



**Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

**SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DE LA EXCITACIÓN  
(DECS) Y REGULACIÓN PRIMARIA DE VOLTAJE EN  
GENERADORES ELÉCTRICOS**

**José Carlos Orellana Pineda**

**Asesorado por: Ing. Carlos Francisco Gressi López**

**Guatemala, octubre de 2004**



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DE LA EXCITACIÓN  
(DECS) Y REGULACIÓN PRIMARIA DE VOLTAJE EN  
GENERADORES ELÉCTRICOS**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**POR**

**JOSÉ CARLOS ORELLANA PINEDA**

**ASESORADO POR EL ING. CARLOS FRANCISCO GRESSI LÓPEZ**

**AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**GUATEMALA, OCTUBRE DE 2004**



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>VOCAL I</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>VOCAL II</b>	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
<b>VOCAL III</b>	Ing. Julio David Galicia Celada
<b>VOCAL IV</b>	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
<b>VOCAL V</b>	Br .Elisa Yazminda Vides Leiva
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Edgar Florencio Montufar Urizar
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Marvin Marino Hernández Fernandez
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DE LA EXCITACIÓN (DECS) Y REGULACIÓN PRIMARIA DE VOLTAJE EN GENERADORES ELÉCTRICOS**

Tema que se me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 14 de agosto de 2002.

**José Carlos Orellana Pineda**



## **DEDICATORIA**

### **A DIOS**

Por darme vida, por iluminar el camino para alcanzar mis metas y porque nunca me ha desamparado.

### **A MIS PADRES**

Carlos Alberto Orellana, por sus esfuerzos y su apoyo para alcanzar este momento en mi vida. Vilma de Orellana, por su amor, sus consejos y esfuerzos. Que esto sea una pequeña recompensa por todo lo anterior y quiero decirles que los quiero mucho, que Dios los bendiga.

### **A MIS HERMANOS**

Ruth Patricia, porque siempre has sido muy especial, por todo el amor y los consejos que me has dado. Ericka Esther, porque te quiero mucho y eres muy especial para mí. Carlos Alberto, por disfrutar conmigo este momento. A Jessenia y Claudia.

### **A MI ASESOR Y AMIGO**

Ing. Francisco Gressi, por asesorarme en la elaboración del presente trabajo; porque ha sido un ejemplo en mi formación como profesional; por su amistad incondicional y por el apoyo que me ha brindado en todo momento.

### **A MI NOVIA**

Jessica Mercedes, por todo el cariño y el amor que me has dado.

**A MIS ABUELOS**

Alberto Orellana.

Petrona Dárdon de Orellana (Q.E.P.D.)

José Víctor Pineda.

Olga Saénz de Pineda.

Sabina Martínez (Q.E.P.D.)

Por el amor y los consejos que me han dado.

**A MI FAMILIA**

Tíos, tías, primos, primas y sobrinos, con mucho cariño.

**A USTED**

Que comparte este momento tan especial conmigo y que de una u otra forma me ha ayudado a alcanzarlo.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A catedráticos de la Facultad de Ingeniería de la USAC**

Por las enseñanzas que me impartieron.

### **A mis amigos**

David Rivera, Vinicio Hernández y Pedro Orellana.

### **Al Lic. Cesar Danilo Ruano**

Por su amistad.

### **Al colegio Getsemani**

Por la formación que me dieron y en especial al Prof. Adán Rodríguez por su apoyo y amistad.

### **A mis compañeros**

Hector Ovalle, David Pacheco, Juan Pablo Yoc, Edgar Culajay, Walter Cajbón, Cesar Santos, Pablo Ortega, Ewer Rakancoj.

Por su incondicional amistad y apoyo.

### **A Margit, Ingrid y Silvia**

Por los consejos y el cariño que me han dado.

### **A todo el personal de Hidroeléctrica Poza Verde**

Fernando Zamora, Manolo Hernández, Esvin Ariano, Byron López, César García (Q.E.P.D.), Flavio Vantes, Alevon, Miguel, Marvel, Mario, Eleazar,

Baltasar, Don Agustín, Don Calixto, Antonio, Marvin, Pedro, Fredy, Valerio y Luciano; gracias por la amistad y el apoyo que me han brindado.

**A Papeles Elaborados S.A.**

Por su amistad y confianza.

**Personal del Embalse de Aguacapa**

Gracias por su amistad y cariño.

**Al Prof. Amilcar Geovanni (Q.E.P.D.)**

Por su apoyo en la realización de este trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	VI
<b>GLOSARIO</b> .....	IX
<b>RESUMEN</b> .....	XIII
<b>OBJETIVOS</b> .....	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XVII
<b>1. CONCEPTOS BÁSICOS</b>	
1.1. Función de la excitación.....	1
1.2. Tipos de sistemas de excitación tradicionales.....	4
1.2.1. Sistemas de excitación de dc.....	4
1.2.2. Sistemas de excitación de ac.....	4
1.2.2.1. Sistemas de rectificadores estacionarios.....	5
1.2.2.2. Sistema rectificador rotatorio.....	7
1.2.3. Sistemas de excitación estáticos.....	8
1.2.3.1. Sistema fuente-potencia rectificador controlado.....	8
1.3. Principios de los sistemas de excitación digitales DECS...	9
1.4. Regulación primaria.....	11
1.4.1. Regulación primaria de voltaje.....	11
<b>2. MODELADO DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DIGITAL DECS</b>	
2.1. Modelo del transductor de voltaje en las terminales de la máquina síncrona y del compensador de carga.....	15
2.2. Representación en diagrama de bloques del sistema de excitación.....	19

<b>3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DIGITAL DECS</b>	
3.1.	Descripción funcional.....	27
3.2.	Interconexión con otros equipos.....	31
<b>4.</b>	<b>FUNCIONES DE OPERACIÓN</b>	
4.1.	General.....	41
4.2.	Funciones de ajuste del DECS.....	42
4.3.	Ajustes preliminares.....	44
4.4.	Funciones de ajuste.....	45
4.4.1.	Ajuste del voltaje natural.....	45
4.4.2.	Ajuste del voltaje fino (FV).....	45
4.4.3.	Banda de ajuste del voltaje fino (FVAB).....	46
4.4.4.	Interruptor de modo manual .....	46
4.4.5.	Punto de ajuste del modo manual (MANL).....	47
4.4.6.	Baja frecuencia (UF).....	47
4.4.7.	Pendiente voltios / Hz (V/Hz).....	47
4.4.8.	Selección del rango de estabilidad.....	48
4.4.9.	Ajuste del nivel de estabilidad.....	50
4.4.10.	Ajuste del factor de potencia y del VAR .....	50
4.4.11.	Ajuste de la caída de voltaje.....	51
4.4.12.	Límite de sub-excitación / límite de sobre-excitación.....	54
4.4.13.	Sobre-excitación habilitada.....	56
4.4.14.	Arranque suave.....	57
4.4.15.	Configuración de la medición del DECS.....	57
4.4.16.	Rango de medición del transformador primario de corriente.....	58
4.4.17.	Radio del transformador de medición de voltaje...	58
4.4.18.	Emparejamiento de voltaje.....	58

4.4.19.	Banda de emparejamiento de voltaje.....	59
4.4.20.	Velocidad de emparejamiento del voltaje.....	59
4.4.21.	Paso del emparejamiento de voltaje.....	60
4.5.	Operación del panel frontal.....	60
4.5.1.	Leds de estado y diagnóstico.....	61
4.5.1.1.	Led de alarma.....	61
4.5.1.2.	Led overexc.....	61
4.5.1.3.	Led overvolt.....	62
4.5.1.4.	Led overtemp.....	62
4.5.1.5.	Led uf.....	62
4.5.1.6.	Led manual.....	62
4.5.1.7.	Led uel.....	62
4.5.1.8.	Led oel.....	63
4.5.1.9.	Led vmatch.....	63
4.5.2.	Pantalla alfa numérica.....	63
4.6.	Funciones de comunicación.....	64
4.6.1.	Especificaciones del <i>hardware</i> .....	65
4.6.2.	Interconexión del DCIM.....	66

## **5. OPERACIÓN DE UN DECS BAJO CARGA**

5.1.	Datos del generador síncrono.....	67
5.2.	Parámetros de regulación primaria de voltaje.....	67
5.2.1.	Rango de estabilidad.....	68
5.2.2.	Estabilidad.....	69
5.2.3.	VAR.....	69
5.2.4.	FP.....	70
5.2.5.	Caída de voltaje.....	71
5.3.	Limitantes de sobre-excitación y sub-excitación.....	73
5.3.1.	Térmicos.....	73

5.3.2.	Dieléctricos.....	78
5.3.3.	Saturación.....	79
5.4.	Tiempos de respuesta.....	83
5.4.1.	Régimen permanente.....	83
5.4.1.1.	Gráficos del voltaje en las terminales del generador .....	84
5.4.2.	Régimen transitorio.....	87
5.4.2.1.	Gráficos del voltaje en las terminales del generador.....	88

## **6. MANTENIMIENTO DE LA UNIDAD DECS**

6.1.	Mantenimiento preventivo.....	91
6.2.	Mantenimiento correctivo.....	92
6.2.1.	El voltaje en las terminales del generador no sube.....	92
6.2.2.	Baja salida de voltaje.....	94
6.2.3.	Alta salida de voltaje.....	94
6.2.4.	Si el generador no responde cuando se reajustan los valores programados en la unidad DECS.....	95
6.2.5.	Baja regulación de voltaje.....	95
6.2.6.	Salida inestable del generador.....	95
6.2.7.	El led uf se ilumina.....	96
6.2.8.	El led overexc se ilumina.....	97
6.2.9.	No hay caída de voltaje.....	97
6.2.10.	No hay emparejamiento de voltaje.....	97
6.3.	Mantenimiento predictivo.....	98
6.3.1.	Medición de la corriente en las terminales CTB1 Y CTB2.....	98
6.3.2.	Medición de la corriente en las terminales F+ y F-	100

6.3.3.	Medición del voltaje de entrada al módulo de poder del DECS.....	100
6.3.4.	Medición del voltaje de entrada al DECS.....	101
6.3.5.	Medición del voltaje en las terminales E1, E2 y E3.....	102
6.3.6.	Temperatura de la unidad DECS.....	103
6.3.7.	Detección de vibración en la unidad DECS.....	103
6.3.8.	Análisis por medio de termografía infrarroja.....	104
CONCLUSIONES.....		107
RECOMENDACIONES.....		109
BIBLIOGRAFÍA.....		111

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Característica de regulación de voltaje	2
2	Sistema de excitación con sistema rectificador estacionario y alternador con campo controlado	6
3	Sistema de excitación sin escobillas	7
4	Diagrama de diseño del control DECS	10
5	Curva de voltaje terminal $V_T$ versus potencia reactiva $Q$ de un generador síncrono	12
6	Elementos de la terminal de voltaje y el compensador de carga	16
7	Diagrama esquemático de un compensador de carga	17
8	Sistema de excitación simplificado con rectificadores rotativos	19
9	Modelo del amplificador	20
10	Diagrama de bloques del excitador de dc	22
11	Circuito excitador de dc separado de la armadura	23
12	Curva de saturación de carga del excitador	24
13	Característica de saturación del excitador en p.u.	25
14	Diagrama de bloques del DECS-15	27
15	Diagrama de conexiones (aplicación del PMG, rotación A-B-C) con medición en las tres fases	32
16	Medición trifásica de los voltaje del estator del generador y su conexión al DECS	36
17	Diagrama de conexiones en el DECS para obtener la función de emparejamiento de voltaje	39
18	Controles e indicadores del panel frontal	41

19	Característica V/Hz	48
20	Porcentaje de ajuste de la caída de tensión del generador Vrs. ajuste de caída de tensión programado en la Unidad DECS a diferentes valores del FP.	54
21	Limites de sobre excitación	55
22	Modulo de interfase de comunicación DECS	65
23	Interconexión entre los módulos DECS y DCIM	66
24	Caída de voltaje programada a 5%	71
25	Curva de saturación en vacío	80
26	Régimen permanente, factor de potencia inductivo a 0.98	84
27	Régimen permanente, factor de potencia inductivo a 0.98	85
28	Régimen permanente, factor de potencia inductivo a 0.98	85
29	Régimen permanente, factor de potencia capacitivo a 0.98	86
30	Régimen permanente, factor de potencia capacitivo a 0.98	86
31	Régimen permanente, factor de potencia capacitivo a 0.98	87
32	Operación en régimen transitorio	89
33	Operación en régimen transitorio	89
34	Operación en régimen transitorio	90

## **TABLAS**

I	Especificaciones eléctricas del DECS – requerimientos del poder de alimentación	31
II	Especificaciones del transformador de potencia (PT)	33
III	Conexión al DECS de las líneas de medición del voltaje del estator	35
IV	Características de operación obtenidas del DECS a partir del control de sus terminales 52 J-K Y 52 L-M	37

V	Ajustes en el panel frontal del DECS	43
VI	Tabla para seleccionar el rango de estabilidad	49
VII	Lista de pantalla frontal	64
VIII	Pérdidas en el embobinado del rotor	74
IX	Temperaturas del estator del generador síncrono a un factor de potencia de 0.97 (capacitivo)	75
X	Temperaturas del estator del generador síncrono a un factor de potencia de 0.93 (capacitivo)	75
XI	Pérdidas en el embobinado de cobre del estator	77
XII	Valores de la resistencia del estator	78
XIII	Característica en vacío	81

## GLOSARIO

<b>Alternador</b>	Generador de electricidad que transforma la energía mecánica de rotación en energía eléctrica de corriente alterna.
<b>Contactor</b>	Dispositivo utilizado para abrir y cerrar repetidamente circuitos eléctricos. Se utilizan para controlar corrientes desde algunos amperios hasta algunos miles de amperios a tensiones de hasta 600 V; para tensiones más elevadas hay disponibles diseños especiales.
<b>Excitación</b>	Es la fuerza magnetomotriz que produce el flujo magnético en el sistema de campo de una máquina eléctrica.
<b>Excitador</b>	Cualquier equipo utilizado para suministrar la corriente de campo de los generadores eléctricos.
<b>Led</b>	Diodo emisor de luz. Diodo semiconductor, normalmente de arseniuro de galio, cuya unión P-N emite luz de una frecuencia fija cuando por ella circula una corriente de suficiente magnitud.

<b>Mantenimiento predictivo</b>	Este mantenimiento trata de anticiparse a las fallas, y lo hace a través del uso de instrumentación digitalizada por medio del empleo de técnicas o tecnologías de diagnóstico.
<b>Potencia reactiva</b>	El producto de la corriente por la componente reactiva de la tensión, o de la tensión por la componente reactiva de la corriente, en cada caso bajo condiciones senoidales. Se representa por el símbolo Q.
<b>Relé</b>	Dispositivo diseñado de manera que el efecto eléctrico, magnético o térmico producido al aplicar energía eléctrica al mismo, genere un cambio brusco y predeterminado en uno o más circuitos eléctricos. Puede ser del tipo electromecánico o electrónico.
<b>SCR</b>	Es un rectificador controlado o diodo. Su voltaje de ruptura o de encendido puede ajustarse por medio de una corriente que fluye hacia su compuerta de entrada.
<b>Tiristor</b>	Conocido también como diodo PNP. Dispositivo semiconductor hecho de cuatro capas de material semiconductor.

