actual:**

##### **A. Régimen de Operación.**

La micro central Hidroeléctrica de Hercca es una central con régimen de operación permanente.

##### **B. Equipamiento.**

La micro central Hidroeléctrica de Hercca cuenta con dos unidades generadoras de 390 kVA cada una con f.dep. de 0.8 respectivamente.

#### **4.2.5. Generación de la micro central.**

La micro central hidroeléctrica de Hercca genera en 2300 voltios, la cual es elevada mediante un transformador elevador hasta los 22,900 voltios, para lo cual se cuenta con un transformador cuyas características son: 22.9/2.3 kV de 1000 kVA, 60 Hz, I=55/25 A, de 17500/3600 V., con una refrigeración de tipo ONAN.

#### **4.2.6. Conexiones de los grupos.**

Los grupos en la actualidad se encuentran conectados en paralelo. De la micro Central se conecta a la línea de 22.9kV hasta la S.E. Puente Arturo (22.9/10.5 kV), para luego llegar a la S.E. de Sicuani (60/10.5kV), y a través de una línea de 60kV hasta la S.E. de Combapata el cual se conecta al SINAC a través de un transformador 138/60/24kV.

#### **4.2.7. Instalaciones.**

La micro Central cuenta con tres edificaciones, destinadas a: casa de máquinas, viviendas, almacén y oficinas. Como se puede apreciar en la **figura 4.2**



**Figura 4.2** Casa de máquinas de la central hidroeléctrica de Hercca.

*Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.2.8. Aprovechamiento hidro energético.**

La micro central de Hercca utilizar los recursos hídricos del afluente del río Hercca, existe una diferencia de cota de 92.5 m existe entre la toma y la estación generadora, para la generación de energía eléctrica.

#### **4.2.9. Obras de toma.**

Están ubicadas en el río Hercca a 10.34 km. Desde el puente de la carretera principal de Sicuani-Arequipa, tiene 21.5 m de longitud.

#### **4.2.10. Canal de aducción.**

Se realiza la conducción por medio de un canal abierto (parte con revestimiento de concreto y lo demás de tierra), esta sección variable que dista entre la compuerta y la cámara de carga tiene una longitud de 1419.5 m con una pendiente promedio de 0.3% y capacidad máxima de 2.5m<sup>3</sup>/seg.

#### 4.2.10.1. Desarenador.

Se halla a 81m de la toma, está construido con concreto ciclópeo. Su área es de 11x11 m y una profundidad de 2.5 m. Cuenta con compuerta metálica, así mismo en el canal de aducción cuenta con una baqueta de un metro de alto para impedir el ingreso de sólidos. Al ingreso tiene rejas de protección de sólidos y basura.

#### 4.2.10.2. Cámara de Carga.

Se encuentra ubicada a 1419.5 m de la toma y está construida de concreto armado y concreto ciclópeo, tiene un área de 7.8 x 6.8 y 2.6 metros de profundidad, posee dos compuertas al ingreso a las tuberías y un vertedero de demasías con su propia compuerta metálica.

#### 4.2.11. Tubería forzada.

Existen dos tuberías forzadas metálicas, que aprovechan 92.5 m de altura, los anclajes de apoyo son de concreto ciclópeo. en el **cuadro 4.1** se puede apreciar las características de la tubería forzada.

**Cuadro 4.1** Características tubería forzada.

Características tubería Forzada por grupo					
<b>Tubería grupo N° 01</b>					
<b>Longitud:</b>	167 m	<b>Diámetro:</b>	509 mm	<b>Espesor:</b>	3-7mm
<b>Tubería grupo N° 02</b>					
<b>Longitud</b>	169 m	<b>Diámetro:</b>	637 mm	<b>Espesor:</b>	3-7mm

*Fuente: Elaboración propia.*

#### Casa de máquinas.

La casa de máquinas cuenta con dos ambientes, en el primero se encuentran los dos grupos y tableros y en el segundo se encuentran la subestación.

#### 4.2.12. Canal de descarga.

Es un canal abierto, a excepción de lo que corresponde a la casa de máquinas, de 37m de longitud y sección rectangular, está revestido de concreto ciclópeo.

#### 4.2.13. Otras construcciones.

Existen construcciones de una planta destinada a: almacén de 30 m<sup>2</sup>, viviendas de 87 m<sup>2</sup>, y una oficina de 24 m<sup>2</sup>, así mismo existen dos mini habitaciones de 12 y 3 m<sup>2</sup> para el grupo electrógeno y vigilancia respectivamente.

#### 4.2.14. Obras Electromecánicas.

Las especificaciones técnicas de los principales equipos de la micro central hidroeléctrica de Hercca, se detallan a continuación:

##### A. Unidad generadora I (02 grupos).

El **cuadro 4.2** nos muestra las características de la turbina I de la unidad generadora I, así también la **figura 4.3** nos muestra la turbina y datos de placa. También podemos observar en la **figura 4.4**, **figura 4.5** y **figura 4.6** se muestra turbina I de la unidad generadora I, generador y placa de la unidad generadora I, generador y placa de la unidad generadora II respectivamente.

**Cuadro 4.2** Características técnicas unidad generadora I.

Unidad Generadora I (02 grupos de similares características).	
GRUPO 1	
Turbina.	

<b>Tipo</b>	:	Michel – Banki
<b>Marca</b>	:	Ossberger de doble paso
<b>N° Serie</b>	:	7830
<b>Velocidad</b>	:	720 RPM
<b>Potencia</b>	:	293 kW
<b>Salto Bruto</b>	:	98 metros
<b>Salto útil</b>	:	78.86 metros
<b>Caudal</b>	:	0.51 m3/seg
<b>Alabes</b>	:	20
<b>Tipo de rodete</b>	:	Michel – Banki Ossberger



Figura 4.3 Unidad de generación (Turbina y placa de datos grupo 1)

*Fuente: Elaboración propia*



Figura 4.4 Unidad de generación (Turbina y placa de datos grupo 2)

Fuente: Elaboración propia

Generador.

<b>Tipo</b>	:	DSG 86 KO - 10
<b>Marca</b>	:	AVK Synchron Generator
<b>N° Serie</b>	:	8121590
<b>Potencia Aparente</b>	:	500 kVA
<b>Potencia Nominal</b>	:	400 kW
<b>Corriente</b>	:	126 A
<b>Frecuencia</b>	:	60 Hz
<b>Velocidad</b>	:	900 RPM
<b>Tensión</b>	:	2300 V
<b>Factor de potencia</b>	:	0.8
<b>Tipo de Conexión</b>	:	Triangulo

Fuente: Elaboración propia.



características de la excitatriz de la unidad de generación II, la excitatriz con datos de placa. Respectivamente.

**Cuadro 4.3** Características técnicas unidad generadora II (turbina).

Unidad Generadora II	
Turbina	
<b>Tipo</b>	: Francis
<b>Marca</b>	: Escher Wyss
<b>N° Serie</b>	: 8910
<b>Velocidad</b>	: 1200 RPM
<b>Potencia</b>	: 600 HP
<b>Saldo bruto</b>	: 98 m
<b>N° Alabes Directrices</b>	: 16
<b>Tipo de rodete</b>	: Francis

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 4.7** Unidad generadora II (turbina).

*Fuente: Elaboración propia.*

**Cuadro 4.4** Características técnicas unidad generadora II (generador).

Unidad Generadora II	
Generador	
<b>Tipo</b>	: S 1000/500
<b>Marca</b>	: AEG
<b>N° Serie</b>	: 4100137
<b>Potencia Aparente</b>	: 520 kVA
<b>Potencia Nominal</b>	: 416 kW
<b>Corriente</b>	: 130 A
<b>Frecuencia</b>	: 60 Hz
<b>Tensión</b>	: 2300 V
<b>Factor de potencia</b>	: 0.8
<b>Tipo de Conexión</b>	: Estrella
<b>Fases</b>	: Tres

*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 4.8** Unidad generadora II (generador y placa da valores).

*Fuente: Elaboración propia.*

**Cuadro 4.5** Características técnicas unidad generadora II (excitatriz).

Unidad Generadora II	
Excitatriz	
<b>Tipo</b>	: NLH 4.3
<b>Marca</b>	: AEG
<b>N° Serie</b>	: 1256335
<b>Corriente</b>	: 47/54 A
<b>Velocidad</b>	: 1200 RPM
<b>Tensión</b>	: 100/115 V
<b>Potencia</b>	: 4.7/6.2 KW

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.9** Unidad generadora II (excitatriz y placa de datos).

Fuente: Elaboración propia.

### C. Subestación eléctrica.

El **cuadro 4.6** nos muestra las características de la subestación eléctrica.

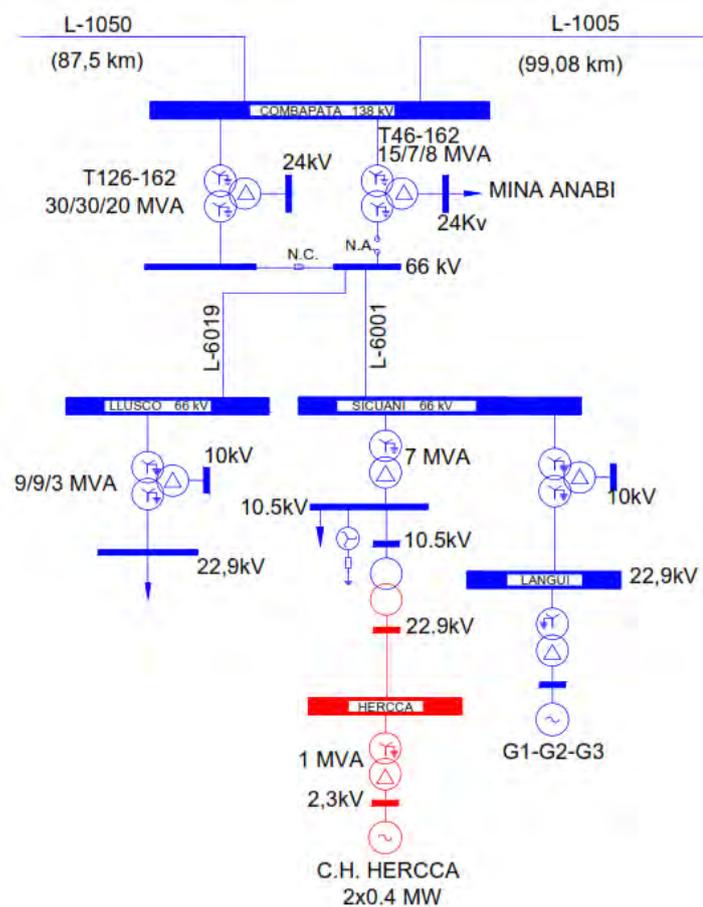
**Cuadro 4.6** Características técnicas subestación.

Subestación	
Numero Transformadores	: 01
Potencia	: 1.10 MVA
Tensión	: 2.3/10.0 V

Fuente: *Elaboración propia.*

#### 4.3. Modelamiento matemático del sistema de excitación.

La **figura 4.10** nos muestra el diagrama unifilar del sistema eléctrico de la Micro central Hidroeléctrica de Hercca.



**Figura 4.10** Diagrama unifilar del sistema eléctrico de la Micro central Hidroeléctrica de Hercca.

Fuente: *Comité de Operación Económica del Sistema (COES).*

En la operación de las centrales hidroeléctricas el objetivo del regulador de tensión es mantener constante el voltaje en los terminales de la máquina generadora o barra de generación. En el valor mantenido por el operador y debe ser capaz de mantener una determinada relación entre el voltaje y carga reactiva en toda la región de operación.

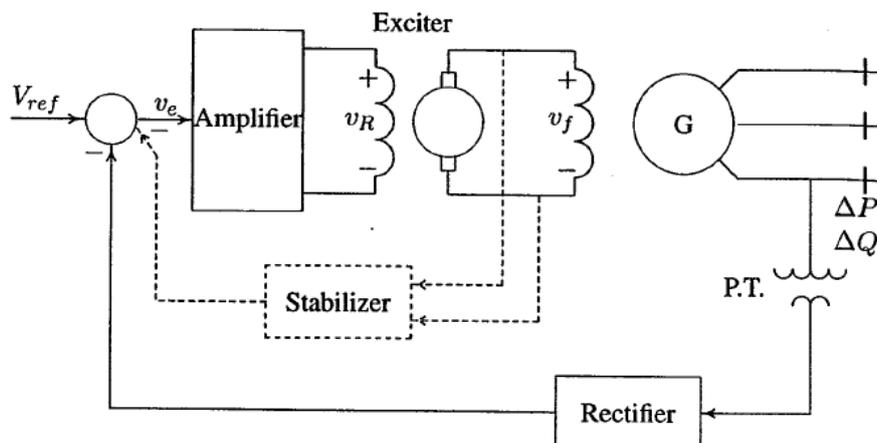
Por otro lado, se debe regular la potencia reactiva entre las máquinas que operan en paralelo, particularmente cuando estas están conectadas a una misma barra generando a tensión común. (Prabha Kundur 1994)

Para una mejor comprensión de la propuesta desarrollaremos el modelo matemático del sistema de regulación de tensión de la micro central hidroeléctrica de Hercca.

#### 4.3.1. Amplificador rotativo.

Un amplificador rotativo típico es en general representado por una función de transferencia de primer orden cuya ganancia está representado por  $K_A$  y cuya constante de tiempo será denotada por  $T_A$ .

En general  $10 < K_A < 400$  y  $0.02 < T_A < 0.1$  es necesario que, en el módulo, sean considerados los límites máximos y mínimos sobre la salida del amplificador de modo que grandes señales de error en la entrada del regulador no produzcan caídas que excedan los límites prácticos. Como podemos observar en la **figura 4.11**



**Figura 4.11** Esquema del amplificador rotativo.

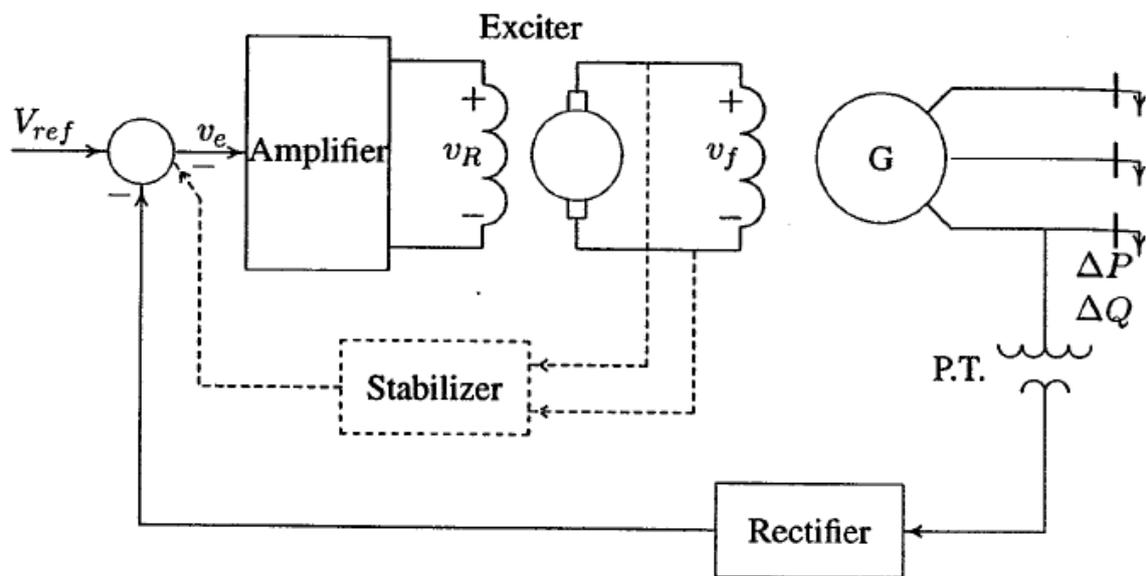
Fuente: Prabha Kundur, 1994.



1. En un plano superponer la característica en vacío y la característica del entrehierro.
2. En el eje de las ordenadas trazar el vector  $U$ , que es la tensión nominal en bornes de generación.
3. Desde el vértice de la tensión nominal trazar el vector  $E_P$  (tensión de Pottier con un ángulo igual al del factor de potencia,  $E_P$ ).
4. De la composición de  $U$  y  $E_P$  se obtiene  $E$ , que es la tensión de excitación.
5. Del vértice de  $U$ , se proyecta una recta paralela al eje de las abscisas.
6. El vector  $E_P$  se hace girar hasta estar en paralelo con  $U$ , de cuyo vértice también se proyecta una recta similar al caso anterior.
7. En la intersección de la característica en vacío y la proyección desde el vértice de  $E_P$ , se traza una paralela a la recta característica del entrehierro.
8. Desde esta intersección se traza una recta que debe intersectar a la proyección del vértice de  $U$ , pero debe formar un ángulo recto.
9. De estas intersecciones se obtienen los segmentos  $a = I_{ex}$  no saturada;  $b = I_{ex}$  saturada;  $c = I_{cc}$  saturada.
10. Ahora se proyecta el segmento  $a$  sobre el eje de las abscisas; a partir de este vértice se proyecta el segmento  $c$  con un ángulo  $f$  igual al factor de potencia formado con la vertical, en la misma dirección se traza el segmento de magnitud  $b$ .
11. Finalmente, la suma de  $a$  y  $b$  se hace girar sobre el eje de las abscisas, las que adicionadas al segmento  $a$  constituyen la corriente de excitación.

Podemos observar en la **figura 4.13** la función de transferencia del sistema de excitación.

Figura 4.13 Sistema de excitación.



Fuente: Prabha Kundur, 1994.

Función de transferencia del sistema de excitación.

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{k_E}{1 + T_E s} \quad 4.2$$

Para:

$$0.05 \leq T_E \leq 0.10 \quad 4.3$$

Función de transferencia del sensor.

$$\frac{V_S(s)}{V_t(s)} = \frac{k_R}{1 + sT_R} \quad 4.4$$

Para:

$$0.01 \leq T_R \leq 0.06 \quad 4.5$$

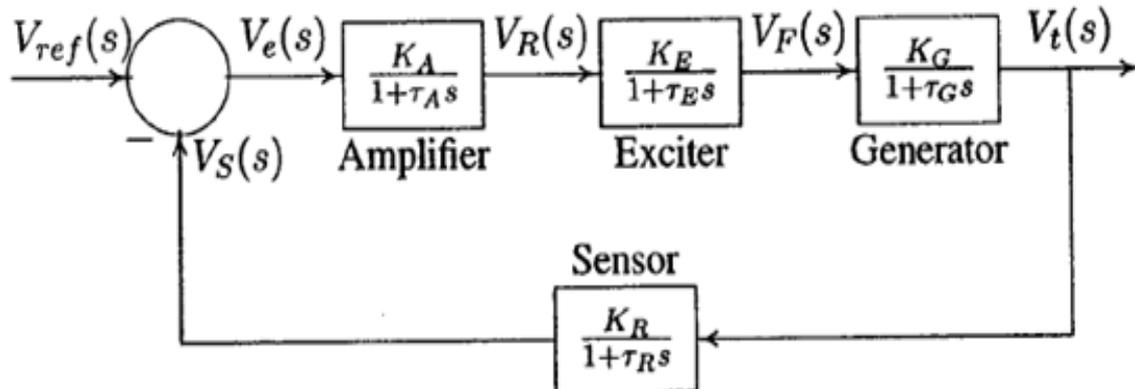
#### 4.3.3. Sistema de generación.

Según la demostración realizada en el capítulo 3, ítems 3.4, la función de transferencia se representa según la ecuación 4.6:

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{k_g}{1 + sT_g} \quad 4.6$$

#### 4.4. Modelo del regulador de tensión automático.

La **figura 4.14** nos muestra el diagrama de bloques del modelo matemático de regulación de tensión.



**Figura 4.14** Diagrama de bloques del modelo matemático del regulador de tensión.

*Fuente: Elgerd, 1970*

##### 4.4.1. Datos de los componentes de regulación de tensión.

El **cuadro 4.7** nos muestra los valores de los componentes del regulador de tensión.

**Cuadro 4.7** Datos de los componentes del regulador de tensión.

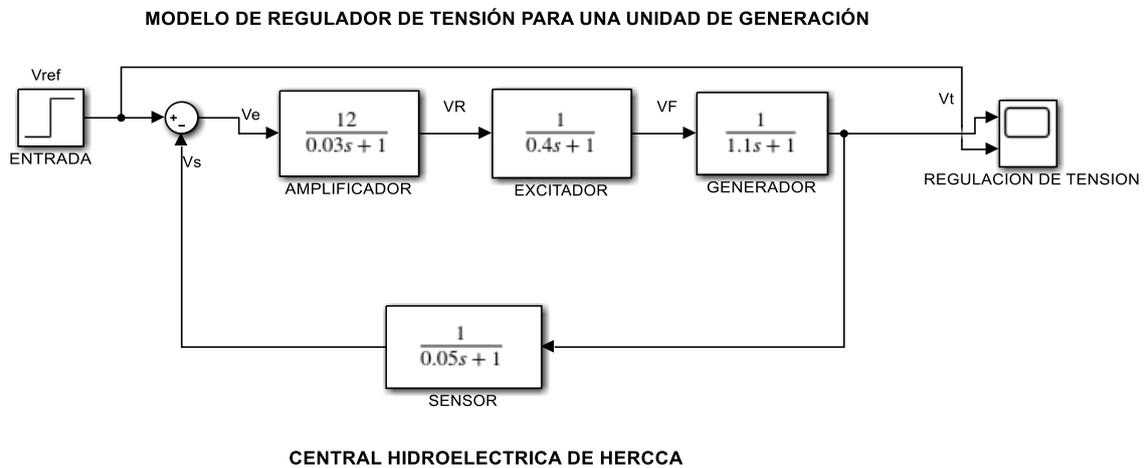
SISTEMA DE:	GANANCIA	TIEMPO CONSTANTE
AMPLIFICADOR	$K_A = 12.16$ y $5$	$T_a = 0.1$
EXCITATRIZ	$K_E = 1$	$T_e = 0.4$
GENERADOR	$K_G = 1$	$T_G = 1.0$
SENSOR	$K_R = 1$	$T_R = 0.05$

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.5. Modelo implementado en el Simulink del Matlab.

##### 4.5.1. Modelo implementado sin controlador PID.

La **figura 4.15** nos muestra el diagrama de bloques implementado en Matlab sin el controlador PID.

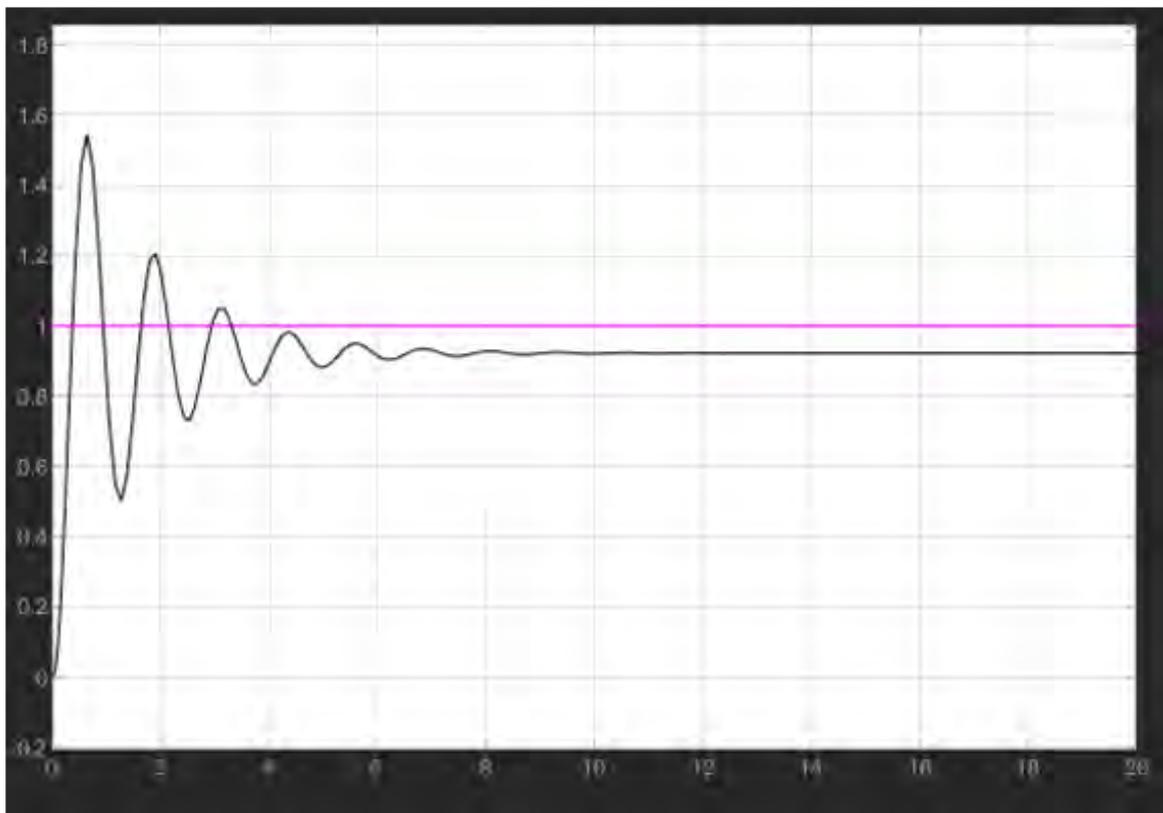


**Figura 4.15** Diagrama implementado en Matlab.

*Fuente: Elaboración propia.*

##### 4.5.1.1. Salida de tensión sin PID.

La **Grafico 4.1** nos muestra la tensión de salida sin el controlador PID.

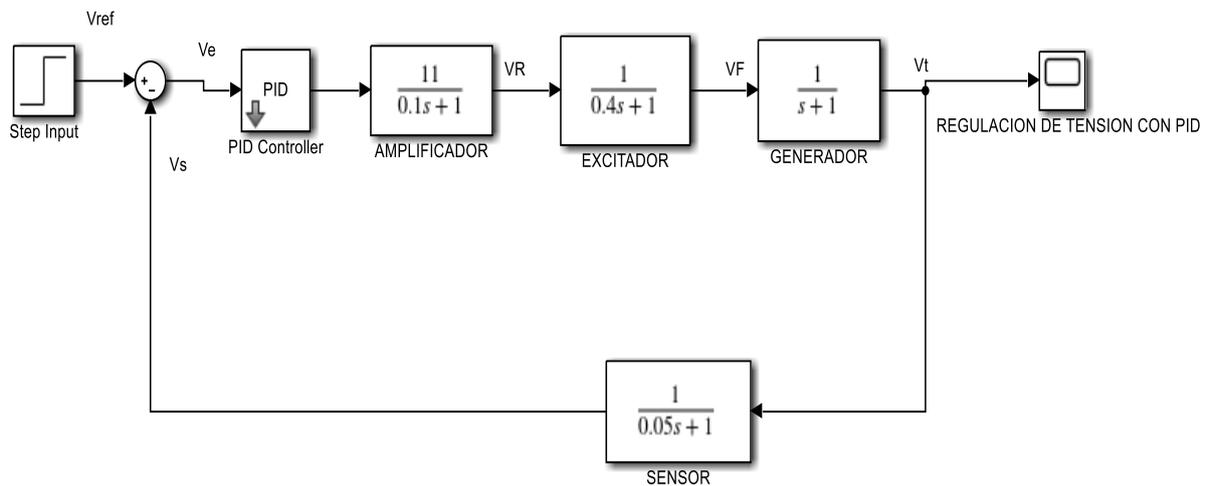


**Gráfico 4.1** Salida de la amplitud de la tensión con respecto a la referencia.

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.5.2. Modelo implementado con controlador PID.

Con la finalidad de mejorar el desempeño del sistema de regulación de tensión de la micro central hidroeléctrica de Hercca, proponemos implementar un controlador proporcional, integral, derivativo PID, como se muestra a continuación. La **figura 4.15** nos muestra el diagrama de bloques implementado en Matlab Con el controlador PID.



**Figura 4.16** Modelo con controlador PID

*Fuente: Elaboración propia.*

##### 4.5.2.1. Parámetros considerados controlador PID.

El **Cuadro 4.8** nos muestra los parámetros a considerar cuando se usa el Controlador PID.

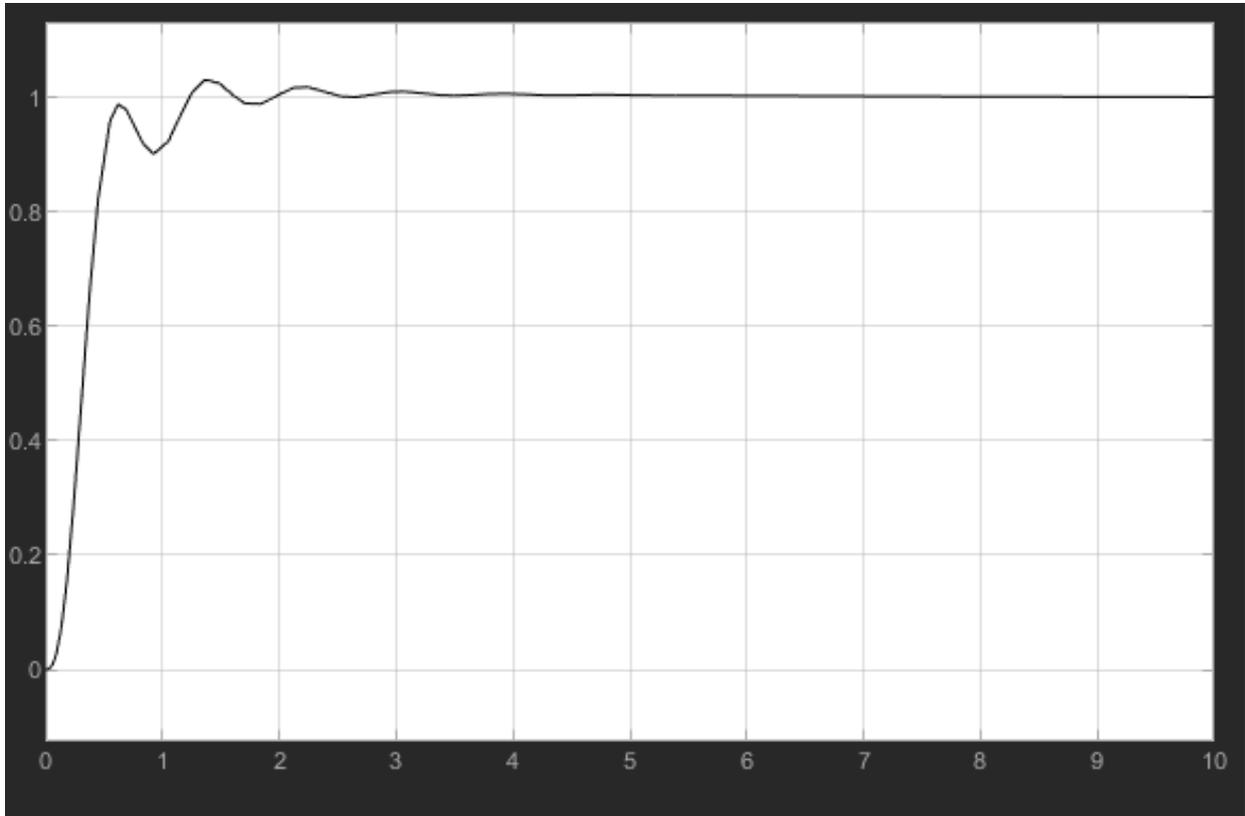
**Cuadro 4.8** Parámetros considerados controlador PID.

	<b>GANANCIA</b>
<b>PROPORCIONAL</b>	$K_P = 1.0$
<b>INTEGRADOR</b>	$K_I = 0.25$
<b>DERIVATIVO</b>	$K_D = 0.28$

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.5.2.2. Salida de tensión con PID.

La **Grafico 4.2** nos muestra la tensión de salida Con el controlador PID.



**Gráfico 4.2** Resultados del comportamiento de la tensión con controlador PID.

*Fuente: Elaboración propia.*

## CONCLUSIONES, SUGERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍAS

### CONCLUSIONES

1. Se ha logrado modelar el sistema de regulación secundario para la muestra micro central eléctrica de Hercca, por lo tanto, se puede implementar en las micro centrales de la región del Cusco. El modelo se ha implantado en el software Matlab (Simulink), demostrando así, que existe causalidad de la incidencia de la inyección de potencia y su estabilidad.

2. Se demostraron modelos para representar el comportamiento del sistema de regulación secundaria o de tensión en la micro hidro generación que se adecúen correctamente a sus características operativas. En cuanto, uno de los sistemas de compensación más sencillos para estabilizar el régimen dinámico consiste en añadir al bucle de regulación un elemento en serie en adelanto de fase. Por otra parte, añadir el controlador o regulador PID compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa y que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado, por lo que las condiciones de operación influyen en su estabilidad de tensión.

3. Se ha desarrollado un modelo simplificado para representar la regulación secundaria o de tensión frente a la dinámica del sistema de excitación del generador en la micro hidro generación. En tanto, este modelo se desarrolló en el software Matlab, para dos casos: Con la implementación de un modelo sin PID y con PID o controlador proporcional, integral, derivativo, siendo el segundo modelo el más adecuado y con la mejor respuesta en cuanto al desempeño del sistema de regulación de tensión, es decir, se logró obtener una mejor respuesta oscilatoria frente a la señal de salida de la central hidroeléctrica de Hercca ya que este modelo simplificado tiene mejor control en la dinámica del sistema de excitación.

## SUGERENCIAS

1. El controlador o regulador PID está compuesta por tres elementos que proporcionan una acción Proporcional (la que logra el control de un estado estacionario), Integral (minimiza el error del estado estacionario) y Derivativa (se visualiza cambios en los errores muy pequeños por la forma matemática que se tiene en el sistema).

2. La respuesta de la ganancia proporcional se obtiene multiplicando el error por una constante  $K_p$ , por lo que, una constante de proporcionalidad muy grande puede ocasionar una salida no deseada incluso volver al sistema inestable, mayor tiempo de estabilización provocado por el sobreamortiguamiento. En síntesis, se encarga del error presente.

3. La parte integral del PID, utiliza la pendiente de la curva característica generado por el sistema o cambio de error en un momento dado. Esta parte predice el tiempo el tiempo futuro y la estabilidad del sistema. Al acelerar el sistema, se puede generar grandes perturbaciones. Es decir, se encarga de analizar errores pasados para intentar llevar el sistema a una estabilización

4. Finalmente, la parte derivativa se encarga de manejar los errores hacia el futuro. Es decir, intentar predecir el error.

## BIBLIOGRAFÍA

[1]. V. Alfaro (2022). Ecuaciones para controladores PID universales, Ingeniería, Revista de la Universidad de Costa Rica, Vol. 12, N°. 1-2, pp. 11-20.

[2]. Erik Hernández Martínez (2017). Diseño de un filtro digital para un sistema no lineal controlado por un PID. [Tesis posgrado, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio institucional.

[3]. Marco Vinicio Manchego Latorre (1998). Diseño de un filtro digital para un sistema no lineal controlado por un PID. [Tesis pregrado, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio institucional.

[4]. Jorge Andrés Carrera Orellana (2011). Modernización del Sistema de Regulación de Velocidad en la Central Hidroeléctrica Carlos Mora. [Tesis pregrado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. Repositorio institucional.

[5]. David Vaglio Calvo (2010). Determinación del Lazo de regulación de velocidad de la planta Hidroeléctrica “La Joya”. [Tesis pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio institucional.

[6]. Pablo Alberto Jiménez Pinto (2013). Modelamiento y Control de una Central Micro Hidráulica. [Tesis pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional.

[7]. Th. Buchhold, Hans Happoldt (1974). Centrales y redes eléctricas (3ªed). **Barcelona**, España: Edit.Labor

[8]. Olle I. Elgerd (1970). Electric Energy Systems Theory An Introduction (2ªed). **New York**, United States of America: McGraw-Hill

[9]. Prabha Kundur (1994). Power System Satability and Control (1ªed). **New York**, United States of America: McGraw-Hill

[10]. Gudencio Zopetti Judez (2004). Centrales Hidroeléctricas (4ªed). Barcelona, España:Gustavo Gili

[11]. Giuseppe Fusco, Mario Russo (2007). Adaptive Voltage Control in Power Systems (1ªed). London, United Kingdom:Springer

[12]. Juan Carlos Nizama Valdez (2013). Control Digital de la Excitación de un Generador Síncrono. [Tesis pregrado, Universidad de Piura]. Repositorio institucional.

[13]. Ministerio De Energía Y Minas (2011). Norma Técnica De Calidad De Los Servicios Eléctricos, Incluye modificaciones según Decreto Supremo N° 009-99-EM (1999-04-11), título sexto.