**Transductor**

Dispositivo que, bajo la influencia de una variación de energía de una forma o en un sistema, produce una correspondiente variación del nivel de otra forma de energía o en otro sistema.

**Triac**

Es un dispositivo que se comporta como dos SCR conectados en contraposición, con una compuerta de paso común; puede ir en cualquier dirección desde el momento en que el voltaje de ruptura se sobrepasa.



## RESUMEN

Se describe la función del sistema de excitación en un generador síncrono, los tipos de sistemas de excitación y las características de los mismos; además, se indica qué es la regulación primaria de voltaje en un generador síncrono y las características que la definen.

En el modelado del sistema de excitación, se describen los modelos matemáticos del DECS.

La descripción del sistema de excitación digital, describe los circuitos que conforman el DECS, la función que cumple cada uno en la unidad DECS y se indican los dispositivos que deben conectarse a las terminales del DECS para hacerlo funcionar adecuadamente.

Se indican las funciones de ajuste que trae integradas el DECS; luego se analizan, para determinar los valores de ajuste adecuados.

La operación bajo carga de un sistema digital de control de excitación, indica los parámetros de ajuste del DECS que intervienen en la regulación primaria de voltaje, y las características que determinan sus límites de sub y sobre excitación. Luego se muestran gráficas que indican cómo es el comportamiento del voltaje en las terminales del generador, cuándo está operando en régimen permanente y en régimen transitorio.

Para reducir el riesgo de un mal funcionamiento del sistema de control de excitación, se dan a conocer los programas de mantenimiento que deben ser realizados y cómo solucionar las fallas más comunes que pueden presentarse.

# OBJETIVOS

## General

Definir y analizar las funciones de operación de los controles digitales de excitación (DECS) y establecer los límites de operación de estas funciones para obtener una adecuada regulación primaria de voltaje.

## Específicos

1. Describir la función básica de un sistema de control de excitación digital sobre un generador síncrono de potencia.
2. Determinar las diferentes funciones y valores que pueden tomar los parámetros de control del sistema de excitación digital para operar un generador síncrono.
3. Establecer las características de regulación primaria de voltaje que pueden ser obtenidas de los sistemas de excitación digital (DECS) para el control del voltaje en las barras de salida del generador.
4. Indicar la serie de procedimientos para realizar el mantenimiento del sistema de excitación.



# INTRODUCCIÓN

En la actualidad han sido desarrollados nuevos sistemas de control de la excitación en generadores eléctricos de potencia; con la introducción de sistemas computarizados para el control de funciones en máquinas eléctricas, se han desarrollado sistemas de control de excitación digitales; basados en circuitos integrados y microprocesadores, los cuales permiten implementar fácilmente estrategias de control complejas.

Las funciones de un control de excitación digital incluyen el control de voltaje, flujo de potencia reactiva, factor de potencia y la mejora de la estabilidad de voltaje del sistema; características importantes que deben mantenerse dentro de límites aceptables para asegurar la correcta regulación primaria de los generadores eléctricos.

Para cumplir con las características de sincronización y las normas de Coordinación del Administrador del Mercado Mayorista referentes a la regulación primaria de voltaje de los generadores ya sincronizados, es esencial la correcta programación de las funciones de control del sistema de excitación digital (DECS).

Con lo descrito se puede conocer la importancia que tienen en la actualidad estos sistemas de control de excitación en los generadores síncronos. Como caso de estudio y aplicación se analizará el sistema de excitación de los generadores de la central hidroeléctrica Poza Verde.

Para describir las funciones que desempeña el DECS durante el proceso de sincronización, control de tensión en las barras del generador y flujo de potencia reactiva.

# 1. CONCEPTOS BÁSICOS

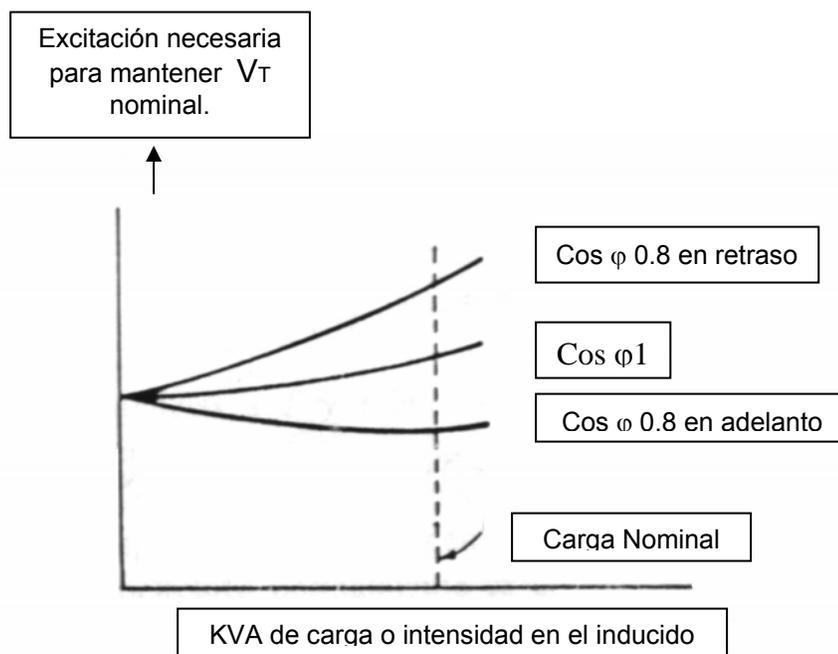
## 1.1. Función de la excitación

La función básica de un sistema de excitación es la de proveer la corriente directa al campo del generador para alcanzar su sincronización. Además, el sistema de excitación controla y protege las funciones esenciales para el cumplimiento satisfactorio del funcionamiento del sistema de potencia, para esto controla el voltaje y la corriente de campo.

Las funciones de control de un sistema de excitación incluyen el control de voltaje y el flujo de potencia reactiva; que permite la mejora de la estabilidad del sistema. Las funciones de protección del sistema de excitación aseguran mantener los límites de la capacidad, de la sincronización del generador y otros equipos, para que estos trabajen dentro de los parámetros para los que fueron diseñados. La función de los requerimientos del sistema de excitación está determinada por las consideraciones de la sincronización del generador, igual que del sistema de potencia. Dentro de los requerimientos básicos, están que el sistema de excitación supla y ajuste automáticamente la corriente de campo del generador; en la etapa de sincronización y con el generador interconectado, para mantener de esta manera el voltaje terminal, ya que la salida varía continuamente dentro de la capacidad del generador. Estos requerimientos son visualizados a partir de las curvas de regulación de voltaje, estas curvas indican la corriente de excitación necesaria para que la tensión nominal en las terminales del generador se mantenga constante al variar la carga.

Además permite mantener el factor de potencia de la carga constante; esta gráfica representa la característica de regulación del sistema de excitación, y se muestra en la figura 1.

**Figura 1. Característica de regulación de voltaje**



Fuente: Fitzgerald Higgin Botham, Teoría y análisis de las máquinas eléctricas, página 280.

Se requiere que el sistema de excitación sea capaz de responder a alteraciones instantáneas o de corta duración, por medio de la consistencia de la fuerza del campo del generador. La capacidad del generador para soportar estas alteraciones temporales está limitada por varios factores, estos son fallo del aislante debido a un alto voltaje de campo, calentamiento del rotor debido a una alta corriente de campo, calentamiento del estator debido a una sobrecarga de la corriente de armadura, calentamiento del núcleo durante una operación de baja excitación.

Desde el punto observador del sistema de potencia, el sistema de excitación debe contribuir a obtener un efectivo control del voltaje y a mejorar la estabilidad del sistema; debe ser capaz de responder rápidamente a una alteración ya que así participa en la estabilidad transitoria.

Los elementos que conforman un sistema de excitación son:

- Excitador: provee el voltaje de DC para formar el campo del generador.
- Regulador: procesa y amplifica las señales del control de entrada a un nivel y forma apropiada para el control del excitador.
- Transductor de la terminal de voltaje y compensador de carga: mide, rectifica y filtra el voltaje de la terminal del generador a un valor de voltaje de DC; y lo compara con una referencia que representa el voltaje deseado en la terminal del generador.
- Estabilizador del sistema de potencia: provee una señal adicional de entrada al regulador para mejorar las oscilaciones del sistema de potencia. Algunas de las señales de entrada comúnmente usadas son la desviación de la velocidad del rotor, poder de aceleración y desviación de frecuencia.
- Circuitos protectores y limitadores: son funciones protectoras que aseguran que los límites de la capacidad del excitador y el generador sincronizado no sean excedidos. Algunas de las funciones comúnmente usadas son limitador de la corriente de campo, limitador de la corriente de excitación máxima, limitador de la terminal de voltaje, protección y regulador de Volt por Hz, limitador de baja excitación.

## **1.2. Tipos de sistemas de excitación tradicionales**

Durante los últimos años han ido evolucionando los sistemas de excitación de generadores síncronos. Los sistemas de excitación pueden ser clasificados en las siguientes tres categorías, que dependerán de la fuente de poder del sistema de excitación.

### **1.2.1. Sistemas de excitación de DC**

Los sistemas de excitación de este tipo utilizan generadores de DC como la fuente de poder de la excitación y proveen la corriente de excitación al rotor del generador sincronizado por medio de anillos deslizantes. El excitador puede ser impulsado por un motor o el eje del generador y puede ser auto excitado o excitado de manera separada. Cuando es excitado de manera separada el excitador de campo es alimentado por un excitador piloto que incluye un imán permanente en el generador.

Los sistemas de excitación de DC fueron utilizados y desarrollados a través de los años, entre 1920 y 1960, cuando perdieron popularidad y fueron sustituidos por excitadores de AC. Estos sistemas han ido desapareciendo gradualmente, así como antiguos sistemas han sido reemplazados por sistemas de excitación de AC o Estáticos.

### **1.2.2. Sistemas de excitación de AC**

Este tipo de sistemas de excitación usa alternadores (máquinas de ac) como fuente de poder. Usualmente el excitador está en el mismo eje del rotor del generador.

Se rectifica la salida de ac del excitador por medio de rectificadores para producir el voltaje de dc necesario para el campo del generador, los rectificadores pueden ser estacionarios o rotatorios.

Los sistemas de excitación de ac antiguos usaban combinaciones de amplificadores magnéticos y rotatorios como reguladores. Muchos sistemas nuevos usan reguladores amplificadores electrónicos.

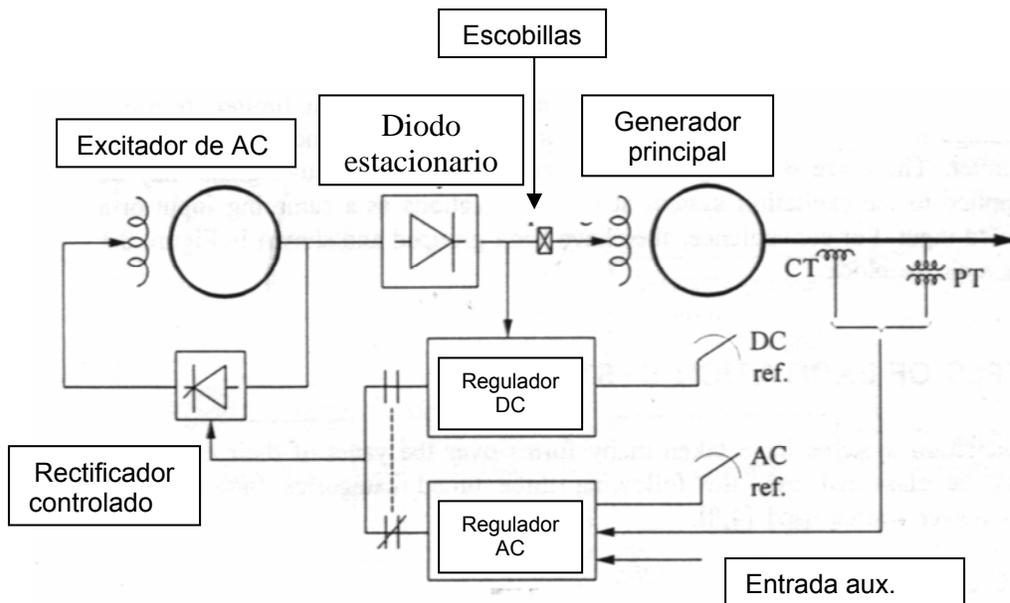
Los sistemas de excitación de ac pueden tomar muchas formas según los arreglos de los rectificadores, métodos de control de salida del excitador y métodos de control de excitación para el excitador. A continuación se describen las diferentes formas que toman los sistemas de excitación de ac en uso.

#### **1.2.2.1. Sistemas de rectificadores estacionarios**

Con rectificadores estacionarios, la salida de dc es alimentada al devanado de campo del generador por medio de anillos deslizantes.

Un diagrama unifilar simplificado de este sistema de excitación es mostrado en la figura 2, ilustra el campo controlado del alternador y el sistema rectificador de la excitación. En el sistema mostrado; que es representado del sistema de excitación General Electric Alterrex, el alternador del excitador es controlado desde el rotor del generador principal. El excitador es excitado por sí sólo con potencia derivada del campo por medio de tiristores rectificadores. El regulador de voltaje obtiene su potencia de alimentación de la salida de voltaje del excitador.

**Figura 2. Sistema de excitación con sistema rectificador estacionario y alternador con campo controlado.**



**Fuente: General Electric, Sistema ALTERREX, Power system stability and control, página 321.**

Cuando rectificadores de control (tiristores) son usados, el regulador controla directamente el voltaje de salida de dc del excitador.

Como se muestra en la figura 2, dos módulos independientes de regulación son provistos en este sistema de excitación, y estos son:

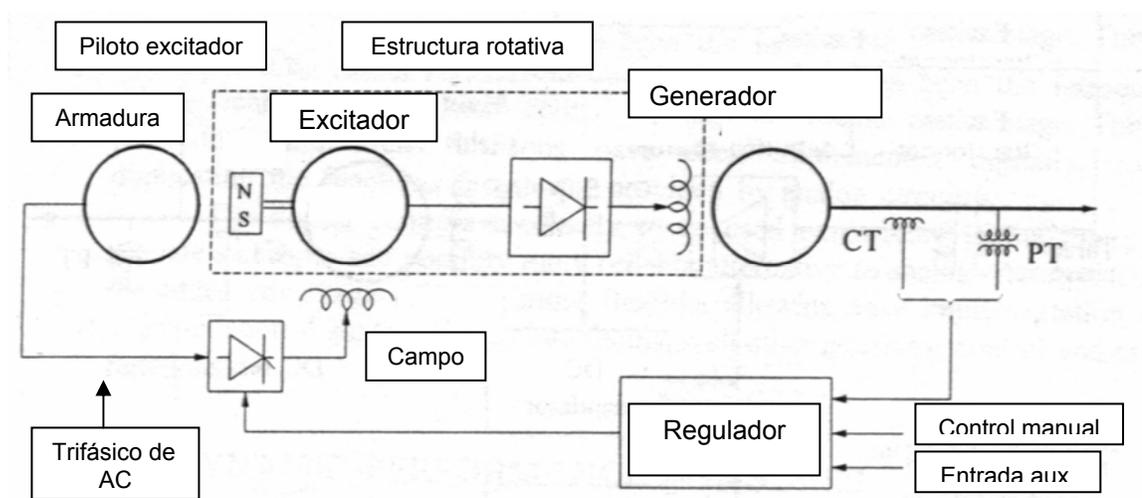
- Regulador de ac: utilizado para mantener automáticamente el voltaje de la terminal del estator del generador principal a un valor deseado, correspondiendo a la referencia de ac programada.
- Regulador de dc, utilizado para mantener constante el voltaje de campo del generador, corresponde a la referencia de dc programada.