[14]. Ministerio De Energía Y Minas - D. Rección General De Electricidad. (1993). Decreto Ley No 25844. Ley De Concesiones Eléctricas Y Reglamento, y Decreto Supremo No 009-93-EM.

[15]. OSINEGMIN. (modificaciones publicadas 2012). Procedimiento para la Supervisión de la Operación de los Sistemas Eléctricos 074-2004-OS/CD, calidad de los servicios eléctricos.

[16]. Matlab User's Guide Version 7.13 (Release 2011a) from The MatWorks.  
<http://www.matworks.com>

[17]. Simulink User's Guide from The MatWorks. <http://www.matworks.com>

## ANEXOS DE LA TESIS.

### 1. Espacios de trabajo en MATLAB.

- ✓ **Anexo 1** Entorno del MATLAB (MATLAB Desktop).
- ✓ **Anexo 2** Ventana de comandos del MATLAB (Command Windows).
- ✓ **Anexo 3** Historial de comandos ejecutados en MATLAB (Command History).
- ✓ **Anexo 4** Espacio de trabajo en MATLAB (Workspace).
- ✓ **Anexo 5** Editor de matriz del MATLAB (Array Editor).
- ✓ **Anexo 6** Directorio activo del MATLAB. (Current Folder).
- ✓ **Anexo 7** Creador y depurador de archivos del MATLAB (Editor & Debugger).
- ✓ **Anexo 8** Entorno de ayuda en MATLAB (Help).
- ✓ **Anexo 9** Tiempo de ejecución de la CPU en MATLAB (Profiler).

### 2. Lenguaje de programación implementado y los resultados de las simulaciones.

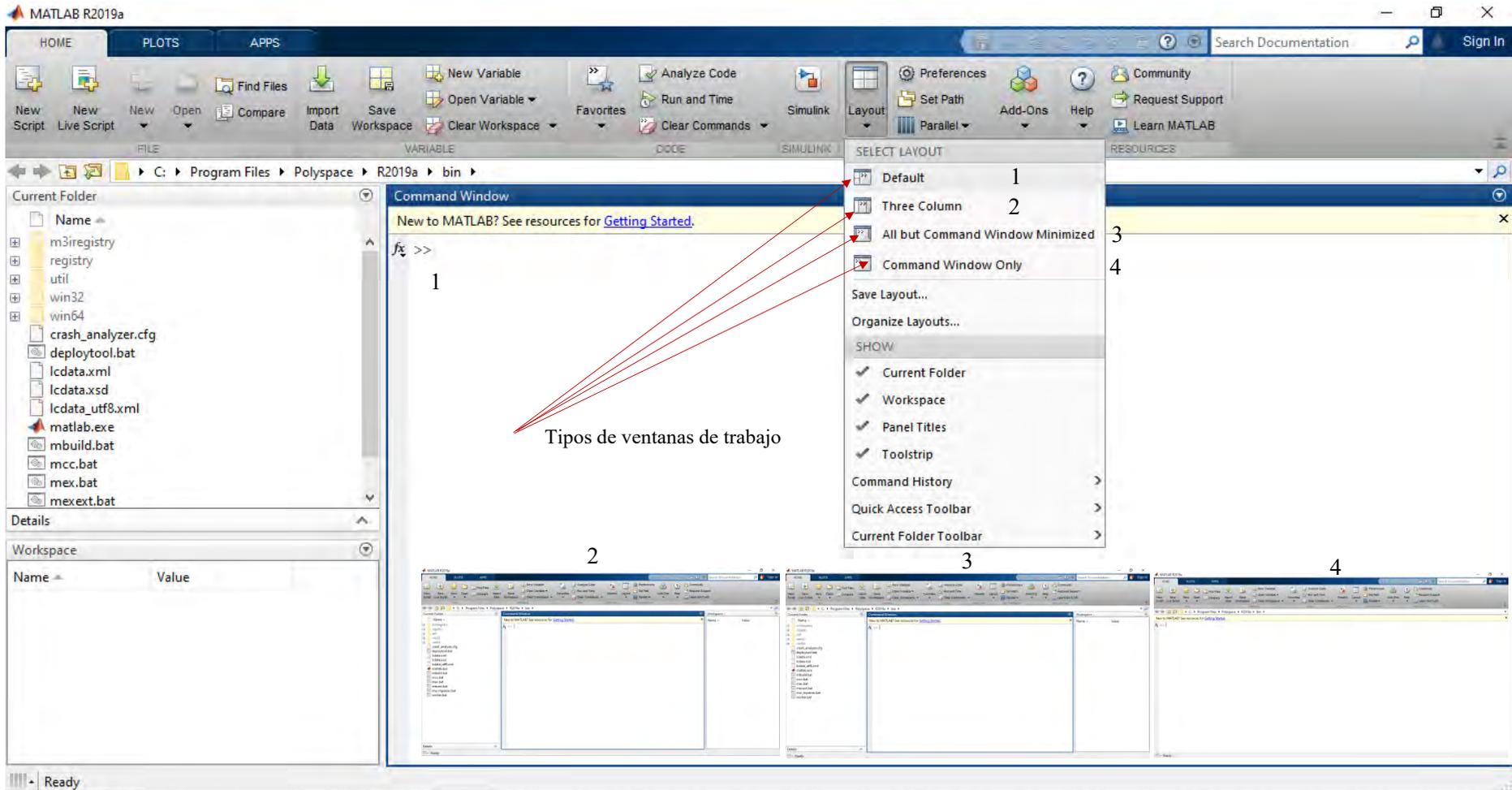
- ✓ **Anexo 10** Implementación del lenguaje de programación ejemplo 1.
- ✓ **Anexo 11** Resultado de gráfica caso 1.
- ✓ **Anexo 12** Resultado de gráfica caso 2.
- ✓ **Anexo 13** Implementación del lenguaje de programación ejemplo 2.
- ✓ **Anexo 14** Respuesta del bucle de regulación AVR en régimen transitorio.
- ✓ **Anexo 15** Implementación del modelo en Simulink ejemplo 3.
- ✓ **Anexo 16** Resultado de gráfica caso 3.
- ✓ **Anexo 17** Implementación del modelo en Simulink ejemplo 4.
- ✓ **Anexo 18** Resultado de gráfica caso 4.

### 3. Resumen Informativo y Reportes.

- ✓ **Anexo 19** Resumen de Centrales Hidroeléctricas.
- ✓ **Anexo 20** Reporte de interrupciones del COES-SINAC.

**Anexo 1.** Entorno del MATLAB (MATLAB Desktop).

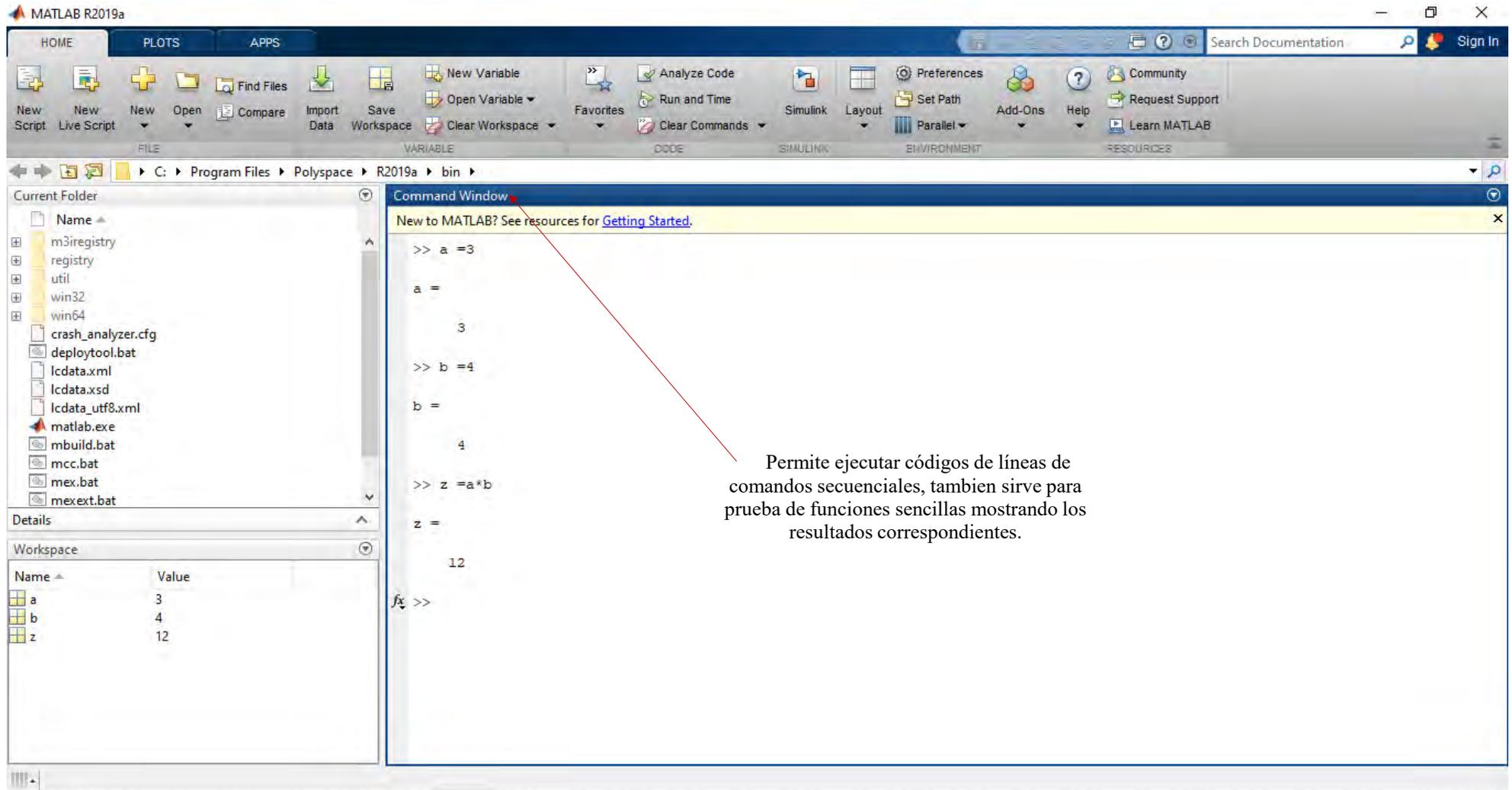
La **Figura 1** (Anexos) muestra el Entorno del MATLAB.



**Figura 2** (Anexos) Entorno del MATLAB.

## Anexo 2. Ventana de comandos del MATLAB (Command Windows).

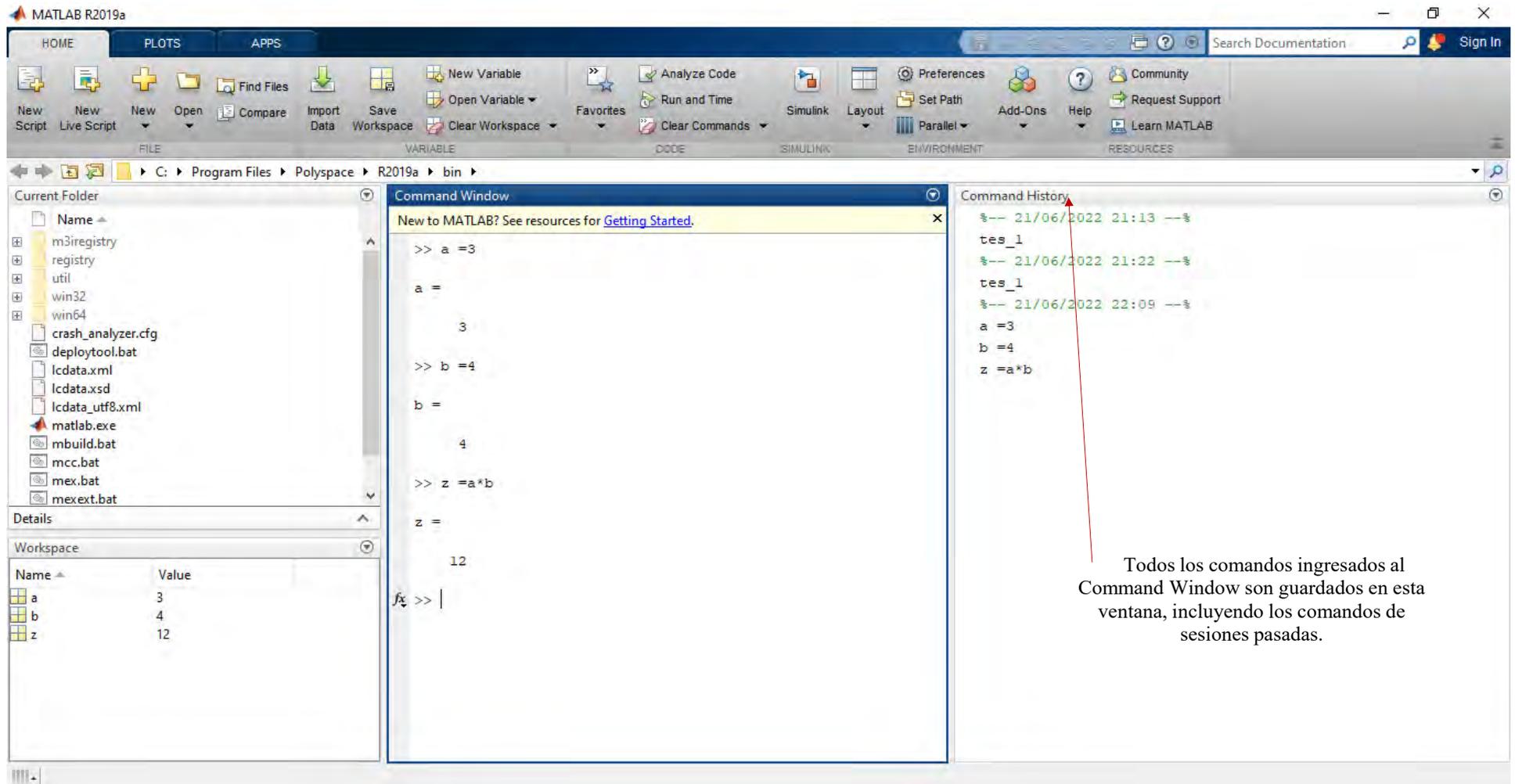
La **Figura 2** (Anexos) muestra la Ventana de comandos del MATLAB.



**Figura 3** (Anexos) Ventana de comandos del MATLAB.

### Anexo 3. Historial de comandos ejecutados en MATLAB (Command History).

La **Figura 3** (Anexos) muestra el Historial de comandos ejecutados en MATLAB

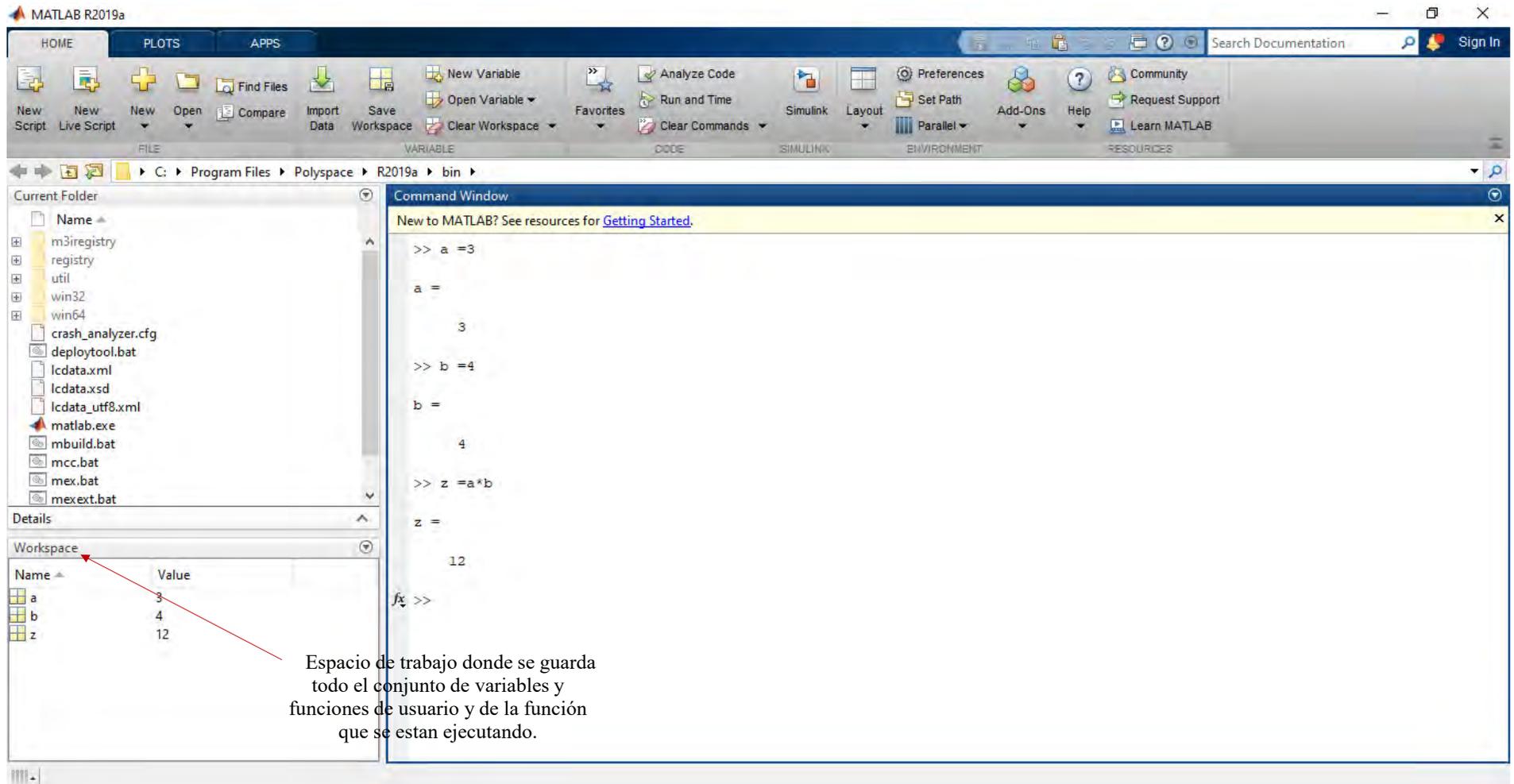


Todos los comandos ingresados al Command Window son guardados en esta ventana, incluyendo los comandos de sesiones pasadas.

**Figura 4** (Anexos) Historial de comandos ejecutados en MATLAB.

#### Anexo 4. espacio de trabajo en MATLAB (Works pace).

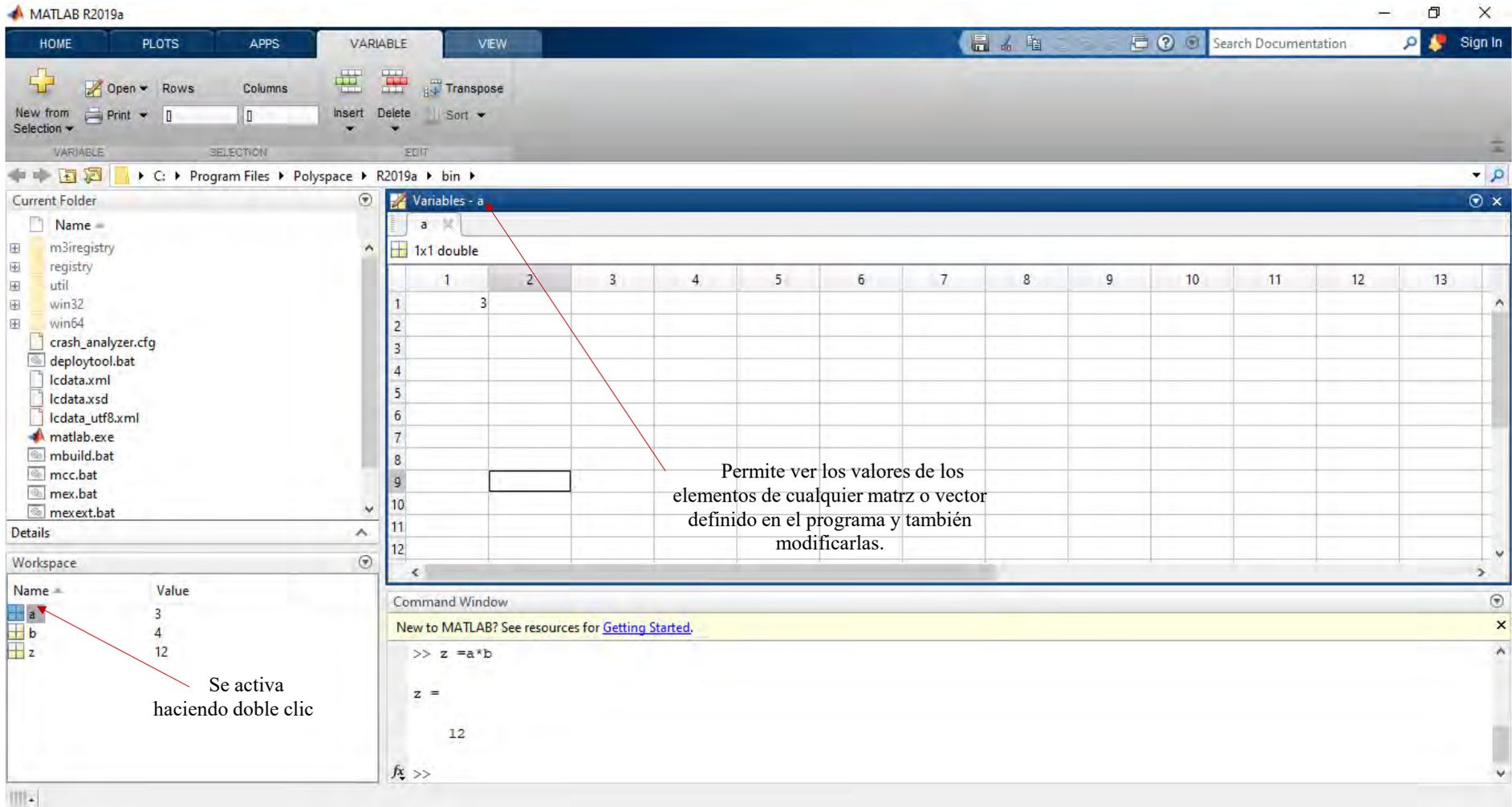
La **Figura 4** (Anexos) muestra el Espacio de trabajo en MATLAB



**Figura 5** (Anexos) Espacio de trabajo en MATLAB.

## Anexo 5. Editor de matriz del MATLAB (Array Editor).

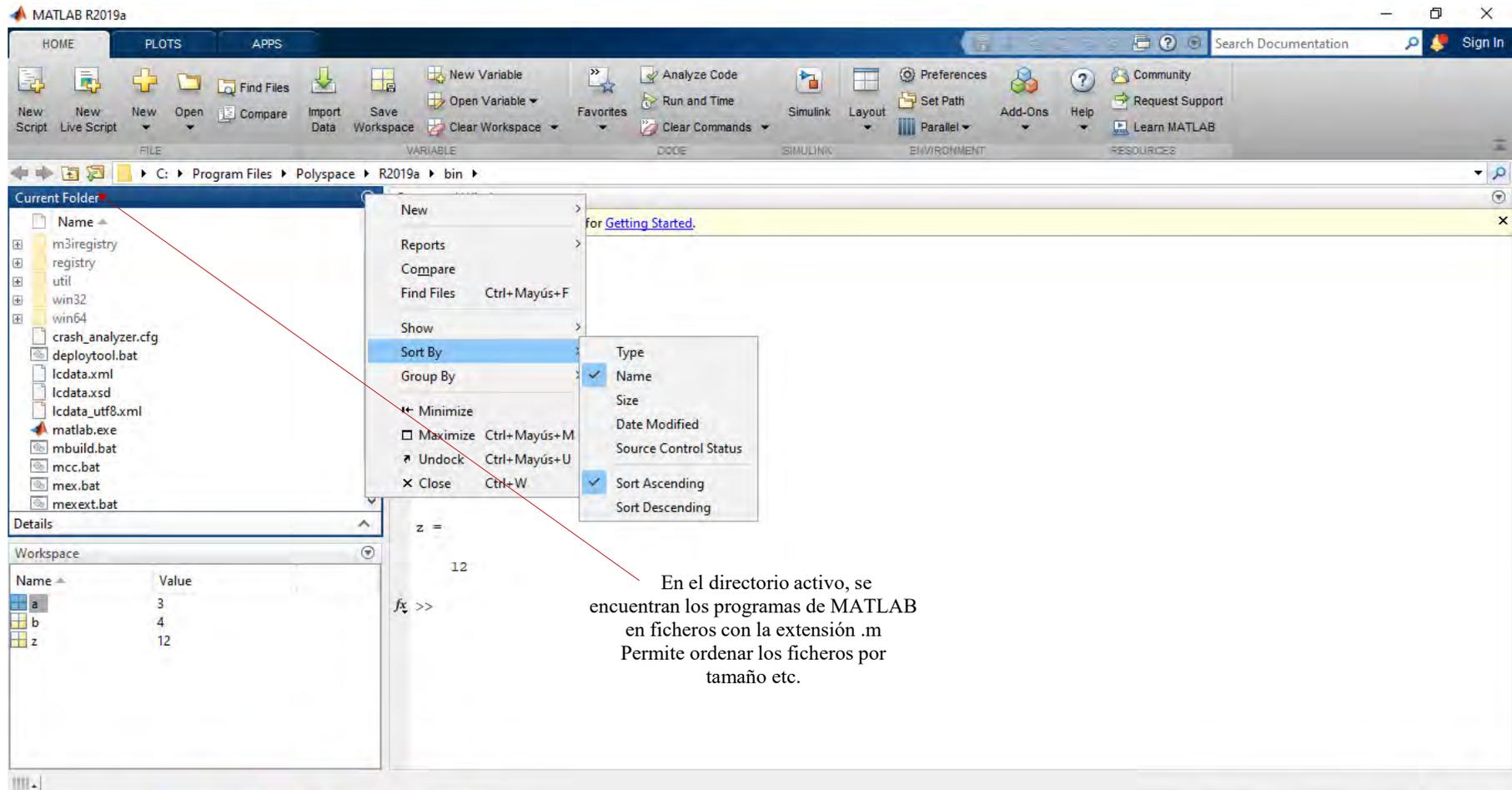
La **Figura 5** (Anexos) muestra el Editor de matriz del MATLAB



**Figura 6** (Anexos) Editor de matriz del MATLAB.

Anexo 6. Directorio activo del MATLAB. (Current Folder).

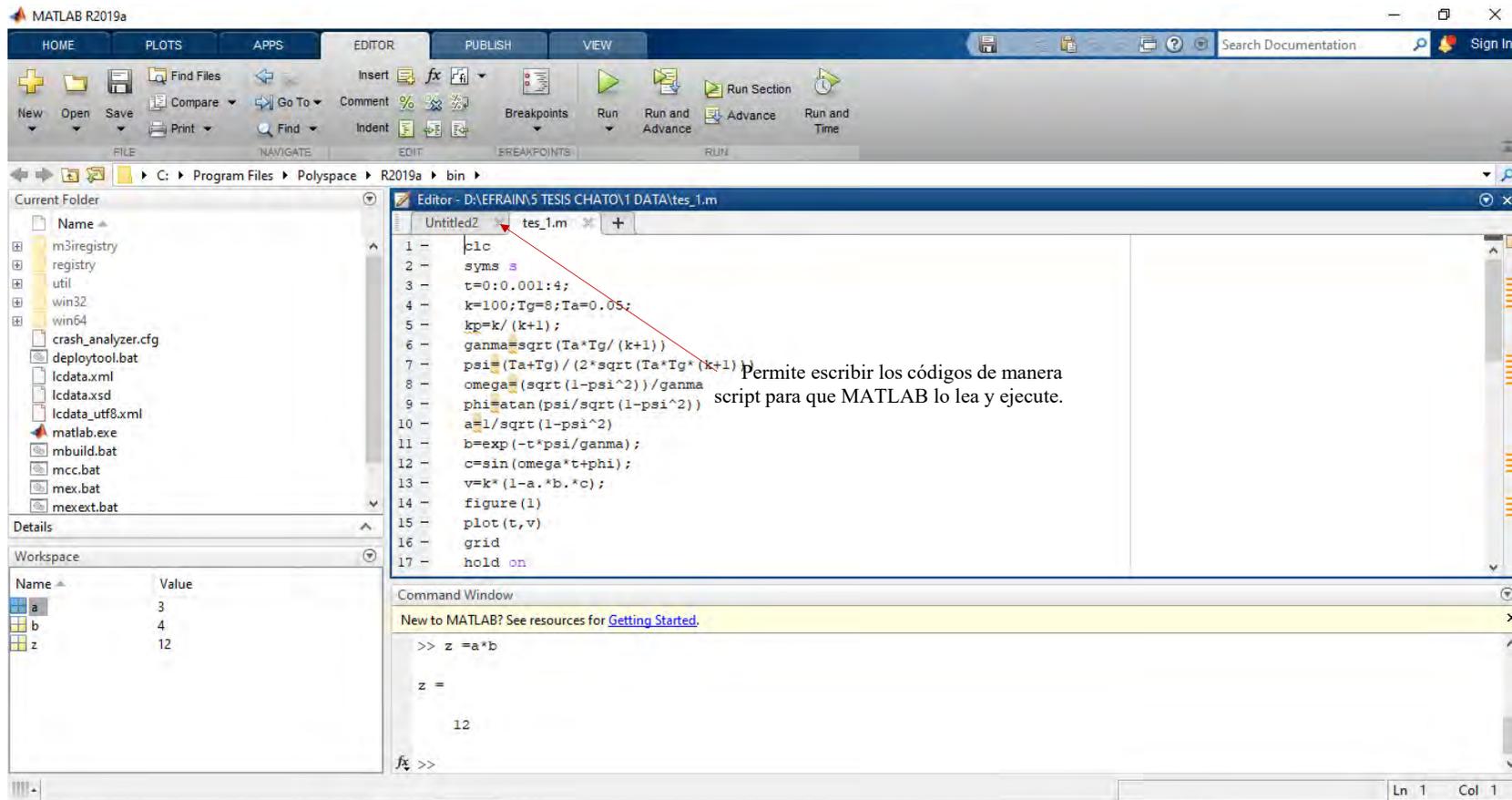
La **Figura 6** (Anexos) muestra el Directorio activo del MATLAB



**Figura 7 (Anexos) Directorio activo del MATLAB**

## Anexo 7 Creador y depurador de archivos del MATLAB (Editor & Debugger).

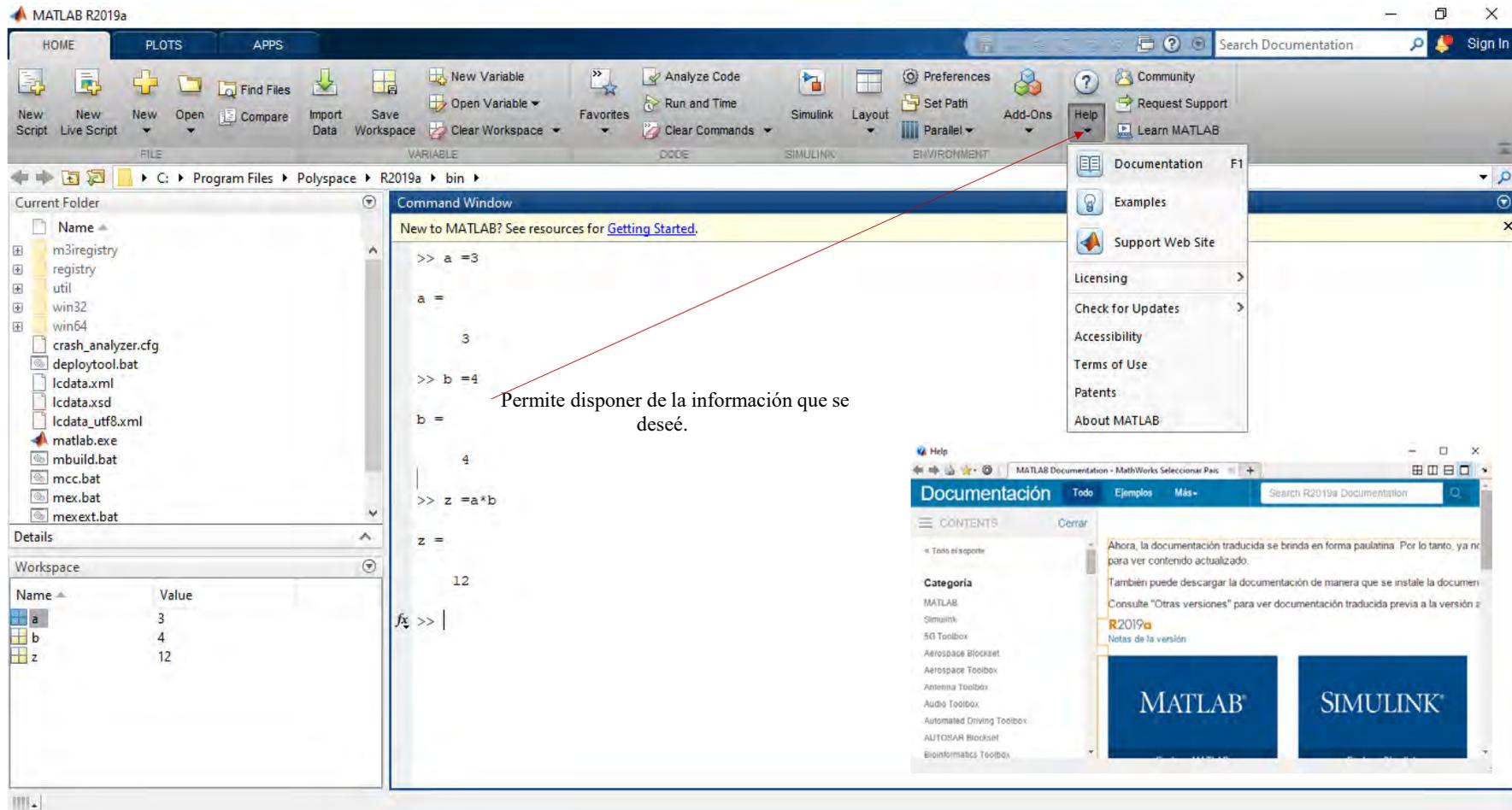
La **Figura 7** (Anexos) muestra el Creador y depurador de archivos del MATLAB



**Figura 8** (Anexos) Creador y depurador de archivos del MATLAB.

## Anexo 8. Entorno de ayuda en MATLAB (Help).

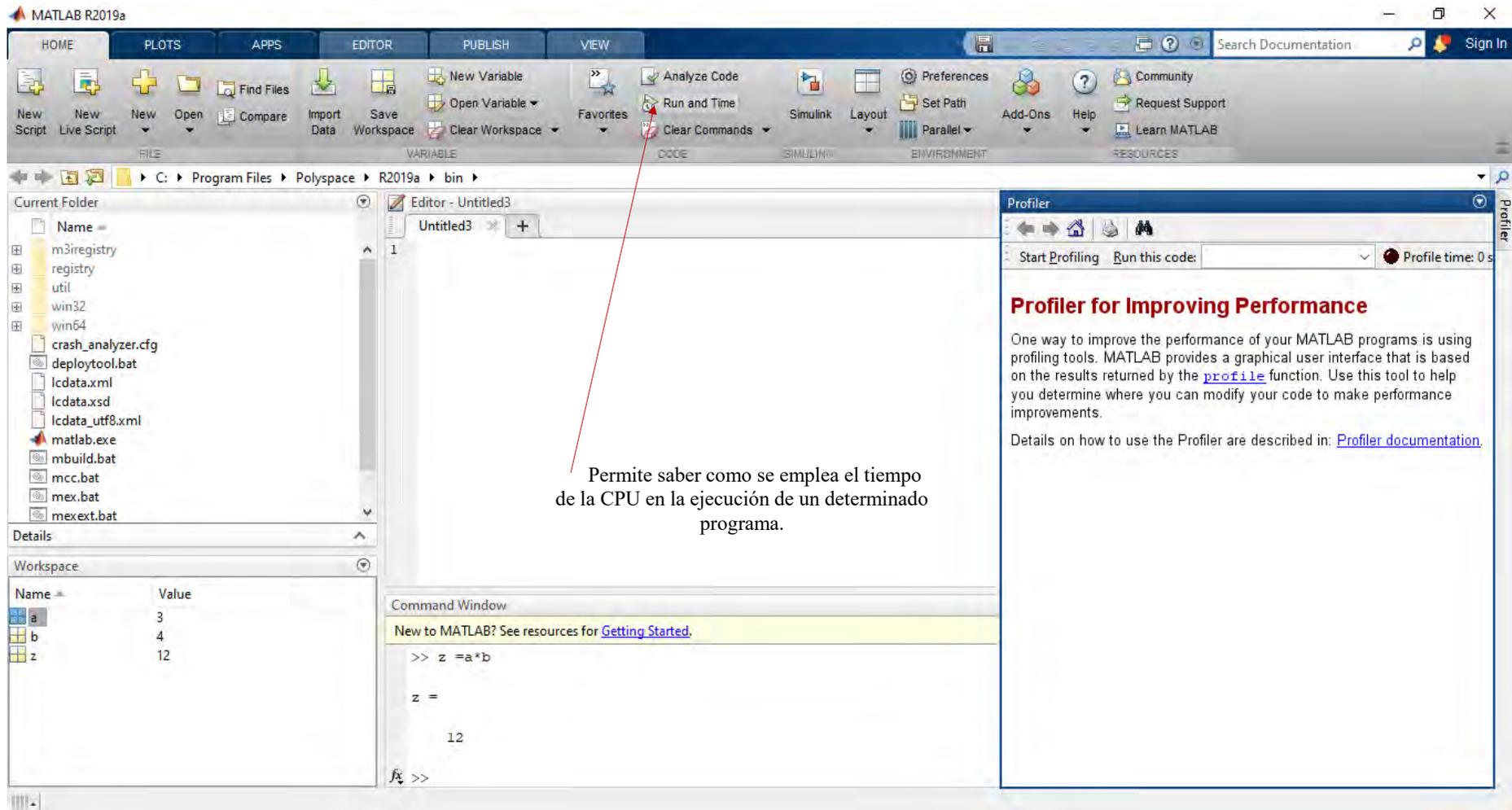
La **Figura 8** (Anexos) muestra el Entorno de ayuda en MATLAB



**Figura 9** (Anexos) Entorno de ayuda en MATLAB.

## Anexo 9. Tiempo de ejecución de la CPU en MATLAB (Profiler).

La **Figura 9** (Anexos) muestra el Tiempo de ejecución de la CPU en MATLAB



**Figura 10** (Anexos) Tiempo de ejecución de la CPU en MATLAB.

## Anexo 10. Implementación del lenguaje de programación ejemplo 1.

La **Figura 10** (Anexos) muestra el Implementación del lenguaje de programación ejemplo 1.