El regulador de dc o control de modo manual, provee el control en situaciones donde el regulador de ac falla o cuando es desconectado.

### 1.2.2.2. Sistema rectificador rotatorio

Con el uso de rectificadores rotatorios, la necesidad del uso de anillos deslizantes y escobillas es eliminada, la salida de dc es alimentada directamente al campo del generador principal. Como se muestra en la figura 3, la armadura del excitador de ac y los diodos rectificadores rotan con el campo principal del generador. Un pequeño piloto excitador de ac, con un imán permanente en el rotor (mostrado en la figura como N-S), rota con la armadura del excitador y los diodos rectificadores. La salida rectificada del estator del piloto excitador energiza el campo estacionario del excitador de ac. El regulador de voltaje controla el campo del excitador de ac, y el campo de excitador controla el campo del generador principal.

**Figura 3. Sistema de excitación sin escobillas**



Fuente: Kundur Prabha, Power system stability and control, página 323.

Este sistema fue desarrollado para eliminar los problemas por el uso de carbones, y fue construido para suplir las altas corrientes de campo de generadores muy grandes; por ejemplo, la potencia suplida al campo de un generador de 600 MW está en el orden de 1 MW.

### **1.2.3. Sistemas de excitación estáticos**

Todos los componentes en este sistema son estacionarios. Rectificadores estáticos; controlados y no controlados, proveen directamente la corriente de excitación al campo del generador sincronizado, por medio de anillos deslizantes. La alimentación de poder a los rectificadores es desde el mismo generador (o bus principal) por medio de un transformador para bajar el voltaje a un nivel apropiado o en algunos casos por medio de embobinados auxiliares en el generador. A continuación se describe un sistema de excitación estático que ha sido usado ampliamente:

#### **1.2.3.1. Sistema fuente-potencia rectificador-controlado**

En este sistema la potencia del excitador es suplida por medio de un transformador alimentado desde las terminales del generador o de la estación auxiliar del bus, y es regulado por un rectificador controlado. Este tipo de sistema de excitación estático es comúnmente conocido como bus-fed (alimentado por el bus) o transformer-fed (alimentado por el transformador).

Este sistema tiene una pequeña constante de tiempo. El máximo voltaje de salida del excitador (límite de voltaje) depende de la entrada de voltaje de ac. Así pues, durante faltas en el voltaje del sistema produce un bajo voltaje en la terminal del generador, el límite de voltaje disponible del excitador es reducido.

Esta limitación del sistema de excitación es, en muchos casos, compensada por su capacidad de respuesta instantánea y por su alta capacidad de fuerza del campo después de una falla. Para generadores conectados a grandes sistemas de potencia, estos sistemas de excitación funcionan satisfactoriamente.

### **1.3. Principios de los sistemas de excitación digitales DECS**

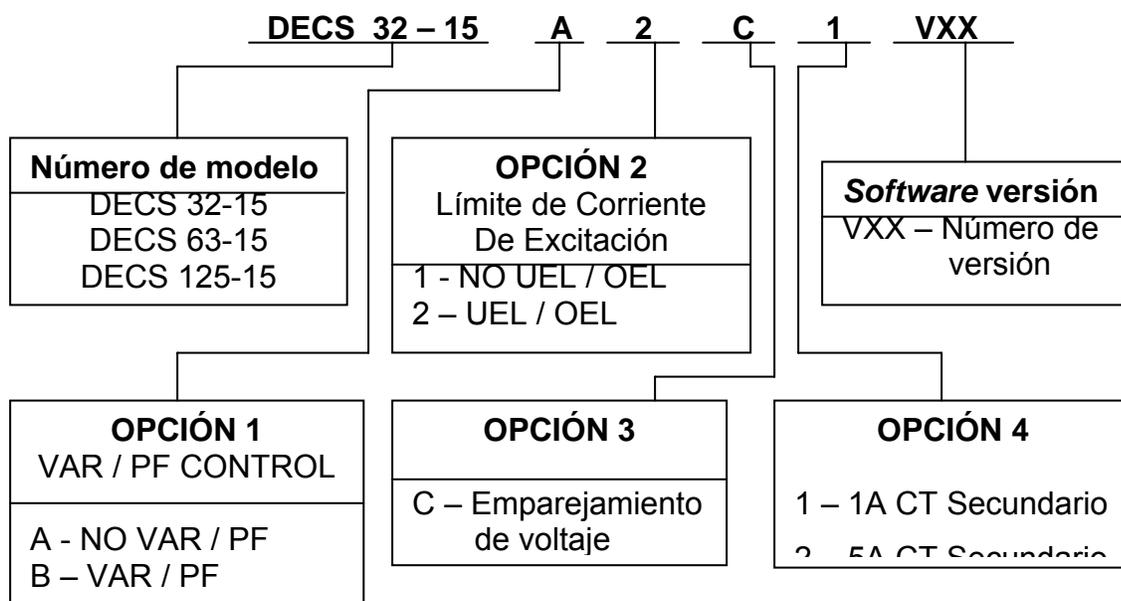
El último desarrollo en sistemas de excitación de generadores síncronos, ha sido la introducción de tecnología digital. Control, protección y funciones lógicas han sido implementadas digitalmente, duplicando esencialmente las funciones previamente provistas por circuitos análogos.

Tienen agregados los avances de ser más flexibles, permiten la sencilla implementación de más estrategias de control complejo, e interactúan fácilmente con otros controles del generador y funciones protectoras.

El sistema de control digital de excitación (DECS) es un dispositivo electrónico, de estado sólido, basado en un microprocesador. El DECS regula la salida de voltaje al devanado inductor de un generador, sea este con escobillas o sin escobillas, controlando así la corriente hacia el campo del generador. La entrada de potencia al DECS puede provenir de un generador de imanes permanentes (PMG), o desde la salida del generador usando un sistema de excitación convencional con un excitador controlado por medio del módulo de potencia del DECS. Este módulo está incluido en todos los DECS.

En la figura 4, se muestra el diagrama de diseño del DECS. En el ejemplo se especifica el diagrama del DECS 32-15 A2C VXX. Éste provee al campo 32 voltios de dc a un máximo de 15 amperios de dc. Una opción que está disponible pero que no fue elegida es control VAR/PF. Una opción que si fue elegida es limitación de sobre excitación y limitación de baja excitación. Una opción para transformadores de corriente secundaria para 1 o 5 amperios, fue seleccionada a 1 amperio. El número de versión del *software*, que es colocado para referencia general solamente, va a ser agregado por el fabricante para describir la instalación de la versión de *software*.

**Figura 4. Diagrama de diseño del control DECS**



Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 1-1.

## **1.4. Regulación primaria**

### **1.4.1. Regulación primaria de voltaje**

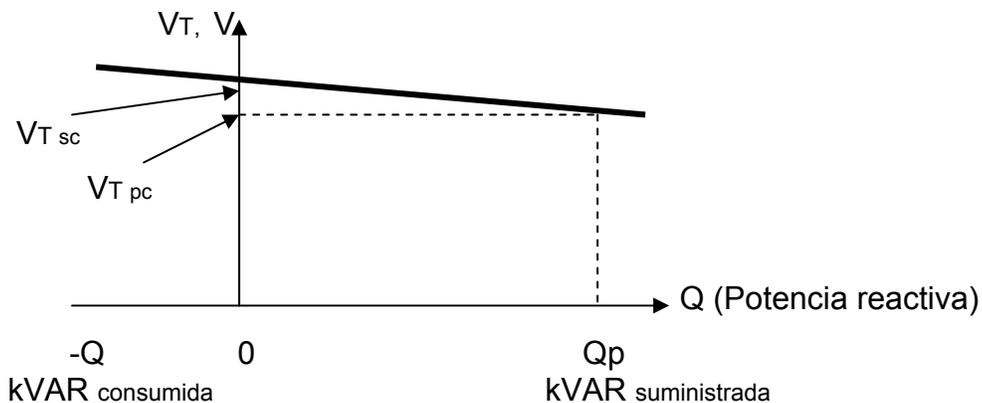
En un generador síncrono, el voltaje es inducido en el devanado de la armadura como resultado del movimiento relativo entre el campo y la armadura. La regulación primaria de voltaje del generador síncrono es manejada por el control de excitación. El control de excitación suministra la corriente necesaria al campo del generador para mantener constante la tensión en las barras de salida, punto en donde el generador se conecta con la carga. La corriente de campo regula la tensión de salida del generador, para controlar esta corriente se debe programar el control de la excitación para aumentar o disminuir la tensión de salida del generador, según las necesidades de la carga; la función de control del sistema de excitación permite la regulación primaria de voltaje de un generador síncrono.

La regulación primaria de voltaje es muy importante por los cambios constantes que se producen en la carga conectada al generador. El voltaje en las barras de salida del generador aumenta o disminuye constantemente dependiendo del tipo de carga. La carga que es aplicada a un generador síncrono puede ser con factor de potencia en atraso (carga inductiva de potencia reactiva), con factor de potencia en adelanto (carga capacitiva de potencia reactiva) y con factor de potencia unitario (potencia reactiva cero).

Si se aplican cargas en atraso a un generador, su tensión en las barras de salida disminuye significativamente. Si se aplican cargas en adelanto a un generador, la tensión en las barras de salida del generador aumentará significativamente. Si se aplican cargas con factor de potencia unitario a un generador, hay una ligera disminución en la tensión de las barras de salida.

Es posible graficar la relación existente entre la potencia reactiva Q y la tensión en los bornes del generador ( $V_T$ ). El aumento de una carga en atraso, hace que el voltaje  $V_T$  disminuya. De igual manera, el aumento de una carga en adelanto, hace que el voltaje  $V_T$  aumente. La figura 5, relaciona la potencia reactiva Q y el voltaje del generador  $V_T$  y muestra lo que ocurre cuando se aumenta la carga en atraso de un generador; este aumento de carga en atraso hace que aumente el consumo de potencia reactiva Q de la carga, como resultado el voltaje  $V_T$  disminuye. Esta característica no es necesariamente lineal, pero muchos reguladores de voltaje incluyen funciones especiales para volverla lineal.

**Figura 5. Curva de voltaje terminal  $V_T$  versus potencia reactiva Q de un generador síncrono.**



**Fuente Stephen J. Chapman, Máquinas eléctricas, página 481.**

La forma adecuada para describir el comportamiento de la tensión en los generadores es por medio de su regulación de voltaje (RV), que se define por la ecuación

$$RV = \frac{V_{sc} - V_{pc}}{V_{pc}} * 100\%$$

en donde  $V_{sc}$  es la tensión en vacío y  $V_{pc}$  la tensión a plena carga del generador.

En la figura 1, se muestra la corriente de excitación necesaria para mantener constante el voltaje  $V_T$  de las terminales del generador al variar la carga con factor de potencia constante, esta gráfica muestra la característica de regulación de voltaje de un generador síncrono y es operada por el control de excitación.



## **2. MODELADO DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DIGITAL “DECS”**

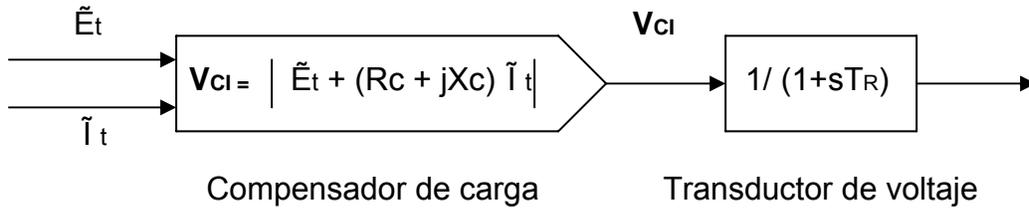
Los modelos matemáticos de sistemas de excitación son necesarios para asegurar que sean obtenidos los requerimientos de las funciones del sistema de excitación, para el diseño y coordinación de controles auxiliares y circuitos protectores, y además, para estudiar la estabilidad del sistema de potencia.

El siguiente modelo está basado en el sistema de excitación Basler DECS-15

### **2.1. Modelo del transductor de voltaje en las terminales de la máquina síncrona y del compensador de carga**

El modelo Basler DECS-15 implementa digitalmente el compensador de carga usando los valores RMS de la terminal de voltaje y el valor promedio de la terminal de corriente junto con el ángulo de fase entre estos. La medición del ángulo de fase está basada en cero cruzamientos de la fase A y C de voltaje con respecto a la fase B de corriente. El modelo común mostrado en IEEE 421.5 1992, para transductores de la terminal de voltaje y compensadores de carga pueden ser usados para el funcionamiento del modelo Basler DECS-15 mostrado en la figura 6.

**Figura 6. Elementos de la terminal de voltaje y el compensador de carga**



Fuente: Kundur Prabha, *Power system stability and control*, página 323.