Respuesta temporal de la tensión de salida y su estabilización en régimen dinámico para el caso 1 y 2.

<pre> CASO 01 K   = 100      ; T<sub>g</sub>   = 8 s   ; T<sub>a</sub>   = 0.05 s  CASO 02 K   = 100      : T<sub>g</sub>   = 6 s   ; T<sub>a</sub>   = 0.60 s </pre>
---

**Figura 11 (Anexos)** Implementación del lenguaje de programación ejemplo 1.

Lenguaje de programación implementado en Matlab.

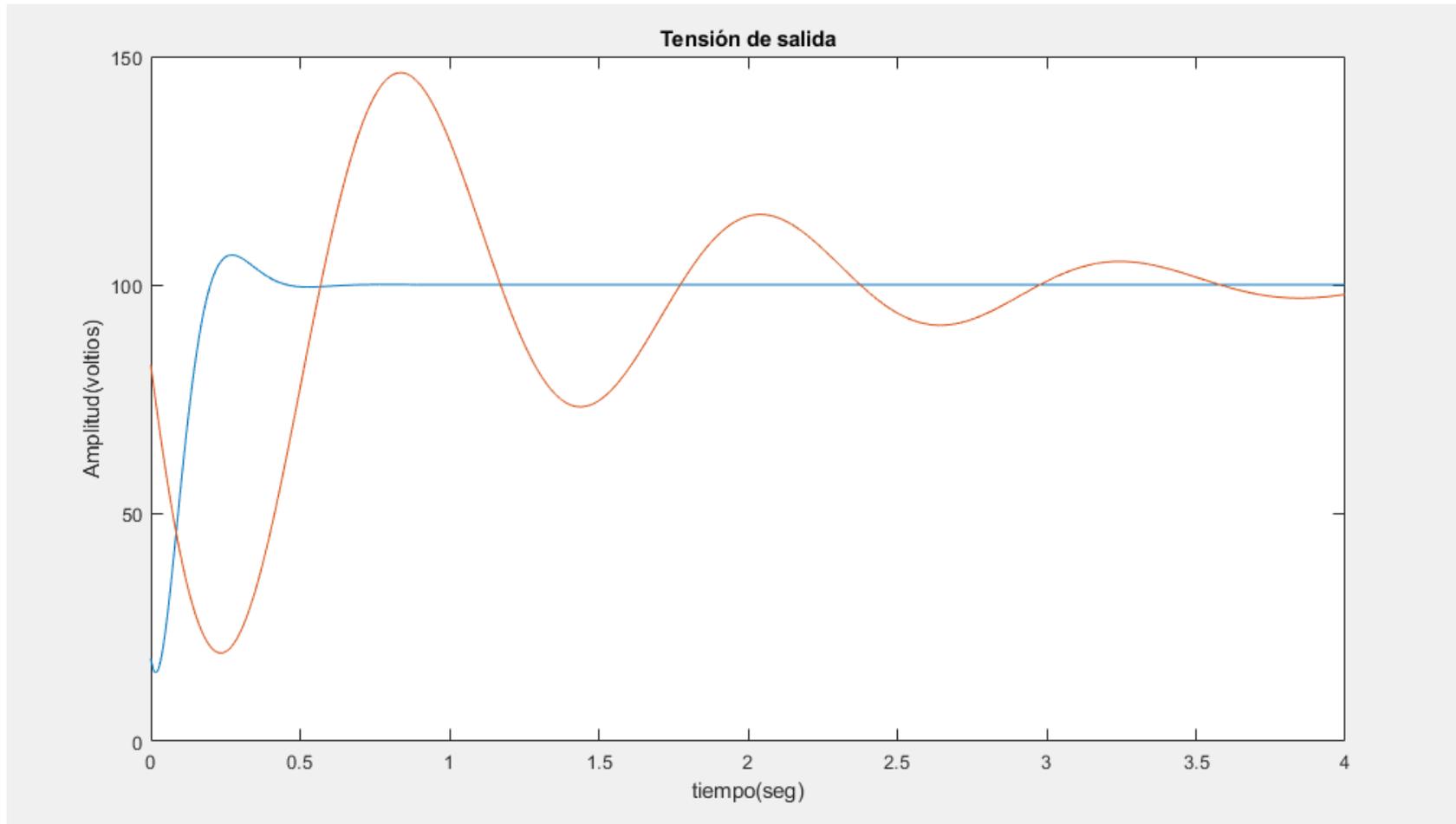
```

clc
syms s
t=0:0.001:4;
k=100;Tg=8;Ta=0.05;
kp=k/(k+1);
ganma=sqrt(Ta*Tg/(k+1))
psi=(Ta+Tg)/(2*sqrt(Ta*Tg*(k+1)))
omega=(sqrt(1-psi^2))/ganma
phi=atan(psi/sqrt(1-psi^2))
a=1/sqrt(1-psi^2)
b=exp(-t*psi/ganma);
c=sin(omega*t+phi);
v=k*(1-a.*b.*c);
figure(1)
plot(t,v)
grid
hold on
k=100;Tg=6;Ta=0.6;
kp=k/(k+1);
ganma=sqrt(Ta*Tg/(k+1))
psi=(Ta+Tg)/(2*sqrt(Ta*Tg*(k+1)))
omega=(sqrt(1-psi^2))/ganma
phi=atan(psi/sqrt(1-psi^2))
a=1/sqrt(1-psi^2)
b=exp(-t*psi/ganma);
c=sin(omega*t+phi);
v=k*(1-a.*b.*c);
plot(t,v)
title('Tensión de salida')
xlabel('tiempo(seg)')
ylabel('Amplitud(voltios)')
grid
hold on
figure(2)
k=100;Tg=8;Ta=0.05;
kp=k/(k+1);
ganma=sqrt(Ta*Tg/(k+1))
psi=(Ta+Tg)/(2*sqrt(Ta*Tg*(k+1)))
N=[kp]
D=[ganma^2 2*psi*ganma 1]
step(N,D)
hold on
k=100;Tg=6;Ta=0.6;
kp=k/(k+1);
ganma=sqrt(Ta*Tg/(k+1))
psi=(Ta+Tg)/(2*sqrt(Ta*Tg*(k+1)))
N=[kp]
D=[ganma^2 2*psi*ganma 1]
step(N,D)
grid

```

**Anexo 11** Resultado de gráfica caso 1.

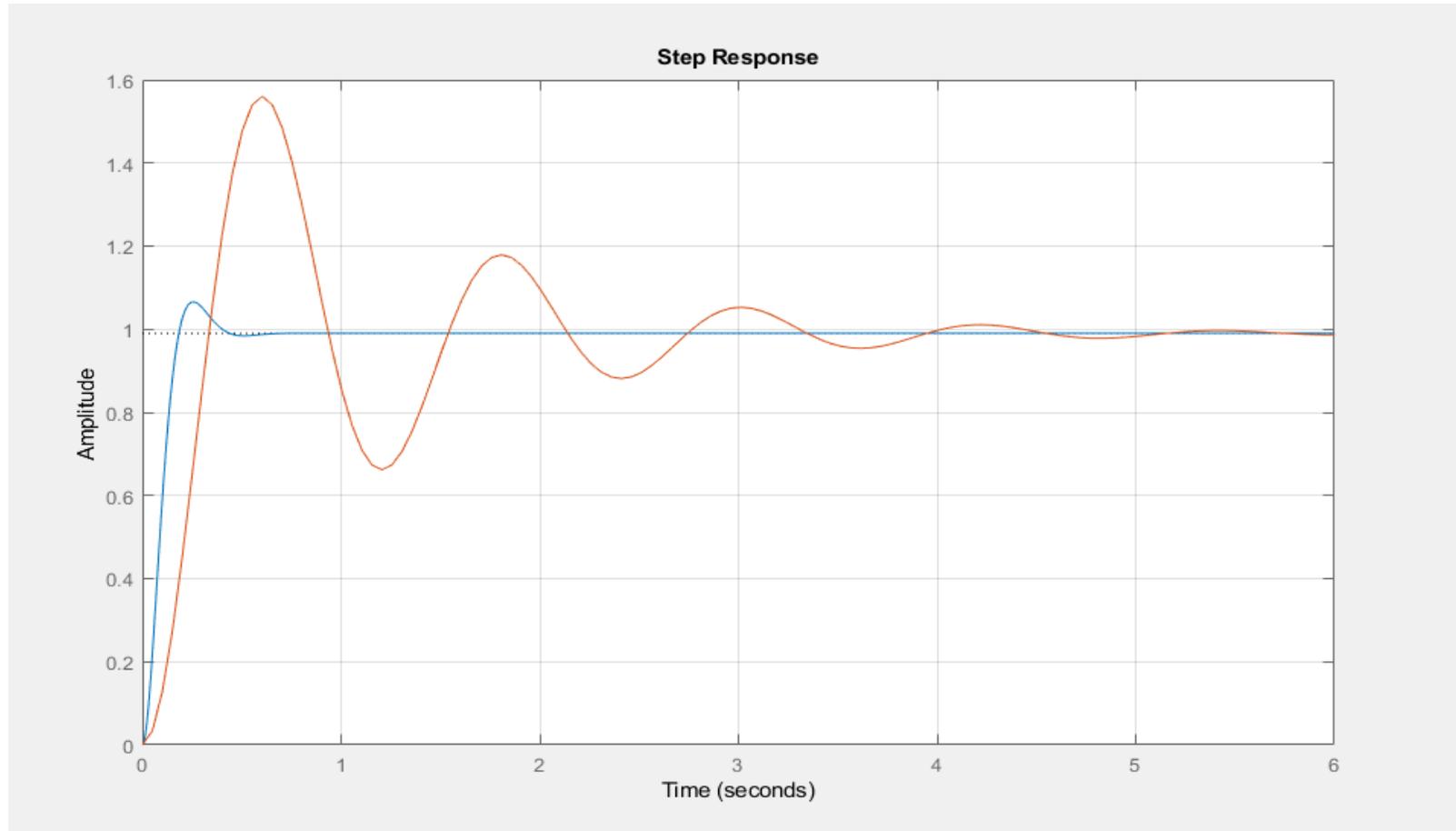
La **Figura 11** (Anexos) muestra la Gráfica de respuesta en régimen dinámico caso 1.



**Figura 12** (Anexos) Gráfica de respuesta en régimen dinámico caso 1.

Anexo 12 Resultado de gráfica caso 2.

La **Figura 12** (Anexos) muestra la Gráfica de respuesta en régimen dinámico caso 2.



**Figura 13** (Anexos) Gráfica de respuesta en régimen dinámico caso 2.

**Anexo 13** Implementación del lenguaje de programación ejemplo 2.

La **Figura 13** (Anexos) muestra la Implementación del lenguaje de programación ejemplo 2.

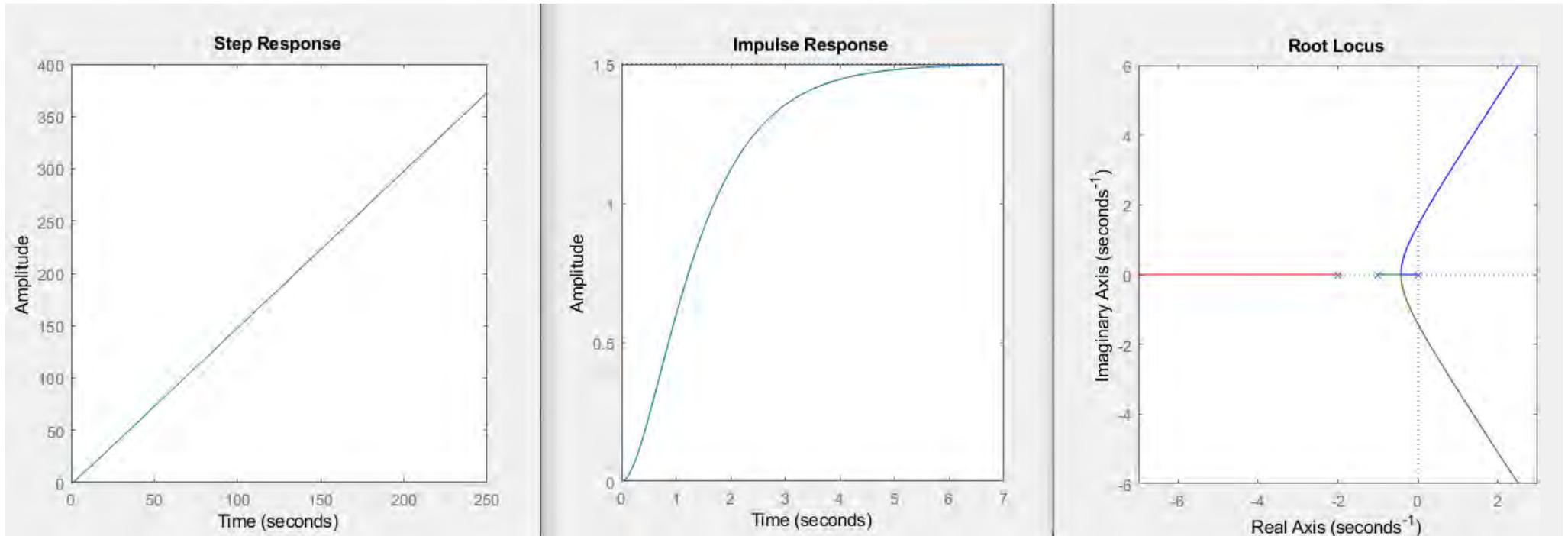
Lenguaje de programación implementado en Matlab.

```
close all
clc
N=[0 0 0 3]
D=[1 3 2 0]
figure(1)
step(N,D)
figure(2)
impulse(N,D)
figure(3)
rlocus(N,D)
```

**Figura 14** (Anexos) Implementación del lenguaje de programación ejemplo 2.

**Anexo 14** Respuesta del bucle de regulación AVR en régimen transitorio.

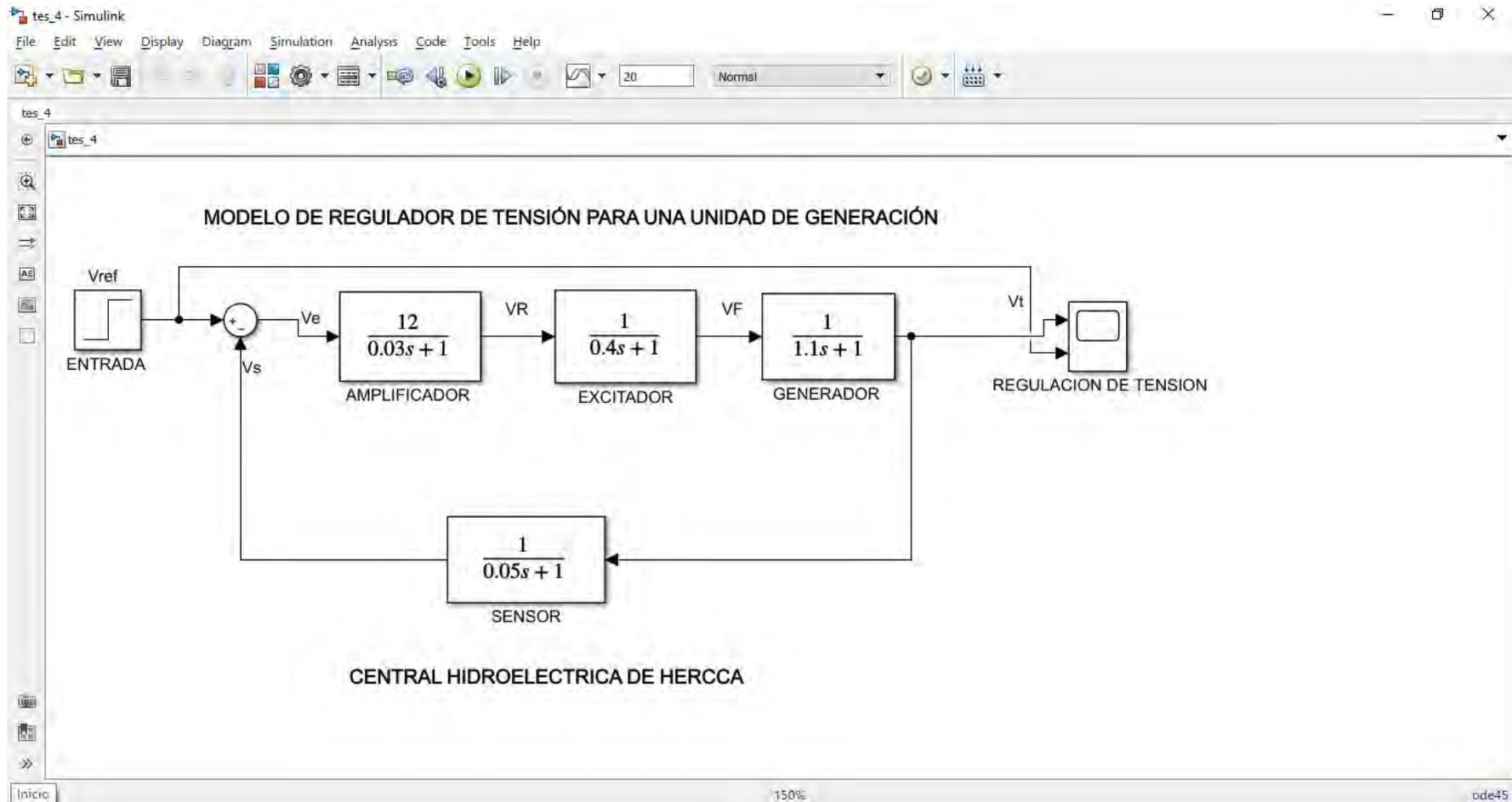
La **Figura 14** (Anexos) muestra la Gráfica de respuesta del bucle de regulación AVR en régimen transitorio.



**Figura 15** (Anexos) Gráfica de respuesta del bucle de regulación AVR en régimen transitorio.

**Anexo 15** Implementación del modelo en Simulink ejemplo 3.

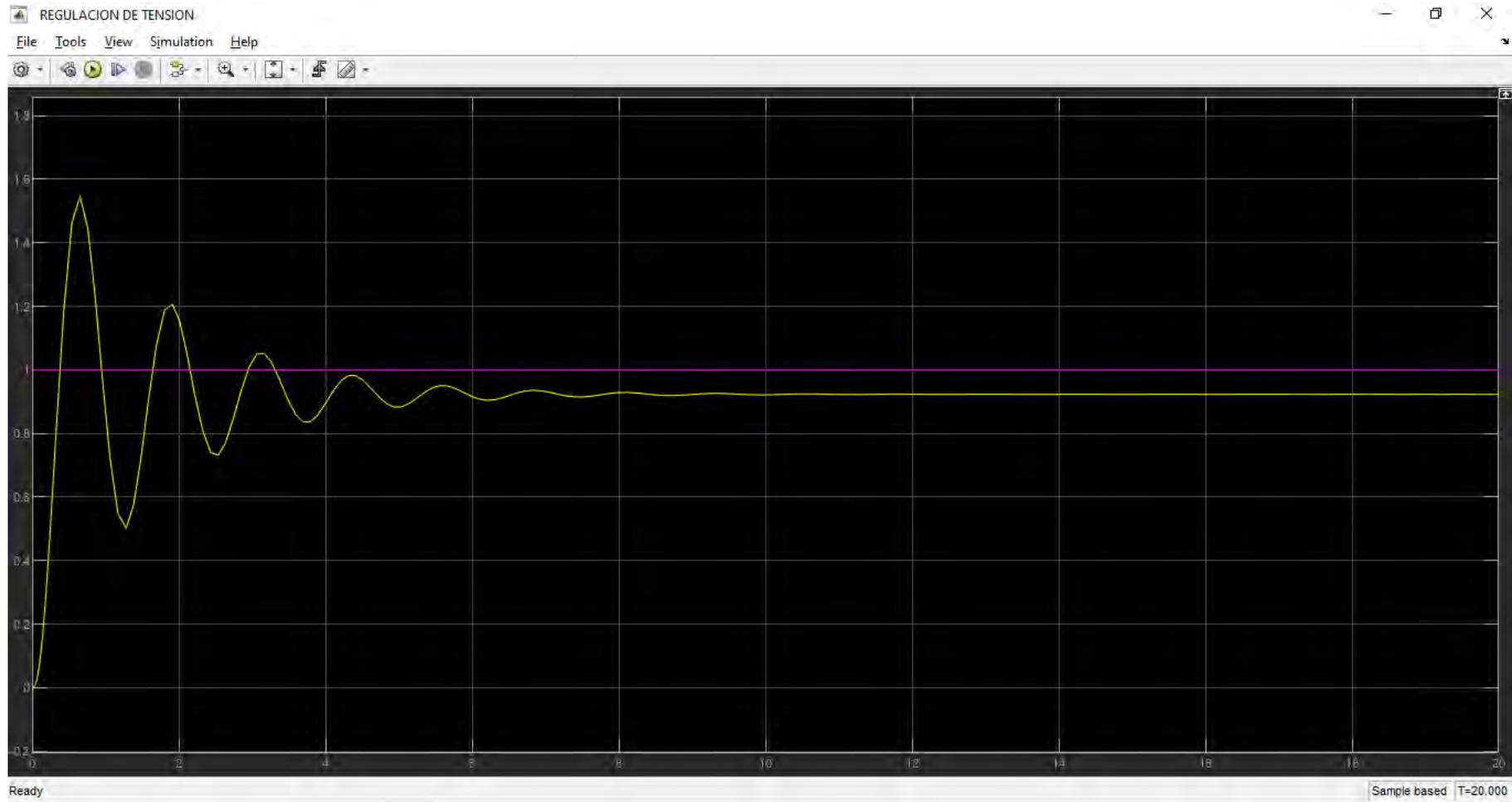
La **Figura 15** (Anexos) muestra la Implementación del modelo sin PID.



**Figura 16** (Anexos) Implementación del modelo sin PID.

Anexo 16 Resultado de gráfica caso 3.

La **Figura 16** (Anexos) muestra la Respuesta Transitoria implementación del modelo sin PID.



**Figura 17** (Anexos) Respuesta Transitoria implementación del modelo sin PID.

Anexo 17 Implementación del modelo en Simulink ejemplo 4.

La Figura 17 (Anexos) muestra la Implementación del modelo con PID.

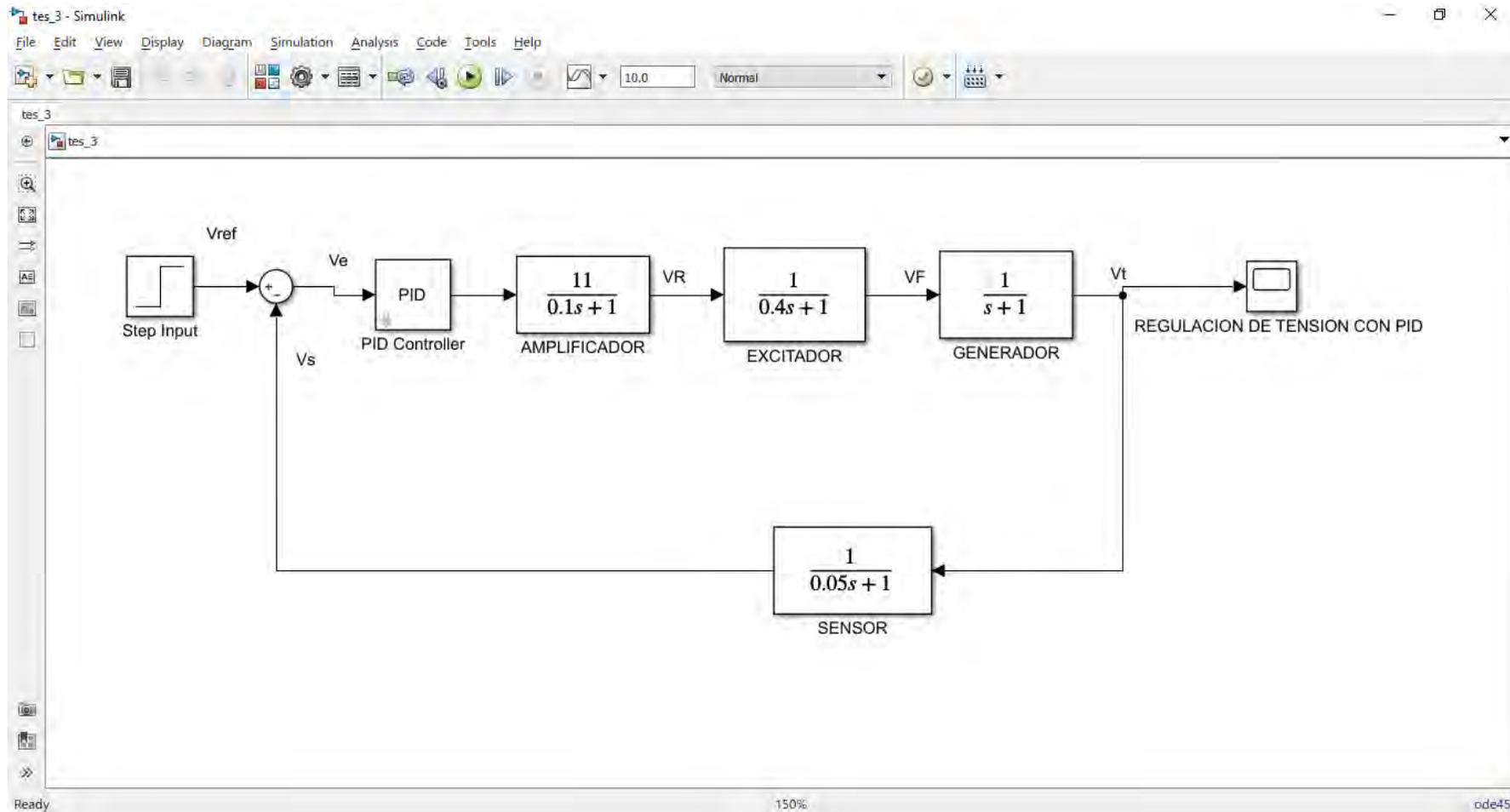
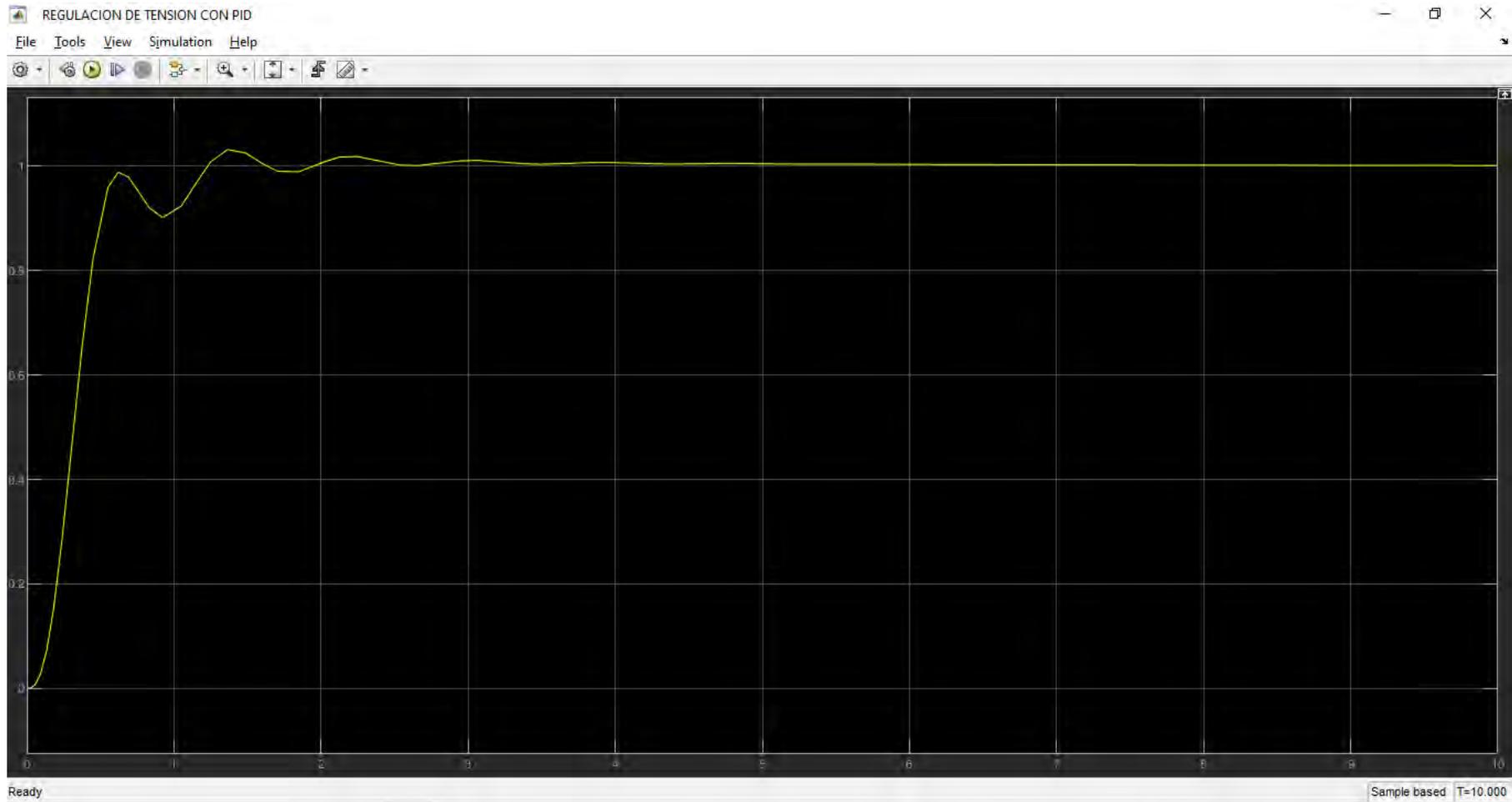


Figura 18 (Anexos) Implementación del modelo con PID.

Anexo 18 Resultado de gráfica caso 4.

La **Figura 18** (Anexos) muestra la Respuesta Transitoria implementación del modelo con PID.



**Figura 19 (Anexos) Respuesta Transitoria implementación del modelo con PID.**

El Anexo 19 (anexos) muestra la lista de todas las centrales hidroeléctricas en el Perú.