Los valores usados en este modelo pueden obtenerse desde los *settings* del DECS-15, y se muestran a continuación:

$R_c = 0$  (Compensación de carga resistiva no disponible)

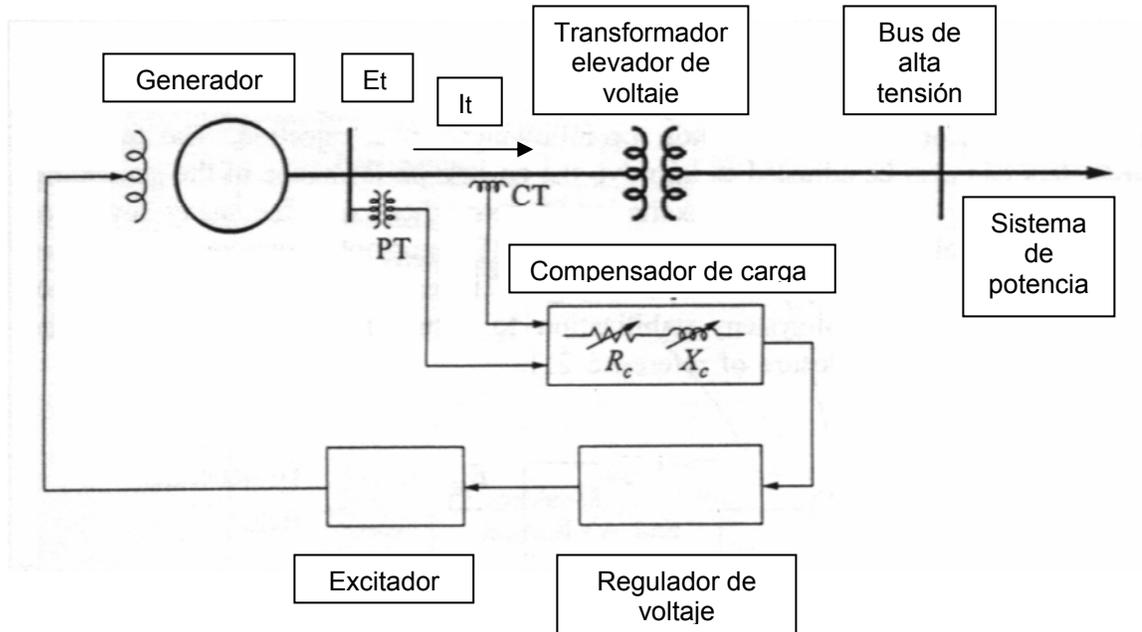
$X_c = \{ 1 - (1 - (DRP/100))^n \} \neq 0$

$T_R = 30$  ms

Donde: DRP es el porcentaje DROOP (% de caída de voltaje) programado en el Basler DECS-15; valor que puede estar entre el rango de 0 a 20.

El regulador automático de voltaje (AVR) normalmente controla el voltaje en la terminal del estator del generador. La compensación de carga es usada para controlar el voltaje en un punto interno al generador o externo a él. Esto se logra construyendo un circuito adicional dentro del regulador automático de voltaje (AVR), como se muestra en la figura 7.

**Figura 7. Diagrama esquemático de un compensador de carga**



**Fuente: Kundur Prabha, Power system stability and control, página 336.**

El compensador de carga tiene la resistencia ajustable ( $R_c$ ) y la reactancia inductiva ( $X_c$ ), donde,  $R_c$  y  $X_c$  simulan la impedancia entre las terminales del generador y el punto en el cual el voltaje es controlado efectivamente. Al usar esta impedancia y medir la corriente de armadura, una caída de voltaje es detectada y agregada o sustraída de la terminal de voltaje. La magnitud del voltaje compensador ( $V_c$ ); que es alimentado al AVR, está dada por

$$V_c = | \tilde{E}_t + (R_c + jX_c) \tilde{I}_t |$$

El voltaje de salida del transductor  $V_c$ , forma la señal de control principal para el sistema de excitación. Con  $R_c$  y  $X_c$  positivos en la ecuación anterior, la caída de voltaje a través del compensador, es agregado a la terminal de voltaje.

El compensador regula el voltaje a un punto interno dentro de las terminales del generador y por lo tanto provee una baja caída de voltaje. Esto es usado para asegurar que se comparta la potencia reactiva entre generadores, ésta es entregada en el bus cercano a sus terminales y comparte un transformador común elevador de tensión entre los generadores. El compensador de carga funciona como un compensador de corriente reactiva, creando una unión artificial entre generadores. Sin esta operación del compensador de carga, uno de los generadores tratará de controlar el voltaje de la terminal manteniéndolo un poco más alto que el voltaje del otro; por lo tanto así un generador proveería toda la potencia reactiva requerida, mientras el otro absorbería toda la potencia reactiva permitida por sus límites de sub-excitación.

Con  $R_c$  y  $X_c$  negativas, el compensador regula el voltaje a un punto más allá de las terminales del generador. Esta forma de compensación es usada para compensar la caída de voltaje a través del transformador de paso elevador de tensión, cuando dos o más unidades son conectadas a través de transformadores individuales.

En la mayoría de los casos, la componente resistiva de la impedancia será compensada es insignificante y por esta razón  $R_c$  puede ser ajustada a cero. Cuando la compensación de carga no se usa,  $R_c$  y  $X_c$  son cero.

La constante de tiempo  $T_R$  representa la rectificación y el filtrado en la terminal de voltaje del generador.

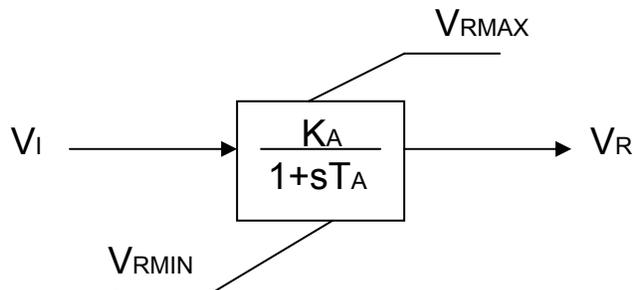
Las variables de entrada  $E_t$  e  $I_t$  son fasores. Si la compensación de carga no se usa y  $T_R$  es despreciable; entonces,  $V_c = E_t$ .



Estos valores continuos de tiempo PID, son implementados en el controlador digital DECS-15.

La sección del diagrama de bloques de la figura 8 que aparece en la figura 9, representa el amplificador del sistema de excitación:

**Figura 9. Modelo del amplificador**



**Fuente: Kundur Prabha, Power system stability and control, página 356.**

Donde.

$K_A$  = Ganancia del regulador

$T_A$  = Constante de tiempo del amplificador regulador

El amplificador puede ser magnético, rotativo, o electrónico. Los amplificadores magnéticos y rotativos se caracterizan por incluir la ganancia y una constante de tiempo. La salida del amplificador está limitada por la saturación o las limitaciones de la fuente poder; está es representada por los límites  $V_{RMAX}$  y  $V_{RMIN}$ .

El factor de ganancia  $K_A$  es expresado en  $V_{dc} / V_{ac}$ , y es utilizado por causa de las variaciones en la configuración del sistema.  $K_A$  es expresado como sigue:

$$K_A = \frac{1}{K_{PT}} - K_{RS} - \frac{383 - STAB}{2 \cdot SF} - V_{in} - V_s \quad (V_{dc}/V_{ac})$$

Donde.

$K_{PT}$  = Radio del transformador de medición PT (Primario / Secundario)

$K_{RS}$  = Rango de ganancia seleccionado

STAB = Control fino de ganancia

SF = Control de ganancia natural

$V_{in}$  = Entrada de voltaje de la etapa de potencia =  $E_{tbase} / K_{ETR}$

$E_{tbase}$  = Voltaje base de la terminal

$K_{ETR}$  = Radio del transformador de excitación =  $E_{tbase} / V_{IN}$  (Primario/Secundario)

$V_s$  = Voltaje medido

El factor de ganancia  $K_A$ , en valores por unidad es como sigue:

$$K_A \text{ (in pu)} = \frac{1}{K_{PT}} - K_{RS} - \frac{383 - STAB}{2 \cdot SF} - V_{IN} - V_s \left( \frac{E_{tbase}}{E_{FDbase}} \right) \text{ (in Pu)}$$

La constante  $K_{RS}$  es el rango de ganancia seleccionado y es una función del rango del sensor de voltaje así:

Sensor del generador rango de voltaje	Rango seleccionado	$K_{RS}$
0 - 170 voltios	1	1.1706e-7
170 - 300 voltios	2	5.1897e-8
300 - 600 voltios	3	1.2955e-8

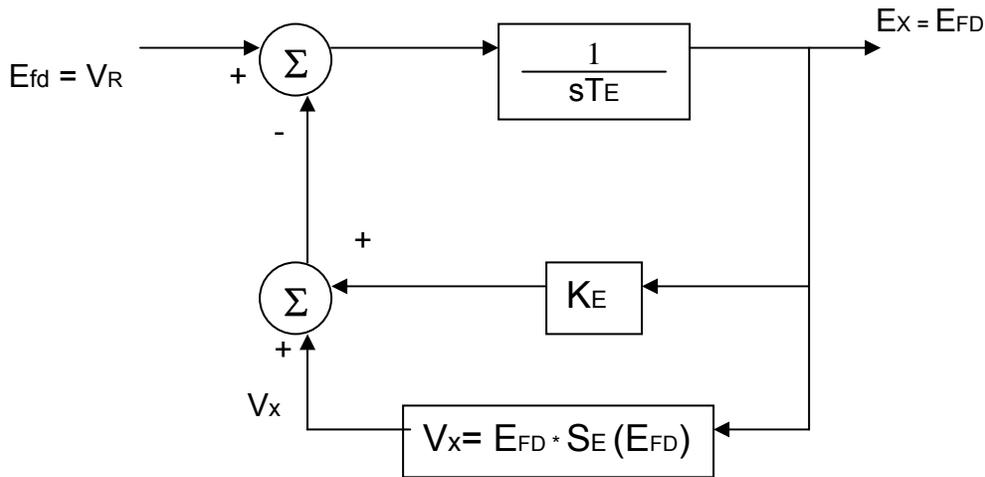
La relación entre el factor de ganancia  $K_A$  y STAB, y SF puede ser cualitativamente descrito como sigue:

**STAB:** provee el control de ganancia fina sobre  $K_A$ ; cuando STAB se incrementa,  $K_A$  disminuye y viceversa. Su rango varía desde 0 a 255, usualmente es seleccionado a 128.

**SF:** provee el control de ganancia natural sobre  $K_A$ . Su rango varía de 0 a 7, típicamente se selecciona a 7.

La sección del diagrama de bloques de la figura 8 que se presenta en la figura 10, representa el diagrama de bloques del excitador de dc.

**Figura 10. Diagrama de bloques del excitador de dc**



Fuente: Kundur Prabha, Power system stability and control, página 351.

Donde:

$$K_E = R_{ef} / R_g$$

$$T_E = L_{fu} / R_g$$

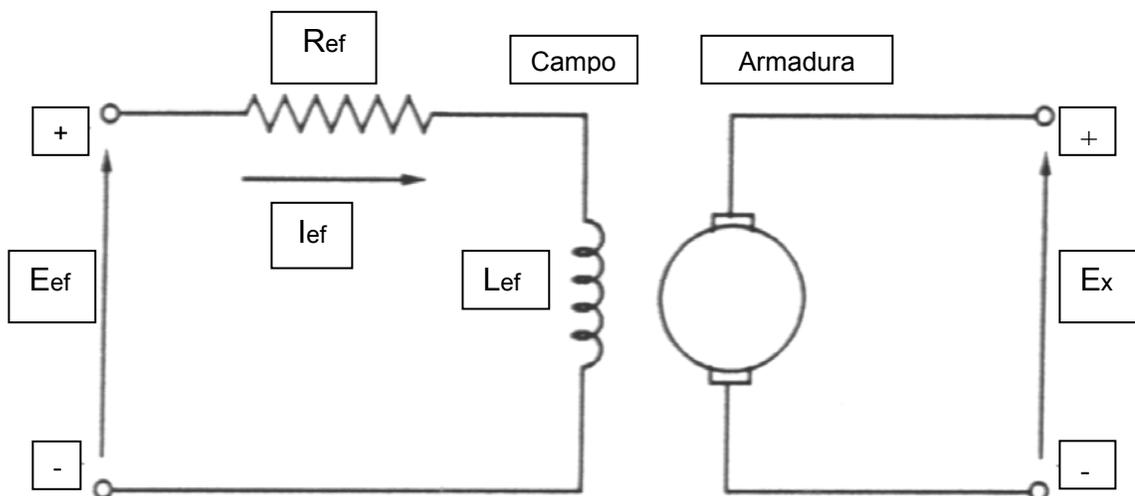
$$L_{fu} = L_{ef} \begin{pmatrix} \bar{I}_{ef0} \\ \bar{E}_{x0} \end{pmatrix}$$

$$S_E(\bar{E}_X) = S_e(\bar{E}_X) \left( \frac{R_{ef}}{R_g} \right), \quad S_e \text{ y } \bar{E}_X \text{ son valores por unidad (pu).}$$

$S_e(\bar{E}_X) = (A - B) / (B)$ . Donde, A y B son valores de corriente  $I_{ef}$ , están dados en valores pu (refiérase a la figura 13).

En la figura 11, se muestra el diagrama esquemático que representa el excitador de dc de la figura 10.

**Figura 11. Circuito excitador de dc separado de la armadura**

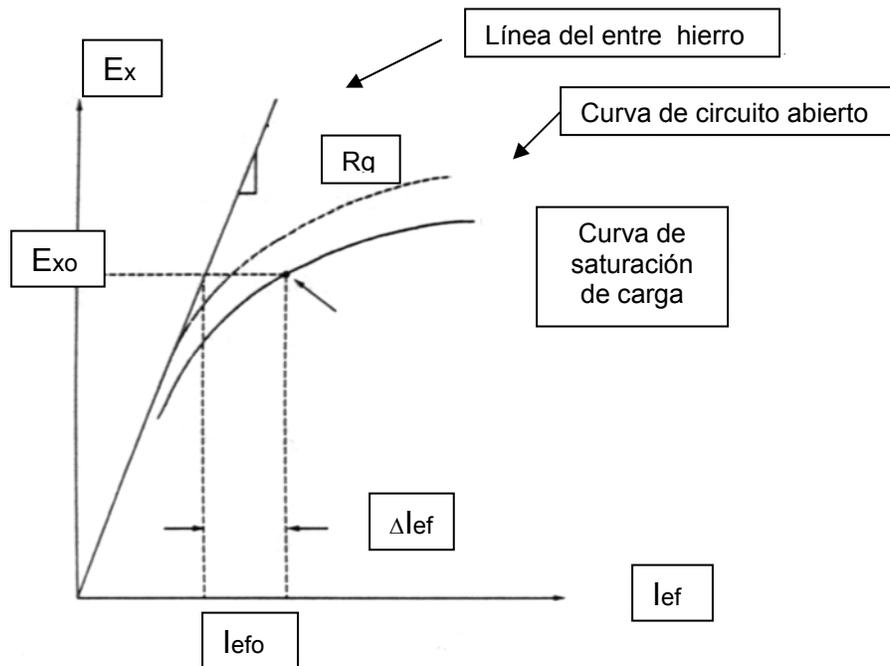


**Fuente: Kundur Prabha, Power system stability and control, página 348.**

El voltaje de entrada  $E_{ef}$ , es el voltaje  $V_R$  de salida del regulador. La salida de voltaje  $E_x$  del excitador de dc, es directamente aplicada al campo del generador síncrono.

$R_g$  será la pendiente de la recta del entrehierro de la máquina síncrona. La figura 12 muestra la curva de saturación de carga del excitador, en esta figura se puede observar la línea del entrehierro.