## Anexo 19 Resumen de Centrales Hidroeléctricas.

Ministerio de Energía y Minas - Atlas Minería y Energía en

### CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

ORDEN	CENTRAL	EMPRESA	SITUACION	DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	SISTEMA	PL.(MW)
1	C.H. OXAHUAY	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	SICCHEZ	AYABACA	PIURA	SSAA	0.030
2	C.H. MONTERO	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	MONTERO	AYABACA	PIURA	SSAA	0.040
3	C.H. QUIROZ	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	AYABACA	AYABACA	PIURA	SSAA	1.660
4	C.H. SICACATE	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	MONTERO	AYABACA	PIURA	SSAA	0.200
5	C.H. POECHOS I Y II (EN CONSTRUCCION)	SINDICATO ENERGETICO S.A. - SINERSA	CONCESION DEFINITIVA	SULLANA	SULLANA	PIURA	-	27.000
6	C.H. CHIRA	PROYECTO ESPECIAL CHIRA - PIURA	MENOR A 500 KW	SULLANA	SULLANA	PIURA	-	0.240
7	C.H. EL COMUN	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	FRIAS	AYABACA	PIURA	SSAA	0.100
8	C.H. SANTO DOMINGO DE NAVA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	SANTO DOMINGO	MORROPON	PIURA	SSAA	0.102
9	C.H. CHALACO	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CHALACO	MORROPON	PIURA	SSAA	0.150
10	C.H. NAMBALLE	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	NAMBALLE	SAN IGNACIO	CAJAMARCA	SSAA	0.150
11	C.H. CURUMUY	SINDICATO ENERGETICO S.A. - SINERSA	CONCESION DEFINITIVA	CASTILLA	PIURA	PIURA	SSAA	12.000
12	C.H. ZAPALACHE	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	EL CARMEN DE LA FRONTERA	HUANCABAMBA	PIURA	SSAA	0.060
13	C.H. HUANCABAMBA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	HUANCABAMBA	HUANCABAMBA	PIURA	SSAA	0.146
14	C.H. TABACONAS	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	TABACONAS	SAN IGNACIO	CAJAMARCA	SSAA	0.100
15	C.H. EL MUYO	ELECTRO ORIENTE S.A.	AUTORIZACION	ARAMANGO	BAGUA	AMAZONAS	SSAA	5.670
16	C.H. CANCHAQUE	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CANCHAQUE	HUANCABAMBA	PIURA	SSAA	0.093
17	C.H. CHAUPE PUCARA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	JAEN	JAEN	CAJAMARCA	SSAA	0.400
18	C.H. LA PELOTA	ELECTRO ORIENTE S.A.	AUTORIZACION	JAEN	JAEN	CAJAMARCA	SSAA	3.180
19	C.H. POMAHUACA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	POMAHUACA	JAEN	CAJAMARCA	SSAA	0.070
20	C.H. ACHAMAQUI	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	LONYA GRANDE	UTCUBAMBA	AMAZONAS	SSAA	0.080
21	C.H. CAÑARIS	CTAR LAMBAYEQUE	MENOR A 500 KW	CAÑARIS	FERREÑAFE	LAMBAYEQUE	SSAA	0.050
22	C.H. EL GERA	ELECTRO ORIENTE S.A.	AUTORIZACION	JEPELACIO	MOYOBAMBA	SAN MARTIN	SSAA	6.160
23	C.H. CACLIC	ELECTRO ORIENTE S.A.	AUTORIZACION	LUYA	LUYA	AMAZONAS	SSAA	4.800
24	C.H. INCAWASI	CTAR LAMBAYEQUE	MENOR A 500 KW	INCAHUASI	FERREÑAFE	LAMBAYEQUE	SSAA	0.060
25	C.H. GUINEAMAYO	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	SOCOTA	CUTERVO	CAJAMARCA	SSAA	0.800
26	C.H. TACABAMBA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	TACABAMBA	CHOTA	CAJAMARCA	SSAA	0.100
27	C.H. TABALOSOS	ELECTRO ORIENTE S.A.	MENOR A 500 KW	TABALOSOS	LAMAS	SAN MARTIN	SSAA	0.280
28	C.H. CHIRICONGA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	CHANCAYBAÑOS	SANTA CRUZ	CAJAMARCA	SSAA	2.000
29	C.H. CARHUQUERO	EGENOR S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	LLAMA	CHOTA	CAJAMARCA	SINAC	75.060
30	C.H. SAN JOSE DE SINACA	ELECTRO ORIENTE S.A.	MENOR A 500 KW	SAN JOSE DE SINACA	EL DORADO	SAN MARTIN	SSAA	0.130
31	C.H. CERRO MULATO (EN CONSTRUCCION)	ELECTRICA CHONGOYAPE S.A.	AUTORIZACION	CHONGOYAPE	CHICLAYO	LAMBAYEQUE	-	8.000
32	C.H. BAMBAMARCA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	BAMBAMARCA	HUALGAYOC	CAJAMARCA	SSAA	0.050
33	C.H. MINI C.H.HEL TINGO	CIA. MINERA SAN NICOLAS S.A.	*	HUALGAYOC	HUALGAYOC	CAJAMARCA	SSAA	0.040
34	C.H. LEYMEBAMBA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	LEYMEBAMBA	CHACHAPOYAS	AMAZONAS	SSAA	0.060
35	C.H. SHIPILCO	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	CELENDIN	CELENDIN	CAJAMARCA	SSAA	0.580
36	C.H. BUENOS AIRES NIEPOS	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	NIEPOS	SAN MIGUEL	CAJAMARCA	SSAA	1.060
37	C.H. CELENDIN	ELECTRO NOR OESTE S.A.	*	JORGE CHAVEZ	CELENDIN	CAJAMARCA	SSAA	1.100
38	C.H. CHICCHE	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	CAJAMARCA	CAJAMARCA	CAJAMARCA	SSAA	0.620
39	C.H. LANCHILOMA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	NAMORA	CAJAMARCA	CAJAMARCA	SSAA	0.070
40	C.H. GALLITO CIEGO	CEMENTOS NORTE PACASMAYO ENERGIA S.A.C.	CONCESION DEFINITIVA	YONAN	CONTUMAZA	CAJAMARCA	SINAC	34.000
41	C.H. HUAYOBAMBA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	PEDRO GALVEZ	SAN MARCOS	CAJAMARCA	SSAA	0.060
42	C.H. SAN MARCOS	ELECTRO NOR OESTE S.A.	*	PEDRO GALVEZ	SAN MARCOS	CAJAMARCA	SSAA	0.100
43	C.H. PAUCAMARCA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	ICHOCAN	SAN MARCOS	CAJAMARCA	SSAA	0.330
44	C.H. CORLAS - CASCAS	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CASCAS	GRAN CHIMU	LA LIBERTAD	SSAA	0.240
45	C.H. PACAYMONTE	CIA. MINERA SAYAPULLO S.A.	MENOR A 500 KW	SAYAPULLO	GRAN CHIMU	LA LIBERTAD	SSAA	0.440
46	C.H. MEMBRILLO	CIA. MINERA SAYAPULLO S.A.	AUTORIZACION	SAYAPULLO	GRAN CHIMU	LA LIBERTAD	SSAA	0.880
47	C.H. HUAYUNGUITA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CAJABAMBA	CAJABAMBA	CAJAMARCA	SSAA	0.080
48	C.H. HUAYUNGA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	CAJABAMBA	CAJABAMBA	CAJAMARCA	SSAA	0.520
49	C.H. EL TINGO	CIA. MINERA PODEROSA S.A.	AUTORIZACION	PATAZ	PATAZ	LA LIBERTAD	SSAA	1.760
50	C.H. YAMOBAMBA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	HUAMACHUCO	SANCHEZ CARRION	LA LIBERTAD	SSAA	0.600
51	C.H. PIAZ I (EN CONSTRUCCION)	AGUAS Y ENERGIA PERU S.A.	CONCESION DEFINITIVA	OTUZCO	OTUZCO	LA LIBERTAD	-	15.000
52	C.H. HUAYCHACA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	QUIRUVILCA	SANTIAGO DE CHUCO	LA LIBERTAD	SSAA	0.360
53	C.H. CACHICADAN	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CACHICADAN	SANTIAGO DE CHUCO	LA LIBERTAD	SSAA	0.200
54	C.H. TARABAMBA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	BULDIBUYO	PATAZ	LA LIBERTAD	SSAA	1.100
55	C.H. TABLACHACA (EN ESTUDIO)	IESA S.A.	CONCESION TEMPORAL	PALLASCA	PALLASCA	ANCASH	-	120.000
56	C.H. VIRU	PROYECTO ESPECIAL CHAVIMOCHIC	AUTORIZACION	VIRU	VIRU	LA LIBERTAD	SSAA	7.680
57	C.H. CAÑON DEL PATO	EGENOR S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	HUALLANCA	HUAYLAS	ANCASH	SINAC	154.250
58	C.H. POMABAMBA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	POMABAMBA	POMABAMBA	ANCASH	SSAA	0.970
59	C.H. PISCOBAMBA	ELECTRO NOR OESTE S.A.	*	PISCOBAMBA	MARISCAL LUZURIAGA	ANCASH	SSAA	0.230
60	C.H. PASO DEL AGUILA (EN ESTUDIO)	REPRESENTACIONES CASASI S.A.	CONCESION TEMPORAL	ACOCHACA	ASUNCION	ANCASH	-	38.000
61	C.H. CENTAURO (EN CONSTRUCCION)	CORMIPESA - CORPORACION MINERA DEL PERU S.A.	AUTORIZACION	CHACAS	ASUNCION	ANCASH	SSAA	9.900
62	C.H. CHACAS	EMP. DE INTERES LOCAL HIDROELEC. CHACAS	AUTORIZACION	CHACAS	ASUNCION	ANCASH	SSAA	0.600
63	C.H. CENTAURO II (EN ESTUDIO)	REPRESENTACIONES CASASI S.A.	CONCESION TEMPORAL	CHACAS	ASUNCION	ANCASH	-	20.000
64	C.H. MARIA JIRAY	ELECTRO NOR OESTE S.A.	AUTORIZACION	HUARI	HUARI	ANCASH	SSAA	1.540
65	C.H. MINI CENTRAL HIDROELECTRICA 1	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA PARIAC S.A.	MENOR A 500 KW	HUARAZ	HUARAZ	ANCASH	SSAA	0.300
66	C.H. MINI CENTRAL HIDROELECTRICA 2	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA PARIAC S.A.	MENOR A 500 KW	HUARAZ	HUARAZ	ANCASH	SSAA	0.460
67	CH3 ANTIGUA	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA PARIAC S.A.	AUTORIZACION	HUARAZ	HUARAZ	ANCASH	SSAA	1.460
68	C.H. PARIAC	EMP. DE GENERACION ELECTRICA PARIAC S.A.	AUTORIZACION	HUARAZ	HUARAZ	ANCASH	SINAC	46.070
69	C.H. ACOMAYO	ELECTRO CENTRO S.A.	MENOR A 500 KW	CHINCHAO	HUANUCO	HUANUCO	SSAA	0.100
70	C.H. HUALLANCA NUEVA	CIA. MINERA SANTA LUISA	AUTORIZACION	HUALLANCA	BOLOGNESI	ANCASH	SSAA	4.300
71	C.H. COLPA BAJA	ELECTRO CENTRO S.A.	MENOR A 500 KW	HUANUCO	HUANUCO	SINAC	-	0.380
72	C.H. POZUZO	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	POZUZO	OXAPAMPA	PASCO	SSAA	0.860
73	C.H. LAMAC (EN ESTUDIO)	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	HUASTA	BOLOGNESI	ANCASH	-	100.000
74	C.H. CHIQUIAN	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CHIQUIAN	BOLOGNESI	ANCASH	SSAA	0.400
75	C.H. MURI (EN ESTUDIO)	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	COPA	CAJATAMBO	LIMA	-	90.000
76	C.H. PUQUIAN (EN ESTUDIO)	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	COPA	CAJATAMBO	LIMA	-	76.000
77	C.H. OCROS	ELECTRO NOR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	OCROS	OCROS	ANCASH	SSAA	0.280
78	C.H. CAHUA	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION DEFINITIVA	CAJATAMBO	CAJATAMBO	LIMA	SINAC	41.500
79	C.H. HUANRI	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	SAN CRISTOBAL DE RAJAN	OCROS	ANCASH	-	255.000
80	C.H. CURQUISH (EN ESTUDIO)	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	CAJATAMBO	CAJATAMBO	LIMA	-	70.000
81	C.H. CHAPRIN	COMPAÑIA MINERA ATACOCCHA	AUTORIZACION	HUARIACA	PASCO	PASCO	SSAA	5.400
82	C.H. PAMPANIA	RAGUSEA AGROINDUSTRIAL S.A.	MENOR A 500 KW	SANTA ANA DE TUSI	DANIEL ALCIDES CARRION	PASCO	SSAA	0.350
83	C.H. RAURA II	COMPAÑIA MINERA RAURA S.A.	AUTORIZACION	OYON	OYON	LIMA	SSAA	25.200
84	C.H. CHINCHE	COMUNIDAD CAMPESINA DE CHINCHE - TINGO	AUTORIZACION	YANAHUANCA	DANIEL ALCIDES CARRION	PASCO	SSAA	1.600
85	C.H. UCHUHUERTA (EN ESTUDIO)	ELECTROANDES - EMP. DE ELECTRICIDAD DE LOS ANDES S.A.	CONCESION TEMPORAL	HUACHON	PASCO	PASCO	-	30.000
86	C.H. MAYUSH (EN ESTUDIO)	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	MANAS	CAJATAMBO	LIMA	-	100.000
87	C.H. MARCOPAMPA	COMPAÑIA MINERA ATACOCCHA	AUTORIZACION	YANACANCHA	PASCO	PASCO	SSAA	1.200
88	C.H. CASHAUCRO	CIA. MINERA RAURA	AUTORIZACION	OYON	OYON	LIMA	SSAA	4.400
89	C.H. HUAYLILLAS (EN ESTUDIO)	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	COCHAS	OCROS	ANCASH	-	42.000
90	C.H. COCHAS	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	AMBAR	HUARA	LIMA	-	120.000
91	C.H. CANDELARIA	COMPAÑIA MINERA MILPO	AUTORIZACION	YANACANCHA	PASCO	PASCO	SSAA	3.840
92	C.H. PATON	COMPAÑIA DE MINAS BUENAVENTURA	AUTORIZACION	OYON	OYON	LIMA	SSAA	3.460
93	C.H. LLACLLA (EN ESTUDIO)	EMP. DE GENERACION ELECTRICA CAHUA S.A.	CONCESION TEMPORAL	BARRANCA	BARRANCA	LIMA	-	114.000
94	C.H. YAUPI	ELECTROANDES - EMP. DE ELECTRICIDAD DE LOS ANDES S.A.	CONCESION DEFINITIVA	ULCUMAYO	JUNIN	JUNIN	SINAC	108.000
95	C.H. YUNCAN (EN CONSTRUCCION)	EGECEN S.A.	CONCESION DEFINITIVA	PAUCARTAMBO	PASCO	PASCO	-	130.000
96	C.H. RIO BLANCO	SOC. MINERA EL BROCAL S.A.	AUTORIZACION	TINYAHUARCO	PASCO	PASCO	SSAA	1.420
97	C.H. NAVA	EDELNOR S.A.A.	MENOR A 500 KW	PACHANGARA	OYON	LIMA	SSAA	0.527
98	C.H. JUPAYRAGRA	SOC. MINERA EL BROCAL S.A.	AUTORIZACION	TINYAHUARCO	PASCO	PASCO	SSAA	1.920
99	C.H. EL CAÑO (EN ESTUDIO)	ELECTROANDES - EMP. DE ELECTRICIDAD DE LOS ANDES S.A.	CONCESION TEMPORAL	VILLA RICA	OXAPAMPA	PASCO	-	100.000
100	C.H. CHURIN	EDELNOR S.A.A.	MENOR A 500 KW	PACHANGARA	OYON	LIMA	SSAA	0.600
101	C.H. PICHANAKI	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	PICHANAKI	CHANCHAMAYO	JUNIN	SSAA	1.260
102	C.H. HUARON	COMPAÑIA MINERA HUARON S.A.	AUTORIZACION	HUAYLLAY	PASCO	PASCO	SSAA	2.540
103	C.H. SAN HILARION	CIA. HIDROELECTRICA SAN HILARION	AUTORIZACION	SAYAN	HUARA	LIMA	SSAA	0.600
104	C.H. CHANCHAMAYO	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	SAN RAMON	CHANCHAMAYO	JUNIN	SINAC	0.560
105	C.H. HUANCHAY	EMP. ADMINISTRADORA CHUNGAR S.A.	AUTORIZACION	PACARAOS	HUARAL	LIMA	SSAA	1.950
106	C.H. YANANGO	EDEGEL S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	SAN RAMON	CHANCHAMAYO	JUNIN	SSAA	40.500
107	C.H. SHAGUA	EMP. ADMINISTRADORA CHUNGAR S.A.	AUTORIZACION	SANTA CRUZ DE ANDAMARCA	HUARAL	LIMA	SSAA	1.100
108	C.H. CACRAY	EMP. ADMINISTRADORA CHUNGAR S.A.	MENOR A 500 KW	SANTA CRUZ DE ANDAMARCA	HUARAL	LIMA	SSAA	0.250
109	C.H. CHEVES (EN CONSTRUCCION)	PERU HYDRO S.A.	CONCESION DEFINITIVA	SAYAN	HUARA	LIMA	-	525.000
110	C.H. YANAHUIN	EMP. ADMINISTRADORA CHUNGAR S.A.	MENOR A 500 KW	PACARAOS	HUARAL	LIMA	SSAA	0.490
111	C.H. RAVIRA-PACARAOS	EDELNOR S.A.A.	MENOR A 500 KW	PACARAOS	HUARAL	LIMA	SSAA	0.150

## CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

ORDEN	CENTRAL	EMPRESA	SITUACION	DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	SISTEMA	PI.(MW)
112	C.H. MONOBAMBA	COMPANIA MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.	AUTORIZACION	VITOC	CHANCHAMAYO	JUNIN	SSAA	5.300
113	C.H. MONOBAMBA II	COMPANIA MINERA SAN IGNACIO DE MOROCOCHA S.A.	AUTORIZACION	VITOC	CHANCHAMAYO	JUNIN	SSAA	5.330
114	C.H. CHALHUAMAYO	ELECTRO CENTRO S.A.	*	SATIPO	JUNIN	JUNIN	SSAA	3.200
115	C.H. CARPAPATA II	CEMENTO ANDINO S.A.	AUTORIZACION	PALCA	TARMA	JUNIN	SINAC	5.900
116	C.H. CARPAPATA I	CEMENTO ANDINO S.A.	AUTORIZACION	PALCA	TARMA	JUNIN	SINAC	5.600
117	C.H. ACOS	EDELNOR S.A.A.	MENOR A 500 KW	SAN MIGUEL DE ACOS	HUARAL	LIMA	SSAA	0.280
118	C.H. MALPASO	ELECTROANDES - EMP. DE ELECTRICIDAD DE LOS ANDES S.A.	CONCESION DEFINITIVA	PACCHA	YAULI	JUNIN	SINAC	54.400
119	C.H. HUAROS	EDELNOR S.A.A.	MENOR A 500 KW	HUAROS	CANTA	LIMA	SSAA	0.880
120	C.H. TARMA HUASA HUASI	INVERSIONES ANDINO S.A.	CONCESION TEMPORAL	TARMA	TARMA	JUNIN	-	0.000
121	C.H. PACCHA	ELECTRO CENTRO S.A.	MENOR A 500 KW	TARMA	TARMA	JUNIN	SINAC	0.220
122	C.H. CANTA	E.D.E. CHANCAY S.A.	AUTORIZACION	CANTA	CANTA	LIMA	SSAA	1.100
123	C.H. CANTA	EDELNOR S.A.A.	AUTORIZACION	CANTA	CANTA	LIMA	SSAA	0.840
124	C.H. LA OROYA	ELECTROANDES - EMP. DE ELECTRICIDAD DE LOS ANDES S.A.	AUTORIZACION	LA OROYA	YAULI	JUNIN	SINAC	9.100
125	C.H. LLAPAY (EN CONSTRUCCION)	CIA. MINERA SAN VALENTIN S.A.	AUTORIZACION	LARAOS	HUAROCHIRI	LIMA	SSAA	4.000
126	C.H. PACHACHACA	ELECTROANDES - EMP. DE ELECTRICIDAD DE LOS ANDES S.A.	CONCESION DEFINITIVA	YAULI	YAULI	JUNIN	SINAC	12.443
127	C.H. YASO	EDELNOR S.A.A.	MENOR A 500 KW	SANTA ROSA DE QUIVES	CANTA	LIMA	SSAA	0.190
128	C.H. HUINCO	EDEGEL S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	SAN PEDRO DE CASTA	HUAROCHIRI	LIMA	SINAC	262.400
129	C.H. CHIMAY	EDEGEL S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	JAUJA	JAUJA	JUNIN	SINAC	149.000
130	C.H. MUQUIYAUYO	COMUNIDAD CAMPESINA DE MUQUIYAUYO	AUTORIZACION	JAUJA	JAUJA	JUNIN	SSAA	0.490
131	C.H. TAMBORAQUE I	MINERA LIZANDRO PROAÑO S.A.	MENOR A 500 KW	SAN MATEO	HUAROCHIRI	LIMA	SSAA	0.460
132	C.H. TAMBORAQUE II	MINERA LIZANDRO PROAÑO S.A.	AUTORIZACION	SAN MATEO	HUAROCHIRI	LIMA	SSAA	0.840
133	C.H. CASCADA PARAC (EN ESTUDIO)	HYDRO TAMBORAQUE S.A.	CONCESION TEMPORAL	SAN MATEO	HUAROCHIRI	LIMA	-	10.600
134	C.H. PANGO	EMP. DE GEN. COM. DE SERV. PUB. PANGO	MENOR A 500 KW	PANGO	SATIPO	JUNIN	SSAA	0.300
135	C.H. CALLAHUANCA	EDEGEL S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	CALLAHUANCA	HUAROCHIRI	LIMA	SINAC	71.650
136	C.H. HUANCHOR (EN CONSTRUCCION)	HUANCHOR HYDRO S.A.	CONCESION DEFINITIVA	MATUCANA	HUAROCHIRI	LIMA	-	16.200
137	C.H. INGENIO	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	INGENIO	HUANCAYO	JUNIN	SINAC	1.460
138	C.H. MATUCANA	EDEGEL S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	SURCO	HUAROCHIRI	LIMA	SINAC	120.000
139	C.H. CONCEPCION	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	CONCEPCION	CONCEPCION	JUNIN	SINAC	0.700
140	C.H. MOYOPAMPA	EDEGEL S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	LURIGANCHO	LIMA	LIMA	SINAC	63.000
141	C.H. HUAMPANI	EDEGEL S.A.A.	CONCESION DEFINITIVA	LURIGANCHO	LIMA	LIMA	SINAC	31.360
142	C.H. CHAMISERIA I Y II	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	EL TAMBO	HUANCAYO	JUNIN	SINAC	0.820
143	C.H. SICAYA HUARISCA	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	SICAYA	HUANCAYO	JUNIN	SINAC	3.840
144	C.H. CHUYAPI	ELECTRO SUR ESTE S.A.	MENOR A 500 KW	ECHARATE	LA CONVENCION	CUSCO	SSAA	0.400
145	C.H. RESTITUCION	ELECTROPERU S.A.	CONCESION DEFINITIVA	COLCABAMBA	TAYACAJA	HUANCVELICA	SINAC	210.000
146	C.H. MACHU	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	HUASICANCHA	HUANCAYO	JUNIN	SINAC	0.900
147	C.H. ANTUNEZ DE MAYOLO	ELECTROPERU S.A.	CONCESION DEFINITIVA	COLCABAMBA	TAYACAJA	HUANCVELICA	SINAC	798.000
148	C.H. QUINCHES	MUNICIPALIDAD DE HUAMPARA	MENOR A 500 KW	YUYOS	YUYOS	LIMA	SSAA	0.290
149	C.H. SAN FRANCISCO	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	PICHARI	LA CONVENCION	CUSCO	SSAA	1.540
150	C.H. ENRIQUE TALLER	COMPANIA MINERA CERCAPUQUIO	AUTORIZACION	CHONGOS ALTO	HUANCAYO	JUNIN	SSAA	1.840
151	C.H. IZCUCACA	ELECTRO CENTRO S.A.	MENOR A 500 KW	IZCUCACA	HUANCVELICA	HUANCVELICA	SSAA	0.050
152	C.H. COTAHUASI	COMUNIDAD CAMPESINA DE COTAHUASI	MENOR A 500 KW	CATAHUASI	YUYOS	LIMA	SSAA	0.070
153	C.H. HONGOS	MUNICIPALIDAD DE HONGOS	MENOR A 500 KW	HONGOS	YUYOS	LIMA	SSAA	0.260
154	C.H. YAULI	SOC. MINERA EL BROCAL S.A.	AUTORIZACION	YAULI	HUANCVELICA	HUANCVELICA	SSAA	0.800
155	C.H. VILAFRANCA	ELECTRO CENTRO S.A.	MENOR A 500 KW	HONGOS	YUYOS	LIMA	SINAC	0.120
156	C.H. HACIENDA POTRERO	GONZALES MAYO ALCIDES	MENOR A 500 KW	SANTA ANA	LA CONVENCION	CUSCO	SINAC	0.340
157	C.H. ACOBAMBA	ELECTRO CENTRO S.A.	MENOR A 500 KW	ACOBAMBA	ACOBAMBA	HUANCVELICA	SINAC	0.220
158	C.H. COCLA	CENTRAL DE COOPERATIVAS AGRA. CAFETALERAS	MENOR A 500 KW	SANTA ANA	LA CONVENCION	CUSCO	SINAC	0.120
159	C.H. HUAPA	COMPANIA DE MINAS BUENAVENTURA	AUTORIZACION	LIRICAY	ANGARAES	HUANCVELICA	SSAA	0.888
160	C.H. TUCSIPAMPA	COMPANIA DE MINAS BUENAVENTURA	AUTORIZACION	LIRICAY	ANGARAES	HUANCVELICA	SSAA	1.344
161	C.H. INGENIO	COMPANIA DE MINAS BUENAVENTURA	*	HUACHOCOLPA	HUANCVELICA	HUANCVELICA	SSAA	0.760
162	C.H. TANTARA	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	TANTARA	CASTROVIRREYNA	HUANCVELICA	SSAA	0.020
163	C.H. SANTA INES	CIA. MINERA CASTROVIRREYNA S.A.	AUTORIZACION	SANTA ANA	CASTROVIRREYNA	HUANCVELICA	SSAA	1.410
164	C.H. MACHUPICCHU	EGEMSA - EMP. DE GENERACION ELECTRICA DE MACHU PICCHU S.A.	CONCESION DEFINITIVA	MACHUPICCHU	URUBAMBA	CUSCO	SINAC	0.000
165	C.H. QUICAPATA	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	CARMEN ALTO	HUAMANGA	AYACUCHO	SINAC	1.040
166	C.H. CASTROVIRREYNA	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	*	CASTROVIRREYNA	CASTROVIRREYNA	HUANCVELICA	SSAA	0.020
167	C.H. PAUCARTAMBO	ELECTRO SUR ESTE S.A.	MENOR A 500 KW	PAUCARTAMBO	PAUCARTAMBO	CUSCO	SSAA	0.240
168	C.H. TICRAPO	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	TICRAPO	CASTROVIRREYNA	HUANCVELICA	SSAA	0.020
169	C.H. CATALINAYOC	PROYECTO ESPECIAL RIO CACHI	AUTORIZACION	CHUSCHI	CANGALLO	AYACUCHO	-	2.000
170	C.H. QUILLABAMBA	ELECTRO SUR ESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CUSCO	CUSCO	CUSCO	SSAA	0.400
171	C.H. CHINCHEROS	ELECTRO SUR ESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CHINCHEROS	CHINCHEROS	APURIMAC	SSAA	0.040
172	C.H. SAN GABAN II	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA SAN GABAN S.A.	CONCESION DEFINITIVA	SAN GABAN	CARABAYA	PUNO	SINAC	110.000
173	C.H. CHUMBAO	ELECTRO SUR ESTE S.A.	AUTORIZACION	SAN JERONIMO	ANDAHUAYLAS	APURIMAC	SSAA	1.980
174	C.H. LLUSITA	ELECTRO CENTRO S.A.	AUTORIZACION	HUANCARAYLLA	VICTOR FAJARDO	AYACUCHO	SSAA	1.700
175	C.H. HUANCARAY	ELECTRO SUR ESTE S.A.	AUTORIZACION	HUANCARAY	ANDAHUAYLAS	APURIMAC	SSAA	0.580
176	C.H. MATARA	ELECTRO SUR ESTE S.A.	AUTORIZACION	ANDAHUAYLAS	ANDAHUAYLAS	APURIMAC	SSAA	1.600
177	C.H. STGO DE CHOCORVOS	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	*	SANTIAGO DE CHOCORVOS	HUAYTARA	HUANCVELICA	SSAA	0.010
178	C.H. SACSAMARCA	SOCIEDAD MINERA EL BROCAL S.A.	MENOR A 500 KW	SACSAMARCA	HUANCA SANCOS	AYACUCHO	SINAC	0.200
179	C.H. QUERCO	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	QUERCO	HUAYTARA	HUANCVELICA	SSAA	0.040
180	C.H. MACUSANI	ELECTRO PUNO S.A.A.	MENOR A 500 KW	MACUSANI	CARABAYA	PUNO	SSAA	0.400
181	C.H. VILCABAMBA	ELECTRO SUR ESTE S.A.	MENOR A 500 KW	VILCABAMBA	GRAU	APURIMAC	SSAA	0.400
182	C.H. SANDIA	ELECTRO PUNO S.A.A.	AUTORIZACION	ALTO INAMBARI	SANDIA	PUNO	SINAC	2.500
183	C.H. LARAMATE	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	LARAMATE	LUCANAS	AYACUCHO	SSAA	0.220
184	C.H. AUCARA CABANA	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	AUCARA	LUCANAS	AYACUCHO	SSAA	0.240
185	C.H. CHALHUANCA	ELECTRO SUR ESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CHALHUANCA	AYMARAE	APURIMAC	SSAA	0.120
186	C.H. HERCCA	EGEMSA	AUTORIZACION	SICUANI	CANCHIS	CUSCO	SINAC	0.820
187	C.H. LANGUI	FABRICA DE TEJIDOS MARANGANI S.A.	AUTORIZACION	LANGUI	CANAS	CUSCO	SSAA	8.000
188	C.H. CHIPAO	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	CHIPAO	LUCANAS	AYACUCHO	SSAA	0.040
189	C.H. ANDAMARCA	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	CARMEN SALCEDO	LUCANAS	AYACUCHO	SSAA	0.090
190	C.H. ANTABAMBA	ELECTRO SUR ESTE S.A.	MENOR A 500 KW	ANTABAMBA	ANTABAMBA	APURIMAC	SSAA	0.060
191	C.H. CHAVIÑA	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	CHAVIÑA	LUCANAS	AYACUCHO	SSAA	0.090
192	C.H. CORACORA	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	CORACORA	PARINACOCAS	AYACUCHO	SSAA	0.280
193	C.H. CHOCOCO	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	AUTORIZACION	ALCA	LA UNION	AREQUIPA	SSAA	0.670
194	C.H. MISAPUQUIO	ARCATA ENERGIA S.A.A.	AUTORIZACION	CAYRANI	CONDESUYOS	AREQUIPA	SSAA	4.600
195	C.H. HUANCARAMA	COMPANIA DE MINAS BUENAVENTURA	AUTORIZACION	ORCOPAMPA	CASTILLA	AREQUIPA	SSAA	3.900
196	C.H. INCUYO	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	PUYUSCA	PARINACOCAS	AYACUCHO	SSAA	0.320
197	C.H. PAUSA	ELECTRO SUR MEDIO S.A.A.	MENOR A 500 KW	PAUSA	PAUCAR DEL SARA SARA	AYACUCHO	SSAA	0.200
198	C.H. SAN ANTONIO	ARCATA ENERGIA S.A.A.	AUTORIZACION	CAYLLOMA	CAYLLOMA	AREQUIPA	SINAC	0.620
199	C.H. HUAYLLACHO	ARCATA ENERGIA S.A.A.	MENOR A 500 KW	CAYLLOMA	CAYLLOMA	AREQUIPA	SINAC	0.290
200	C.H. SAN IGNACIO	ARCATA ENERGIA S.A.A.	AUTORIZACION	CAYLLOMA	CAYLLOMA	AREQUIPA	SINAC	0.650
201	C.H. ONGORO	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	AUTORIZACION	CAYLLOMA	CAYLLOMA	AREQUIPA	SSAA	0.520
202	C.H. VIRACO - MACHAGUAY	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	VIRACO	CASTILLA	AREQUIPA	SSAA	0.180
203	C.H. PAMPACOLCA	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	PAMPACOLCA	CASTILLA	AREQUIPA	SSAA	0.120
204	C.H. CARAVELI	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CARAVELI	CARAVELI	AREQUIPA	SSAA	0.190
205	C.H. OCOÑA (EN CONSTRUCCION)	OCOÑA POWER CORPORATION S.A.	CONCESION DEFINITIVA	RIO GRANDE	CONDESUYOS	AREQUIPA	SSAA	150.000
206	C.H. SIGUAS I	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	AUTORIZACION	LLUTA	CAYLLOMA	AREQUIPA	SSAA	1.920
207	C.H. HUATIPILLA	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	AUTORIZACION	HUANCARQUI	CASTILLA	AREQUIPA	SSAA	1.760
208	C.H. CHUQUIBAMBA	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	CHUQUIBAMBA	CONDESUYOS	AREQUIPA	SSAA	0.200
209	C.H. CHARCANI V	EGASA - EMP. DE GENERACION DE AREQUIPA S.A.	CONCESION DEFINITIVA	CAYMA	AREQUIPA	SINAC	SINAC	136.800
210	C.H. CHARCANI II	EGASA - EMP. DE GENERACION DE AREQUIPA S.A.	AUTORIZACION	CAYMA	AREQUIPA	AREQUIPA	SINAC	0.780
211	C.H. LEOPOLDO GAMARRA	GAMARRA BACA LEOPOLDO	MENOR A 500 KW	CERRO COLORADO	AREQUIPA	AREQUIPA	SINAC	0.225
212	C.H. CHARCANI IV	EGASA - EMP. DE GENERACION DE AREQUIPA S.A.	CONCESION DEFINITIVA	CAYMA	AREQUIPA	AREQUIPA	SINAC	16.200
213	C.H. CHARCANI VI	EGASA - EMP. DE GENERACION DE AREQUIPA S.A.	AUTORIZACION	CAYMA	AREQUIPA	AREQUIPA	SINAC	8.960
214	C.H. CHARCANI III	EGASA - EMP. DE GENERACION DE AREQUIPA S.A.	AUTORIZACION	CAYMA	AREQUIPA	AREQUIPA	SINAC	4.560
215	C.H. CHARCANI I	EGASA - EMP. DE GENERACION DE AREQUIPA S.A.	AUTORIZACION	CAYMA	AREQUIPA	AREQUIPA	SINAC	1.470
216	C.H. HUANCA	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	ALTO SELVA ALEGRE	AREQUIPA	AREQUIPA	SSAA	0.060
217	C.H. SAN GREGORIO	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	AUTORIZACION	NICOLAS DE PIEROLA	CAMANA	AREQUIPA	SSAA	0.600
218	C.H. SANTA RITA DE SIGUAS	SEAL - SOCIEDAD ELECTRICA DEL SUR OESTE S.A.	MENOR A 500 KW	SANTA RITA DE SIGUAS	AREQUIPA	AREQUIPA	SSAA	0.085
219	C.H. PUQUINA	ECOSAQ	MENOR A 500 KW	PUQUINA	GENERAL SANCHEZ CERRO	MOQUEGUA	SINAC	0.220
220	C.H. CUAJONE	SOUTHERN COOPER CORPORATION	AUTORIZACION	TORATA	MARISCAL NIETO	MOQUEGUA	SSAA	9.000
221	C.H. ARCOTA 1	EGESUR - EMP. DE GENERACION ELECTRICA DEL SUR S.A.	CONCESION DEFINITIVA	CURIBAYA	CANDARAVE	TACNA	SINAC	23.800
222	C.H. ARCOTA 2	EGESUR - EMP. DE GENERACION ELECTRICA DEL SUR S.A.	CONCESION DEFINITIVA	CURIBAYA	CANDARAVE	TACNA	SINAC	11.900

El **Anexo 20**(anexos) muestra el reporte de interrupciones ocurridas en los años 2019 y 2020.

**Anexo 20** Reporte de interrupciones del COES-SINAC.

### Interrupciones reportadas por el COES SINAC durante el año 2019



#### Reporte de interrupciones del 01 Enero 2019 al 31 de Octubre 2019

Tipo de Equipo:	?="Todos"	Tipo de Empresa	?="Todos"	Empresa:
Desde:	01/01/2019	Hasta:	31/10/2019	ELECTRO SUR ESTE

Empresa	Ubicación	Equipo	inicio	final	descripcion
ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA- SICUANI	L-6001	28/01/201906:31:00 p.m.	29/01/201906:38:00 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L- 6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA
ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA- SICUANI	L-6001	01/05/201906:29:00 p.m.	01/05/201906:34:00 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L- 6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA Y CUYO ORIGEN NO FUE INFORMADO POR ELECTRO SUR ESTE
ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA- SICUANI	L-6001	11/10/201911:48:24 a.m.	11/10/201912:35:38 a.m.	DESCONECTO DE LINEA L- 6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA

#### Reporte de interrupciones del 01 de Noviembre al 31 de Diciembre del 2019

Tipo de Equipo:	?="Todos"	Tipo de Empresa	?="Todos"	Empresa:
Desde:	01/01/2019	Hasta:	31/10/2019	ELECTRO SUR ESTE

Empresa	Ubicación	Equipo	inicio	final	descripcion
ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA- SICUANI	L-6001	01/12/2019 14:42:55 p.m.	01/12/2019 14:46:20 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L- 6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA EN LA FASE "S"

## Interrupciones reportadas por el COES SINAC durante el año 2020



### Reporte de interrupciones del 01 enero 2020 al 31 de Julio 2020

Tipo de Equipo:	?="Todos"	Tipo de Empresa	?="Todos"	Empresa:
Desde:	01/01/2020	Hasta:	31/07/2020	ELECTRO SUR ESTE

Ver detalle	Empresa	Ubicación	Equipo	inicio	final	descripcion
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	26/01/2020 17:32:27 p.m.	26/01/2020 17:36:31 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	15/02/2020 14:02:54 p.m.	15/02/2020 14:22:34 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA EN LA FASE "S"
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	23/05/2020 17:22:51 p.m.	23/05/2020 17:28:02 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA EN LA FASE "S" Y CUYO ORIGEN NO FUE INFORMADO POR ELECTRO SUR ESTE

### Reporte de interrupciones del 01 agosto 2020 al 31 de diciembre 2020

Tipo de Equipo:	?="Todos"	Tipo de Empresa	?="Todos"	Empresa:
Desde:	01/08/2020	Hasta:	31/12/2020	ELECTRO SUR ESTE

Ver detalle	Empresa	Ubicación	Equipo	inicio	final	descripcion
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	28/09/2020 16:10:24 p.m.	28/09/2020 17:12:43 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA BIFASICA EN LAS FASES "R" Y "S"
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	29/09/2020 11:47:55 a.m.	29/09/2020 11:54:04 a.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA BIFASICA EN LAS FASES "R" Y "S"
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	10/10/2020 14:56:43 p.m.	10/10/2020 14:37:43 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA BIFASICA EN LAS FASES "R" Y "S"
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	10/10/2020 15:06:03 p.m.	10/10/2020 15:10:59 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA MONOFASICA EN LA FASE "R"
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	21/10/2020 14:47:48 p.m.	21/10/2020 14:54:37 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA BIFASICA EN LAS FASES "R" Y "S"
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	21/10/2020 14:57:50 p.m.	21/10/2020 15:02:48 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA BIFASICA EN LAS FASES "R" Y "S"
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	21/10/2020 15:09:07 p.m.	21/10/2020 15:16:00 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA BIFASICA EN LAS FASES "R" Y "S"
+	ELECTRO SUR ESTE	L. COMBAPATA-SICUANI	L-6001	17/12/2020 18:18:56 p.m.	17/12/2020 18:23:15 p.m.	DESCONECTO DE LINEA L-6001(COMBAPATA-SICUANI) DE 66KV POR FALLA Y CUYO ORIGEN NO FUE INFORMADO POR ELECTRO SUR ESTE