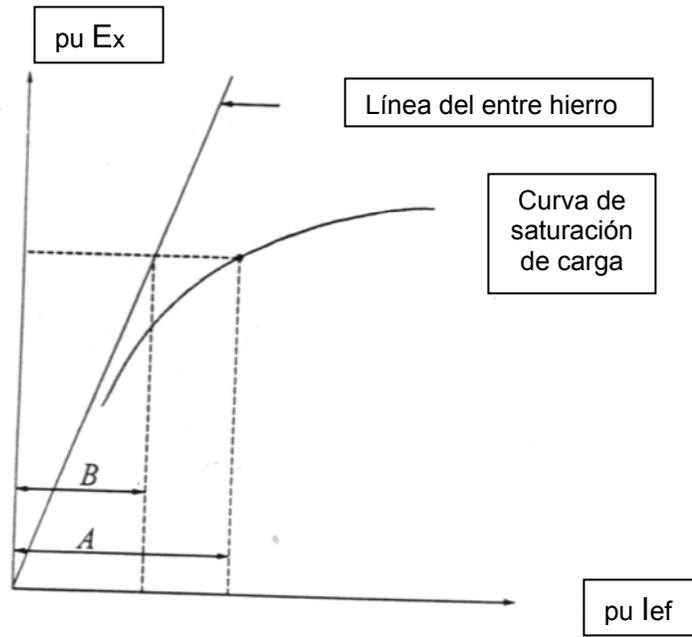
**Figura 12. Curva de saturación de carga del excitador**



**Fuente: Kundur Prabha, Power system stability and control, página 349.**

En la ecuación  $S_e(\bar{E}_x) = (A - B) / (B)$ , los valores A y B son obtenidos a partir de la gráfica de características de saturación del excitador mostrados en la figura 13.

Figura 13. Característica de saturación del excitador en pu



Fuente: Kundur Prabha, Power system stability and control, página 350.

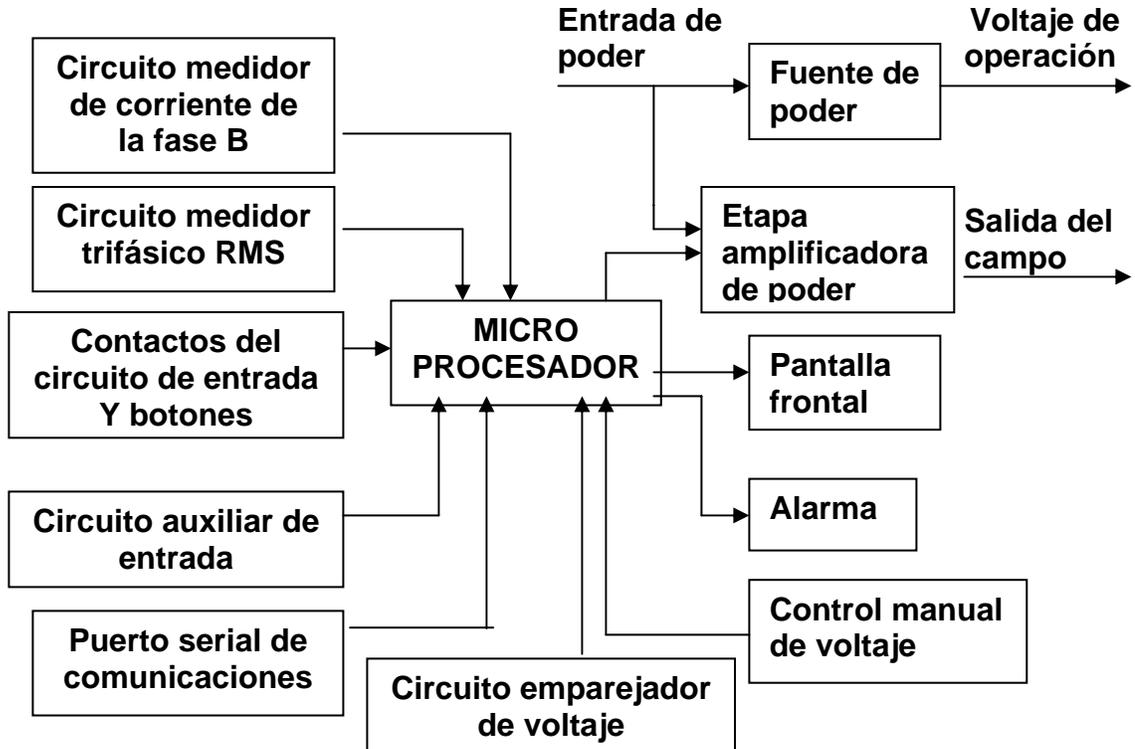


### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DIGITAL “DECS”

#### 3.1. Descripción funcional

El sistema digital de control de excitación DECS-15 utiliza una serie de circuitos digitales y analógicos, cada uno de estos circuitos han sido diseñados para alcanzar el óptimo funcionamiento del sistema de excitación del generador síncrono. En la figura 14, se muestra el diagrama de bloques de los circuitos que forman el sistema de excitación DECS-15.

Figura 14. Diagrama de bloques del DECS-15



Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 2-1.

La función que cumple cada uno de los circuitos del diagrama anterior es la siguiente:

- **Fuente de poder:** convierte la entrada de voltaje, la rectifica y filtra, proporciona las tensiones requeridas por los circuitos del DECS. Un mínimo de 8 voltios de ac es necesario para lograr la regulación de tensión en la línea de voltaje del generador, cuando se usa el DECS.
- **Etapla amplificadora de poder:** este circuito recibe la potencia entrante y proporciona la tensión y la corriente de campo, que dependerán de los pulsos de tiempo que envía el microprocesador.
- **Pantalla frontal:** está en el panel frontal, consiste en 9 leds y un visor alfanumérico. Los leds indican las condiciones de operación de la unidad. El visor alfanumérico es de 4 caracteres y es usado para seleccionar los ajustes del sistema y monitoreo de las condiciones de operación seleccionadas. Los leds y el visor alfanumérico son controlados por el microprocesador.
- **Circuito emparejador de voltaje:** este circuito permitirá el control de la salida del generador, y el emparejamiento del nivel de voltaje de éste con el voltaje del bus, previo a la sincronización. Es programado a través del panel frontal del DECS o a través del modulo de interfase de comunicación (DCIM).

- **Circuito medidor de corriente de la fase B:** monitorea la corriente de salida de la fase B del generador. Esta señal es rectificadora y convertida a una señal digital dentro del DECS para ser usada por el microprocesador. Esta medición es usada para calcular el PF (factor de potencia) y los VARs (potencia reactiva).
- **Circuito medidor de voltaje RMS:** este circuito monitorea la salida de voltaje en cualquiera o en las tres fases de voltaje. Esta señal es rectificadora y convertida dentro del DECS a una señal digital para ser usada por el microprocesador. Se selecciona a través del menú de ajustes en el panel frontal del DECS.
- **Botones de contacto del circuito de entrada:** provee de botones en el panel frontal del DECS, permite conectar el microprocesador y el control de operación DECS con el exterior .
- **Circuito auxiliar de entrada:** permite añadir dispositivos de control externos a la salida del DECS, así como a la salida de voltaje del generador. Este circuito es adecuado para recibir una señal de un valor de  $\pm 3$  voltios de dc. Un  $\pm 30\%$  de cambio en la salida de voltaje del generador, es asociado con un  $\pm 3$  Vdc de señal recibida entre las terminales A y B.
- **Puerto serial de comunicación:** la conexión de comunicación serial, es un conector que permite la comunicación entre el DECS y una PC por medio del uso del modulo de interfase de comunicación (DCIM) y el *software* Basler provisto con el DCIM. El puerto es usado para solucionar problemas y reprogramar el DECS.

- **Micro procesador:** controla todas las funciones del DECS por medio de la incorporación del uso de programación. Tiene una EEPROM que le provee una memoria no volátil que almacena los parámetros programados si el DECS se queda sin alimentación. Éste autoriza al cliente a programar los ajustes antes y después de la instalación de la unidad.
  
- **Alarma:** este circuito es un triac de salida controlado por el microprocesador y el *hardware* interno de sobre excitación. Es un circuito de protección que vigila que la tensión y la corriente se mantengan por debajo de 30 Vdc y 150 mA. El triac, si está disponible, actuará si descubre condiciones de problema, y permanecerá así hasta después de retirar la alimentación de poder a la unidad DECS. Al encender de nuevo el DECS, el triac se mantendrá activado mientras que la fuente de dc externa no sea des-energizada.
  
- **Circuito de control manual de la excitación:** permite al operador ajustar que manualmente la cantidad de corriente de dc de salida del control de excitación DECS. Una vez ajustada, el DECS regulará esa corriente. Este circuito es usado también en caso de que se pierda la medición de tensión por falla del circuito. El DECS regulará la corriente de excitación ajustada si la tensión es menor al 25% de la terminal de voltaje del generador. La intención de este circuito no es la de ser tomado como un sistema de respaldo para el modo de operación automático, será usado para guiar el sistema del generador.

### 3.2. Interconexión con otros equipos

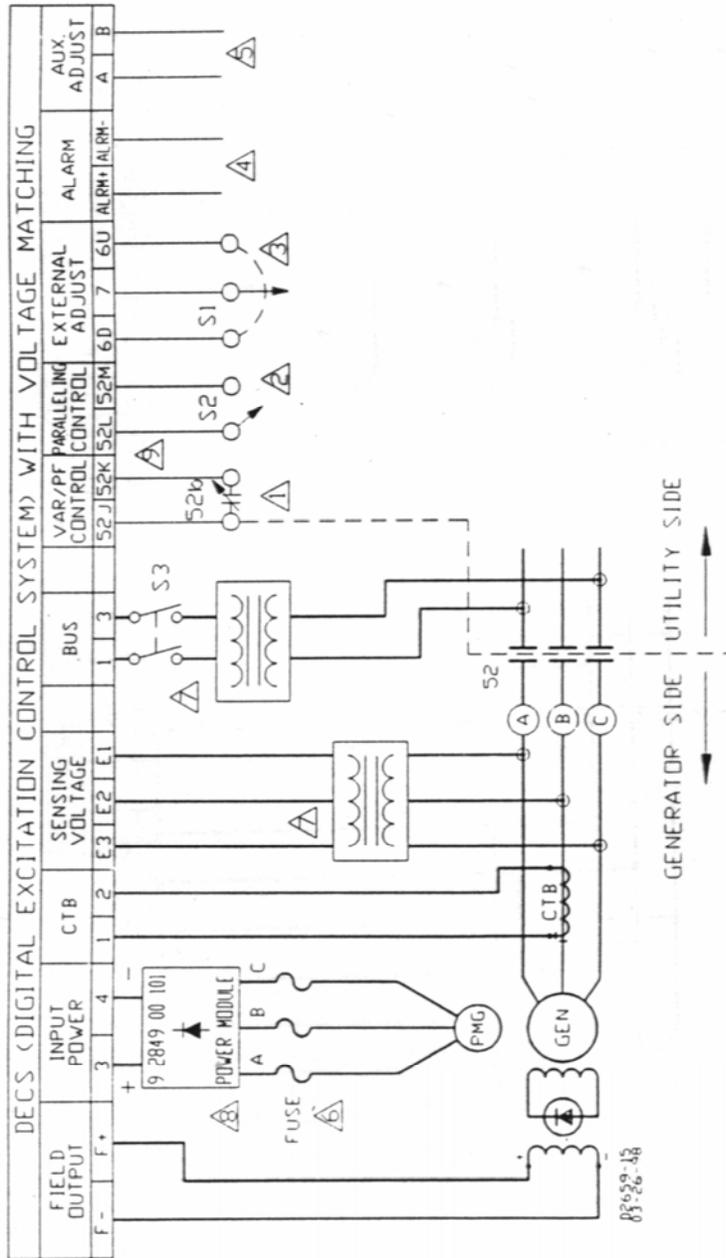
El DECS se debe conectar como es mostrado en la figura 15 y de acuerdo con las siguientes precauciones:

- La cubierta metálica del DECS debe ser conectada bien para lograr una adecuada operación del sistema de tierra y para prevenir la posibilidad de choque eléctrico.
- No se debe hacer mediciones con megger o hipot al generador con el DECS conectado. No se debe medir el DECS con megger o hipot. Si se hacen estas pruebas se causaran daños a los componentes electrónicos internos del DECS.
- Cuando la salida de voltaje en el generador es mayor a los valores requeridos por el módulo de poder del DECS, mostrados en la tabla I, un transformador de potencial (PT) debe ser usado para proveer una entrada de voltaje adecuado al módulo de poder del DECS. Refiérase a la tabla II para seleccionar el PT.

**Tabla I. Especificaciones eléctricas del DECS - requerimientos del poder de alimentación**

<b>DECS Modelo No.</b>	<b>Entrada nominal</b>	<b>Voltaje de entrada al módulo (50 – 400 Hz)</b>	<b>Burden</b>
<b>DECS 125-15-XXXX</b>	<b>240 V<sub>RMS</sub></b>	<b>56 - 70 V<sub>RMS</sub> ±10%, 1 o 3 fases</b>	<b>3070 VA</b>

Figura 15. Diagrama de conexión (aplicación del PMG, rotación A-B-C) con medición en las tres fases



Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 3-8.

**Tabla II. Especificaciones del transformador de potencial (PT)**

<b>Voltaje primario</b>	<b>DECS 125 - 15 - XXXX</b>
<b>240</b>	<b>BE 12819-001</b>
<b>480</b>	<b>BE 21819-001</b>
<b>600</b>	<b>BE 22209-001</b>
<b>2400</b>	<b>BE 12818-001</b>
<b>4160</b>	<b>BE 12818-001</b>
<b>7200</b>	<b>BE 22136-001</b>
<b>13800</b>	<b>BE 21327-001</b>

Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 1-4.

Cuando un transformador de potencial es utilizado para medición, un circuito abierto en el lado primario del transformador causará máximo forzamiento del regulador.

En el diagrama de conexiones del DECS de la figura 15, aparece el diagrama de conexiones del DECS. En sus terminales de conexión recibe y proporciona las señales de control del sistema de excitación y del generador, por medio de instrumentos y dispositivos. A continuación se detallan estas señales y sus características:

- **Ajuste remoto (*remote adjust*):** si el ajuste remoto es requerido, se debe conectar un interruptor de 240 Vac mono polar, de doble polo o de centro apagado; de 1 A es el más recomendado. Para conectar este interruptor al polo central, o terminal común, debe ser conectado a la terminal 7 del DECS. Los otros 2 polos son conectados a las terminales 6U y 6D.

Cuando en las terminales 6U y 7 se hace corto circuito, causa que el DECS incremente los parámetros de ajuste del modo de operación; por ejemplo del voltaje, VAR o factor de potencia. De igual manera, si se hace corto circuito en 6D y 7 causa que los parámetros de ajuste en el modo de operación bajen.

Se utiliza un relé de 240 Vac entre las terminales 6U-7 y entre las terminales 6D 7, el relé al momento de ser energizado cierra sus contactos normalmente abiertos y realiza el cambio en el voltaje, VAR y factor de potencia del generador. El cierre de este relé puede hacerse de manera manual y además puede ser accionado por orden de la computadora del sistema SCADA, cambiando los ajustes de operación del generador. El relé, para incrementar la corriente del campo, es representado como P90R1 y el relé para reducir la corriente del campo del generador, es representado como P90L1.

- **Medición de voltaje (*Sensing voltage*):** el DECS viene equipado con un medidor de voltaje trifásico. La programación de la medición de voltaje en el DECS debe ser de acuerdo al tipo de interconexión en los instrumentos de medición. Desde el panel frontal, la rotación adecuada de fases debe ser seleccionada para una medición trifásica, A-B-C o A-C-B.

Para la rotación de fases A-C-B y una medición trifásica de los voltajes del estator, es necesario conectar las líneas de medición de voltaje del generador como se indica en la tabla III.

**Tabla III. Conexión al DECS de las líneas de medición del voltaje del estator**

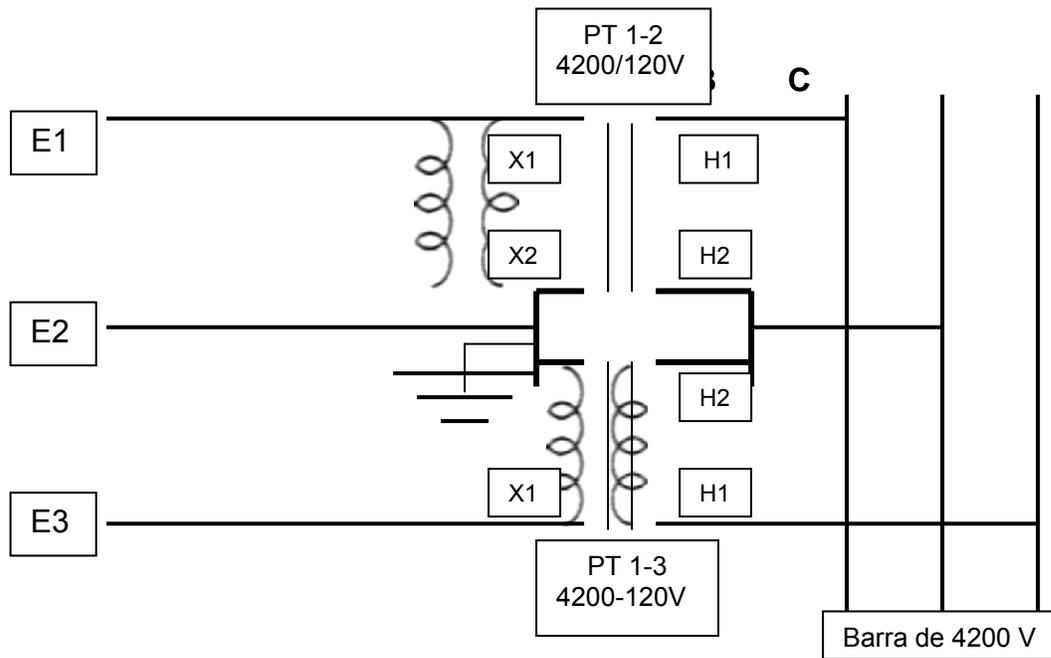
<b>Fase del generador</b>	<b>Terminal en el DECS</b>
A	E1
B	E3
C	E2

**Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 3-6.**

Para el sistema de rotación A-C-B, el transformador de corriente (CT) debe estar en la fase C del generador y el X1 a la terminal CTB1 del DECS.

Cuando el voltaje de salida del estator del generador síncrono es mayor a 600 Vac, se debe utilizar PT para que el rango de medición del DECS no sea excedido. En la figura 16, se muestra el diagrama de la medición de voltaje de las tres fases del generador; en este diagrama se conectan los PT a las barras del estator del generador para reducir el voltaje de 4200 voltios en el lado primario a 120 voltios en el lado secundario.

**Figura 16. Medición trifásica de los voltajes del estator del generador y su conexión con el DECS**



- **Salida de energía (*Power output*):** las terminales de salida de energía del DECS están etiquetadas con F+ y F-. Estas terminales se conectan a las terminales del campo excitador. Las terminales de salida del DECS F+ y F-, nunca deben ser desconectadas cuando el generador está operando; esto podría causar daños permanentes a la unidad DECS.
- **Entrada de energía (*Power input*):** la entrada de energía al DECS, es por las terminales marcadas con 3 y 4. El módulo de alimentación de energía Basler P/N: 9 2849 00 101, es incluido entre el PMG y la entrada de energía al DECS.
- **Entrada puesta en paralelo (*Paraleling input*):** en el DECS las terminales de entrada paralela vienen etiquetadas con CTB1 y CTB2.

Si la entrada paralela es utilizada, se debe conectar a estas terminales un transformador de corriente (CT) de 1 A o 5 A, 1 VA, 5P5. El CT usado en la entrada puesta en paralelo, siempre puede ser utilizado para medir la corriente de salida del generador.

Si se desea un interruptor o relé en la entrada paralela del DECS, debe ser conectado a las terminales del DECS identificadas como 52M y 52L. La entrada paralela es activada cuando las terminales del DECS 52M y 52L están abiertas. La entrada paralela es deshabilitada cuando las terminales están en corto circuito. Entre las terminales 52J y 52K del DECS se conecta un relé para tener otra entrada paralela al DECS, ésta es utilizada para el control de la característica VAR/PF de salida del generador. Refiérase a la tabla IV, donde se muestran las características de control que se obtienen del DECS para la operación del generador, al abrir o cerrar los contactos de los relé conectados entre las terminales 52 J-K y las terminales 52 L-M.

**Tabla IV. Características de operación obtenidas del DECS a partir del control de sus terminales 52 J-K y 52 L-M**

<b>Modo de operación</b>	<b>52 J-K</b>	<b>52 L-M</b>
Modo droop activo	Cerrado	Abierto
Modo de voltaje activo, No droop, No VAR/PF	Cerrado	Cerrado
VAR/PF Activo	Abierto	Abierto

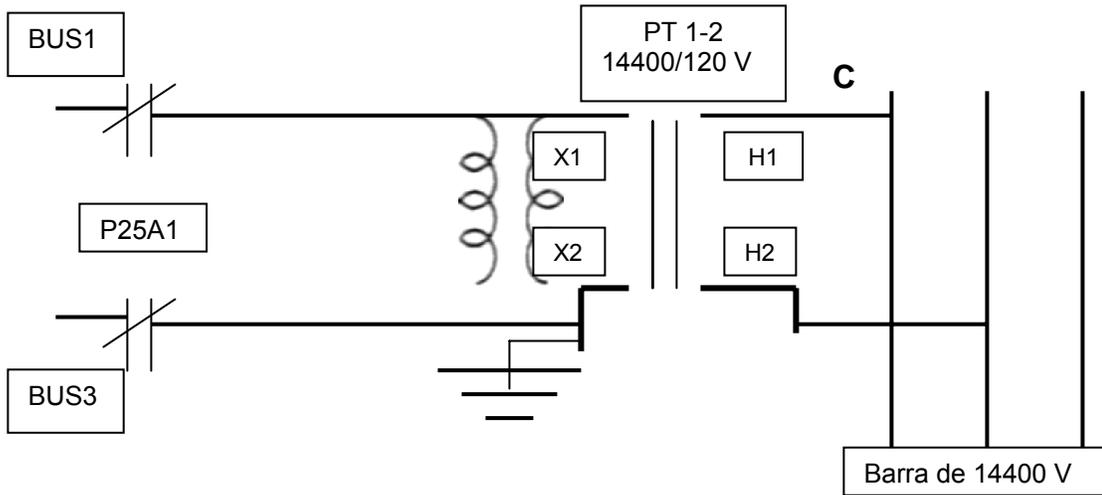
**Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 3-7.**

El relé utilizado para el control del VAR/PF en los diagramas unifilares de las conexiones del DECS, es identificado como P52JK y el relé utilizado para el control paralelo es identificado como P52LM.

- **Entrada para emparejamiento de voltaje (*Voltage matching input*):** El DECS es equipado con un BUS, usado para la entrada de voltaje, el BUS tiene 2 entradas marcadas como BUS1 y BUS3; en la figura 15 aparecen estas terminales. Al BUS 1 y BUS 2 se puede conectar directamente el voltaje de entrada para emparejamiento cuando éste no excede de 660 Vac, arriba de 660 Vac se debe utilizar un PT.

Para que un generador síncrono sea conectado al Sistema Nacional Interconectado (SNI); antes de cerrar sus disyuntores, la amplitud de voltaje del estator del generador debe ser igual a la amplitud de voltaje del SNI. Entonces, el voltaje de emparejamiento de entrada a las terminales BUS 1 y BUS 2 en el DECS, es el voltaje de la barra conectada al SNI; así el DECS regulará la corriente de campo del rotor del generador, para que al cerrar el disyuntor del generador, este y la barra conectada al SNI tengan la misma amplitud de voltaje. En la figura 17, se muestra el diagrama de conexiones para obtener esta función de control del DECS.

**Figura 17. Diagrama de conexiones en el DECS para obtener la función de emparejamiento de voltaje**



En las terminales de entrada al BUS se puede observar el interruptor identificado como S3 (ver figura 15), cuando éste se cierra, provee al DECS la entrada de voltaje para el emparejamiento. El interruptor S3 debe ser abierto para incapacitar el emparejamiento de voltaje después que el generador ha sido sincronizado. Para S3 es utilizado un contactor identificado como P25A, y es ubicado dentro del panel de control del generador síncrono.

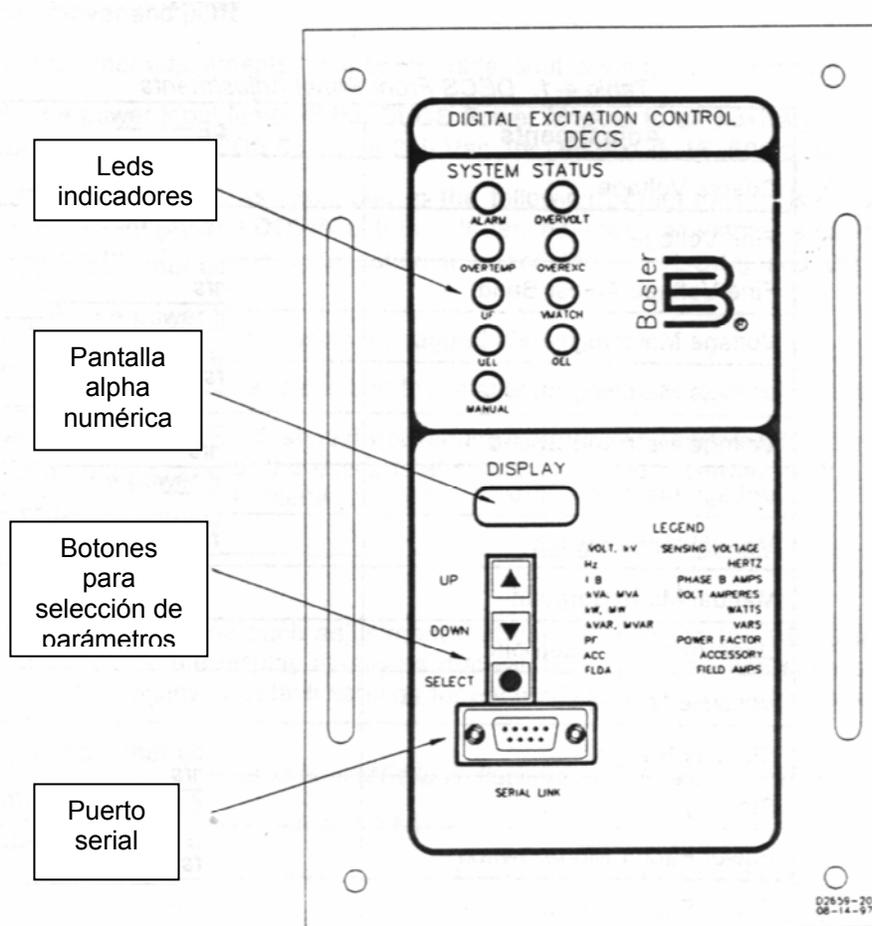


## 4. FUNCIONES DE OPERACIÓN

### 4.1. Información general

En la figura 18 aparece el panel frontal del DECS, donde se muestran sus controles e indicadores.

**Figura 18. Controles e indicadores del panel frontal**



Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 4-1.

## 4.2. Funciones de ajuste del DECS

Los ajustes se realizan a través de los botones localizados en el panel frontal del DECS, o por medio del puerto serial de comunicación utilizando el módulo de interfase de comunicación (DCIM).

Los tres botones que se localizan en el panel frontal, utilizados para hacer los ajustes son:

- **Select:** permite seleccionar la función que se desea ajustar en el DECS al presionar sucesivamente el botón. La función será mostrada en la pantalla del panel frontal.
- **UP:** este botón permite incrementar el nivel del ajuste de la función seleccionada.
- **DOWN:** este botón permite reducir el nivel del ajuste de la función seleccionada.

Al presionar el botón **select** continuamente se mostrará en la pantalla el ajuste que se desea localizar. Al momento de localizar el ajuste deseado, los botones UP / DOWN serán utilizados para incrementar o reducir el valor o nivel para el ajuste. Cuando ya ha sido seleccionado este nivel, se debe presionar una vez mas el botón **select** para guardar el nuevo valor del ajuste.

Mientras se este en el modo **select** y no sea presionado ningún botón por un periodo de 1 minuto, el **DECS** guardará automáticamente en la memoria los nuevos valores de los ajustes. Si se des energiza el DECS antes de que los nuevos valores en los ajustes sean guardados en la memoria, los valores iniciales de los ajustes se mantendrán en la memoria del DECS.

En la tabla V, se muestran los ajustes que pueden ser visualizados en la pantalla del panel frontal del DECS.

**Tabla V. Ajustes en el panel frontal del DECS**

<b>Ajuste</b>	<b>Abreviatura</b>
Voltaje natural	CV
Voltaje fino	FV
Banda de ajuste del voltaje fino	FVAB
Emparejamiento de voltaje	VMAT
Emparejamiento de voltaje	BAND
Velocidad de emparejamiento de voltaje	MSPD
Paso del emparejamiento de voltaje	MSTP
Interruptor de modo manual	MANL
Valor de baja frecuencia	UF
Pendiente voltios/ Hertz	V/HZ
Rango de estabilidad	SR
Ajuste de estabilidad	STAB
Switch de factor de potencia	PF
Valor del factor de potencia	PF
Habilitar VAR	VAR
Valor de VAR	VAR
Ajuste droop	DRP
Limite de baja excitación	UEL
Sobreexcitación habilitada	OES
Tiempo de atraso de sobreexcitación #1	OET1
Limite de corriente de sobreexcitación #2	OEI2
Tiempo de atraso de sobreexcitación #2	OET2
Limite de corriente de sobreexcitación #3	OEI3
Arranque suave	SFST
Configuración de medición	SNSE
Radio del CT	CT R
Radio del PT	PT R

**Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 4-2.**

### 4.3. Ajustes preliminares

Antes de arrancar el generador y el DECS por primera vez, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Identificar y desconectar todos los cables del DECS. Se deben aislar las terminales de los cables para prevenir un cortocircuito.
- Arrancar el motor primario y realizar todos los ajustes al gobernador.
- Después de que todos los ajustes al gobernador han sido realizados, parar el motor primario.
- Conectar sólo las terminales de entrada de energía del módulo de poder DECS, a la fuente de energía auxiliar de 240 Vac de 1 A.
- Por medio de los botones **SELECT, UP Y DOWN** se harán los ajustes iniciales del DECS. También pueden ser hechos a través del puerto serial con el módulo de interfase de comunicación (DCIM) y una computadora.
- Conectar todas las terminales de los cables al DECS, identificar con etiquetas los cables.
- Arrancar el motor primario y el generador y realizar todos los ajustes finales de rangos de velocidad y carga. Los ajustes que se hacen son descritos en la sección 4.4.

- Después de haber arrancado, el DECS ya no necesita ningún otro ajuste estos se harán sólo si el sistema lo requiere.

#### **4.4. Funciones de ajuste**

Las funciones de ajuste son visualizadas en la pantalla del panel frontal del DECS. Para tener acceso a los ajustes del DECS se debe presionar en el panel frontal el botón select hasta que aparezca menu en la pantalla, luego presionar Up hasta que aparezca menu 1, presionando el botón select se puede elegir el ajuste que se desea programar. En la pantalla aparecerá únicamente el acrónimo de la función como aparece en la tabla V. Luego de que el nuevo valor del ajuste es ingresado, se debe presionar select para que sea guardado. A continuación se describe cada uno de los ajustes del DECS.

##### **4.4.1. Ajuste del voltaje natural (CV)**

Para seleccionar el ajuste del voltaje natural, presionar select hasta que el acrónimo CV aparezca en la pantalla. Cada vez que se presiona el botón up o down, se incrementa o disminuye el ajuste del voltaje medido en la salida del generador por 6 Vac. El máximo rango de ajuste del voltaje natural es desde 0 hasta 660 Vac.

##### **4.4.2. Ajuste del voltaje fino (FV)**

Presionar select hasta que el acrónimo FV aparezca en la pantalla. Al presionar Up o down se incrementa o disminuye respectivamente el ajuste del voltaje medido en la salida del generador por 0.5 Vac.

El rango del ajuste del voltaje fino es de  $\pm 60$  Vac. Aunque, el rango total es de 120 Vac medido desde el mínimo hasta el máximo voltaje.

#### **4.4.3. Banda de ajuste del voltaje fino (FVAB)**

A este ajuste se tiene acceso de manera similar en el panel frontal, y es proporcionado para establecer los límites máximos y mínimos de la banda de ajuste de voltaje fino. La intención es limitar el rango de ajuste alrededor del valor seleccionado. El rango de ajuste es desde 6 a 60 en valores enteros.

Un valor de ajuste de 12 significa que la banda tiene un rango de  $\pm 12$  voltios alrededor del valor del voltaje del generador.

**Por ejemplo:** Voltaje del generador: 120 Vac

FVAB:	12
Max. Voltaje:	132 Vac
Min. Voltaje:	108 Vac

#### **4.4.4. Interruptor de modo manual**

Este ajuste puede estar activado o desactivado. Cuando está activo el modo manual, el operador debe ajustar la excitación para cualquier variación de carga en el generador. Para tener acceso a este ajuste, se debe presionar select hasta que aparezca manl en el panel frontal, la pantalla indicará si el modo manual se encuentra activado o desactivado (ON / OFF); hay que presionar Up o down hasta que el ajuste se encuentre en la condición deseada.

El nivel de excitación del modo manual debe ser previamente evaluado; si el nivel de la corriente de excitación es inapropiado para la cantidad de carga del generador se le puede causar un daño severo.

#### **4.4.5. Punto de ajuste del modo manual (MANL)**

Para seleccionar la cantidad de corriente en el modo manual, presionar el botón select hasta que aparezca manl en la pantalla. Por medio de los botones Up o down se obtiene el nivel apropiado de excitación. El rango para este ajuste es desde 0 a 25 amperios de dc. Hay que tomar en cuenta que la corriente no debe exceder los 15 amperios en periodos continuos y 20 amperios por más de 20 segundos. Puede ocasionarse daño en el DECS o en el generador si el nivel de excitación es excedido por un periodo mayor.

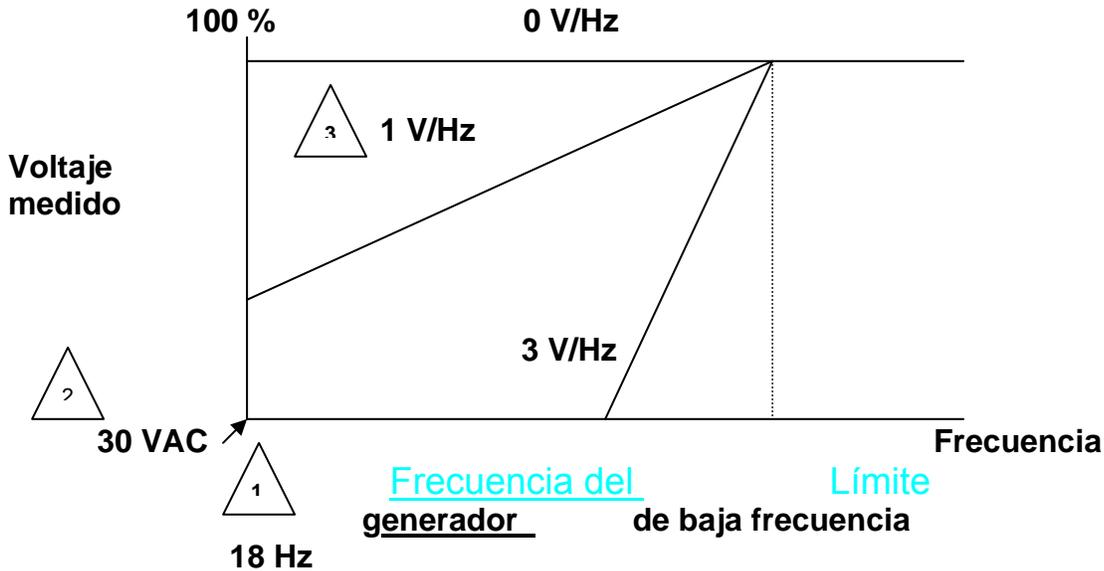
#### **4.4.6. Baja frecuencia (UF)**

El ajuste de baja frecuencia determina la frecuencia a la que el DECS empieza a operar en la constante Voltios / Hertz. El rango de este ajuste es de 40 a 65 Hertz. Aumentado el ajuste, se incrementara la frecuencia de transición en pasos de 0.1 Hz. Al disminuir el ajuste se reducirá la frecuencia de transición en pasos de 0.1 Hz. Para seleccionar el ajuste de baja frecuencia, presionar el botón select hasta que el acrónimo UF aparezca en la pantalla. La pantalla indicará la frecuencia de transición en Hz. Si se desea otro nivel de transición, se debe presionar en el panel frontal Up o down hasta que el nivel deseado sea obtenido.

#### **4.4.7. Pendiente voltios por hertz (V / Hz)**

Este ajuste permite cambiar la pendiente de la línea de los voltios por hertz en el DECS. El rango del ajuste V/Hz es desde 0.0 a 3.0 V/Hz por unidad, en pasos de 0.1 V/Hz por unidad. En la figura 19, aparecen las gráficas de las características V/Hz según del rango de ajuste seleccionado en el DECS.

Figura 19. Característica V/Hz



Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 1-5.

-  La operación del DECS no es especificada para voltajes del generador con frecuencia menor a 18 Hz. La energía debe ser quitada al DECS a frecuencias menores a ésta.
-  La operación del DECS no es especificada para voltajes menores a 30 VAC.
-  La operación arriba de la curva de 1V/Hz por períodos extendidos puede sobre calentar el generador.

#### 4.4.8. Selección del rango de estabilidad (SR)

El primer paso para adquirir una salida estable del generador consiste en seleccionar el rango apropiado de estabilidad o estabilidad de la red (*Stability Network*).



#### **4.4.9. Ajuste del nivel de estabilidad (STAB)**

Presionar el botón SELECT hasta que el acrónimo STAB aparezca en la pantalla, y luego para ajustar el nivel de estabilidad presionar el botón UP o down para incrementar o reducir respectivamente la ganancia del DECS, con lo cual se aumentará o reducirá el tiempo de respuesta del sistema. Este ajuste da la ganancia fina de la unidad DECS permite ajustar la estabilidad para las necesidades específicas que se deseen. Un valor más alto de STAB da una función más estable con una respuesta más lenta que con un valor bajo de STAB. STAB tiene un rango de variación de 0 (menos estable - respuesta rápida) a 250 (más Estable – respuesta lenta).

La inestabilidad es mejor observada al medir el voltaje de salida del generador. No se debe tratar de monitorear el voltaje de DC del campo del generador. Aún cuando el voltaje de salida del generador es estable, un voltímetro de DC mostrará pequeñas variaciones en el voltaje del campo.

#### **4.4.10. Ajuste del factor de potencia y del VAR (VAR o FP)**

El rango de ajuste del factor de potencia es de  $-0.6$  a  $+0.5$  en pasos de  $0.01$ . Un factor de potencia de  $-0.8$ , indica que el generador está ajustado para operar con un factor de potencia de  $0.8$  en adelanto (baja - excitación). Un factor de potencia de  $+0.8$ , indica que el generador está ajustado para operar con un factor de potencia de  $0.8$  en atraso (alta excitación).

El ajuste de VAR afecta los volts amperio reactivo de potencia de operación, el rango de este ajuste varía desde  $-100$  a  $0$ , es ajustable en valores enteros.

Si el DECS recibe 1 amperio de señal del CT desde la fase B, y el ajuste de VAR está a +100, entonces el DECS regulará la corriente de campo del generador para entregar el 100% de potencia reactiva (Vars). Si el ajuste está a -100, entonces indicará que el DECS regulará la corriente de campo del generador para consumir potencia reactiva.

Al aumentar el nivel de Vars o de FP se incrementará la corriente del campo de excitación. Al disminuir el nivel de Vars o de FP se reducirá la corriente del campo de excitación.

La característica de Var/FP tiene dos estados: Inactivo. La característica está disponible, pero es desactivada colocando en cortocircuito los contactos de las terminales 52J y 52K. Activo. La característica está disponible y activa cuando las terminales 52J y 52K no son colocadas en cortocircuito. Refiérase a la tabla IV, en donde se dan los detalles de conexión de las terminales 52J y 52K.

Para seleccionar los ajustes Var o FP, presionar en el panel frontal el botón select hasta que aparezca el acrónimo deseado. La pantalla indicará si la función está activada o desactivada (ON o OFF) y el nivel al que está programado el ajuste. Si se desea cambiar el nivel, presionar los botones UP o down hasta que el nivel deseado sea alcanzado.

#### **4.4.11. Ajuste de la caída de voltaje (DRP)**

Este ajuste es usado cuando está en paralelo el generador con el sistema. El rango de este ajuste varía desde 0% a 20% de caída de voltaje y se cambia en pasos de 0.5%. Al aumentar el nivel de DRP se incrementa la cantidad de caída del voltaje del generador con la aplicación de una carga

reactiva; con una señal de 1 o 5 amperios y de 1 o 5 VA del CT de corriente 5P5, conectado entre las terminales CTB1 y CTB2 del DECS, dará aproximadamente una caída de voltaje del 20%, con la aplicación de una carga de factor de potencia igual a 0 y el nivel de ajuste DRP seleccionado al máximo.

El ajuste de caída de voltaje tiene dos estados: Inactivo: el ajuste está disponible, pero está inactivo cuando se colocan en corto circuito las terminales 52L y 52M. Activo: el ajuste está disponible y activo cuando las terminales 52L y 52M no son colocadas en cortocircuito. Refiérase a la tabla IV para las conexiones consideradas entre las terminales 52L y 52M.

Para elegir el nivel del ajuste de caída de voltaje se debe presionar el botón select hasta que DRP aparezca en la pantalla del panel frontal. Si otro nivel de ajuste de caída de tensión es deseado, presionar en el panel frontal los botones UP o down hasta que el nivel de ajuste sea adquirido.

El mejor método para ajustar el nivel de caída de voltaje es: primero operar cada generador individualmente sin ser colocado en paralelo con otro generador y aplicar corrientes hasta alcanzar un FP de +0.8. La cantidad de caída de voltaje (*Droop*) de cada generador puede ser ajustado basado en las instrucciones anteriormente mencionadas. Otro método alternativo es el siguiente:

- Toda la fuerza motriz debe estar parada antes de proceder.

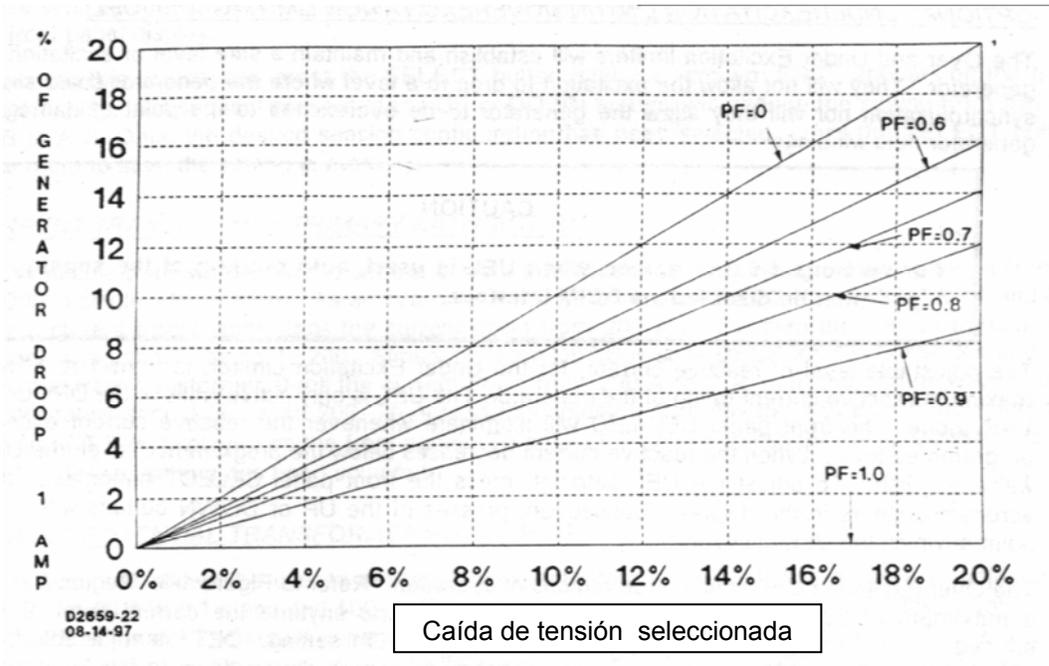
Con el CT instalado en la fase B del generador, conectar temporalmente la medición de voltaje E1 del DECS a la medición de voltaje de la fase B del generador. Conectar al DECS en las terminales E2 y E3 la señal de voltaje de la fase A del generador.

- Operar cada generador de manera individual (no en paralelo) y aplicar carga cercana a un FP de 1.0. El nivel de ajuste de la caída de voltaje será ajustada según la necesidad de la aplicación.
- Si, cuando haya sido ajustado el nivel de caída de voltaje del generador, la salida de voltaje del generador no disminuye con la aplicación de carga, revise la polaridad del CT y las conexiones de la medición de los voltajes del generador.
- Después de completar el ajuste de caída de voltaje (Droop), conectar de nuevo las líneas de los sensores de medición a la configuración apropiada, determinada en la figura 15.

Cuando los generadores son operados en paralelo, ellos compartirán la cantidad de carga igualmente. Si no hay carga reactiva presente, el voltaje del generador no debe decaer. Si decae, se deben revisar las conexiones de los medidores, las conexiones del CT, y la polaridad del CT. Si es necesario, repetir el proceso de ajuste.

En la figura 20 se muestran los valores de caída de voltaje que se tendrán en las terminales de salida del generador, que dependerán del nivel de ajuste de caída de tensión programado en la unidad DECS y del factor de potencia que tenga la carga que se conecte a las terminales del generador.

**Figura 20. Porcentaje de ajuste de la caída de tensión del generador Vrs. ajuste de caída de tensión programado en la Unidad DECS.**



Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 4-9.

#### 4.4.12. Límite de sub excitación / Límite de sobre excitación (UEL/OEL)

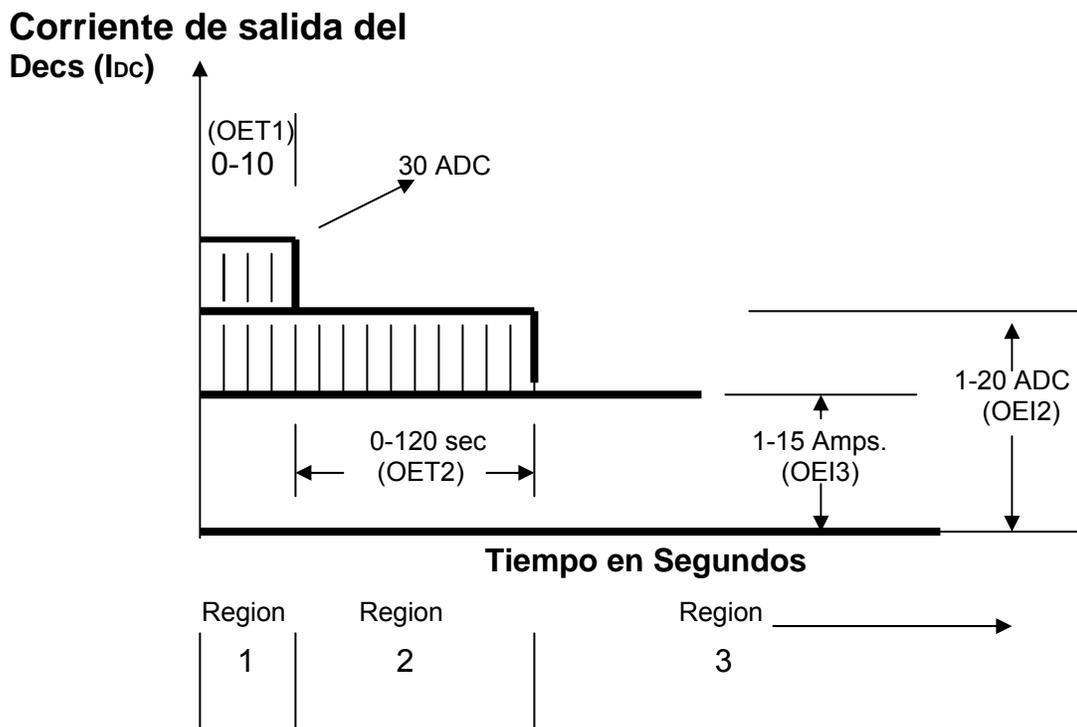
Los límites de sub excitación y sobre excitación establecerán y mantendrán un nivel seguro de corriente de excitación para el generador. El límite de sub excitación no permitirá que la excitación baje a un nivel donde el generador pierda su voltaje de sincronización y el límite de sobre excitación no permitirá que el generador se sobre excite al punto de dañar el campo del generador.

El nivel de ajuste de corriente reactiva para el límite de baja excitación, es de 1 a 80% del máximo rango de corriente reactiva del generador.

En el panel frontal el led UEL se enciende cuando la corriente reactiva excede el nivel programado. Cuando la corriente reactiva disminuye debajo del nivel programado, el led UEL se apaga. Para ajustar el límite de sub excitación se debe oprimir el botón select hasta que el acrónimo UEL aparezca, al oprimir el botón UP o down se ajustará el punto en el que se active el límite de sub excitación (UEL).

El límite de sobre excitación tiene tres regiones de operación, que se muestran en la figura 21.

**Figura 21. Límites de sobre excitación**



Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 1-5.

La región 1 está diseñada para un máximo de corriente de 30 Adc.

El tiempo en el que la máquina puede ser excitada con esta corriente es de 10 segundos y empieza cada vez que el nivel de corriente OEI3 es excedido. El tiempo es ajustable en la región 1 por el ajuste OET1. OET1 es ajustado de 0 a 10 segundos. Cuando la corriente de excitación disminuye, saliendo de la región 1, la corriente de excitación de DC es controlada por el nivel de ajuste en OEI2 de la región 2.

El tiempo de atraso de la región 2 es ajustado en OET2. Este ajuste es de 0-120 segundos, comienza cuando sale de la región OET1. El nivel de corriente de la región 2 es ajustado por OEI2, OEI2 puede ser ajustado desde 0-20 Adc. Si el nivel de corriente de dc excede el ajuste OEI2 se mantiene allí hasta que OET2 termina, entonces la corriente de dc será controlada al nivel como fue ajustada en OEI3.

La corriente de excitación de dc permanecerá en el nivel OEI3 hasta que la falla sea solucionada por medios externos. OEI3 es ajustable de 1-15 Adc. El límite de corriente de sobre excitación se activará cuando OEI3 sea excedido, y será indicado en el panel frontal iluminando el led OEL. El estado de OEL finalizará cuando la corriente de campo baje 1 A debajo del punto de ajuste de limitación de la corriente de campo. Para seleccionar los puntos de ajuste OEI/OET, presionar el botón select hasta que el acrónimo apropiado aparezca en la pantalla del panel frontal, luego presionar el botón UP o down para ingresar el nivel de ajuste deseado.

#### **4.4.13. Sobre excitación habilitada (OES)**

Esta característica es integrada con la característica OEL y permite habilitar o des habilitar el OEL. La función OEL habilitada, es indicada con un 1 y la función OEL des habilitada es indicada con un 0.

Para cambiar el estado de OES, presionar el botón select hasta que el acrónimo OES aparezca en la pantalla, luego presionar UP o down para habilitar (1) o des habilitar (0) la función.

#### **4.4.14. Arranque suave (SFST)**

El DECS permite determinar qué tan rápido la unidad DECS subirá el voltaje del generador hacia el valor de voltaje seleccionado en éste. El rango de este ajuste es desde 0-99. Un “0” indicará que el voltaje del generador será elevado al ritmo más lento, “99” indicará que el voltaje del generador será elevado al ritmo más rápido. Para ajustar el arranque suave, presione el botón select hasta que el acrónimo SFST aparezca en la pantalla, luego presionar los botones Up o down para ajustar el nivel de arranque suave deseado.

#### **4.4.15. Configuración de la medición del DECS (SNSE)**

Este ajuste permite configurar al DECS para una medición monofásica o trifásica de los voltajes del generador. El DECS viene programado para una medición trifásica con una rotación A-B-C, aunque también puede ser seleccionada una rotación de voltajes A-C-B. Cuando se selecciona una medición monofásica, las entradas E2 y E3 deben ser conectadas a la fase C de la salida del generador. Cuando una medición monofásica es programada en el DECS, aparecerá en la pantalla del panel frontal “A-C”.

Para tener acceso a este ajuste es necesario presionar el botón select hasta que el acrónimo SNSE aparezca en la pantalla del panel frontal. Luego, se deben oprimir los botones up o down para seleccionar la rotación de voltajes en “A-B-C”, “A-C-B” o “A-C”. Cuando ya se programó el diseño de medición hay que oprimir el botón SELECT para guardarlo en la memoria del DECS.

#### **4.4.16. Rango de medición del transformador primario de corriente (CT R)**

Este ajuste permite seleccionar el rango del transformador primario de corriente. Para el modelo DECS 125-15-XXX5-VXX, si el transformador de corriente reduce la corriente de 200 A a 5 A, entonces el rango primario de la corriente del CT debe ser ajustado a 200. Para acceder a este ajuste se debe oprimir el botón select hasta que aparezca CT R en la pantalla del panel frontal. Para escoger el ajuste se deben oprimir los botones up o down hasta que el nivel de ajuste sea el adecuado.

#### **4.4.17. Radio del transformador de medición de voltaje (PT R)**

Permite seleccionar el radio del PT. Tiene un rango de ajuste desde 0.1 a 99.9 en pasos de 0.1 y un rango de ajuste de 100 a 200 en pasos de 1.0. Este ajuste es utilizado para que el voltaje mostrado en la pantalla del DECS corresponda al voltaje actual de salida del generador. Por ejemplo, si el sistema tiene un PT que reduce el nivel de voltaje de 4200 Vac a 120 Vac, entonces el radio del PT de medición (PT R) debe ser ajustado a 35.0. Para acceder a este ajuste hay que presionar el botón select hasta que el acrónimo PT R aparezca en la pantalla del panel frontal. Para elegir el nivel del ajuste oprima los botones up o down hasta que el nivel adecuado sea encontrado.

#### **4.4.18. Emparejamiento de voltaje (VMAT)**

Esta función es usada para controlar previamente la salida del generador y para implementar los procedimientos de sincronización de éste. La función VMAT compara el voltaje del generador con el voltaje del bus, ajustando la salida del generador.

Una vez que los voltajes estén dentro de un 1% entre sí, se iluminará el led VMATCH; indicando que el proceso de sincronización del generador ha iniciado. Esta función puede ser habilitada o deshabilitada en el DECS; para habilitarla se debe oprimir el botón select hasta que aparezca VMAT en la pantalla del DECS, luego se debe presionar up o down para habilitarla (ON) o des habilitarla (OFF).

#### **4.4.19. Banda de emparejamiento de voltaje (BAND)**

Esta función es utilizada para seleccionar una banda sobre el punto de ajuste del voltaje del generador por la cual el emparejamiento operará. El ancho de la banda es ajustable a un rango desde 1% a 20 % en pasos de un 1%. Por ejemplo, si el voltaje del generador seleccionado es 120 Vac y el usuario programa un valor de banda de 10, entonces los límites de la banda son seleccionados a 10 % sobre y 10% debajo de 120 Vac. Entonces el límite superior estaría a 132 Vac, y el límite inferior a 108 Vac con un punto de ajuste nominal a 120 Vac. Si el voltaje de entrada al DECS en el BUS1 y BUS3 está afuera de esta banda, la característica de emparejamiento de voltaje no operará. Para tener acceso a esta función, se debe oprimir el botón select hasta que aparezca band en la pantalla frontal del panel, luego oprimir el botón up o down para ajustar el límite de la banda.

#### **4.4.20. Velocidad de emparejamiento del voltaje (MSPD)**

Esta característica ajustable es usada para seleccionar la velocidad de la función VMAT y varía en un rango de 1 a 20, en pasos enteros. Un ajuste de 1 provee la velocidad más lenta mientras que un ajuste de 20 provee la velocidad más rápida. Para tener acceso a este ajuste oprima el botón select hasta que aparezca el acrónimo MSPD en la pantalla del panel frontal.

Luego se presionan los botones up o down para seleccionar el valor de MSPD deseado.

#### **4.4.21. Paso del emparejamiento de voltaje (MSTP)**

Esta característica es usada para seleccionar el tamaño de los pasos para la corrección en el modo de emparejamiento de voltaje. El rango de este ajuste varía entre 1 y 8 en pasos enteros. Un ajuste de 1 provee una corrección del voltaje en pasos de 0.5 voltios. Similarmente, un ajuste de 8 proveerá una corrección del voltaje en pasos de 4.0 V. Para tener acceso a este ajuste, hay que presionar el botón SELECT hasta que el acrónimo MSTP aparezca en la pantalla del panel frontal. Luego se deben presionar los botones up o down para seleccionar el valor de MSTP deseado.

#### **4.5. Operación del panel frontal**

Las cuatro partes que componen el panel frontal son:

- 9 LEDS de diagnóstico que indican continuamente el estado de operación del DECS.
- Una pantalla alfanumérica de 4 caracteres que es usada para mostrar los ajustes y las condiciones de operación del generador.
- Un teclado de 3 botones que permiten hacer ajustes y mostrar las diferentes funciones del DECS.
- Un puerto serial que permite conectar una computadora al DECS para programar las funciones y además monitorear el estado de operación de la excitación. También provee un medio para conectar el DCIM.

## **4.5.1. Leds de estado y diagnostico**

### **4.5.1.1. Led de alarma**

En el panel frontal el led de alarma, mostrará el estado de la alarma de estado sólido de la salida del triac. Pequeñas cargas (0.15 A) de AC y DC pueden ser conectadas a este triac desde las terminales “ALRM+” y “ALRM-“ en la unidad DECS.

Las funciones protectoras del *software* y *hardware* controlan la operación de la alarma triac. El *hardware* de sobre excitación en la unidad DECS, activará el relé de alarma cuando el voltaje de campo del generador exceda el nivel preseleccionado en el *hardware* durante un período de 15 segundos. El nivel preseleccionado de sobreexcitación en la unidad DECS modelo 125-15, es un voltaje de disparo de 200 voltios.

Si el voltaje de campo retorna a un nivel por debajo del punto preseleccionado en el *hardware* para el disparo, entonces el medidor de tiempo de 15 segundos regresará a 0.

### **4.5.1.2. Led overexc**

El led de sobre excitación se ilumina cuando el voltaje del campo excede el valor preseleccionado. Si la condición de sobreexcitación permanece durante 15 segundos, entonces el relé de alarma se activará y el led de alarma se encenderá.

#### **4.5.1.3. Led overvolt**

El led de sobrevoltaje se encenderá cuando la salida de voltaje del generador exceda el 135%. Si la condición de sobrevoltaje permanece durante 0.75 segundos, se activará la alarma triac y en el panel frontal se encenderá el led de alarma.

#### **4.5.1.4. Led overtemp**

El led de sobre temperatura se encenderá cuando la temperatura de los semiconductores de potencia exceda el límite seleccionado. La unidad DECS activara el relé de alarma y en el panel frontal se encenderá el led de alarma.

#### **4.5.1.5. Led uf**

El led de baja frecuencia muestra el estado de la característica de baja frecuencia de la unidad DECS. Cuando la frecuencia del generador cae debajo del nivel de baja frecuencia seleccionado, el led se encenderá y las características de baja frecuencia se activarán.

#### **4.5.1.6. Led manual**

Este led se iluminará cada vez que el modo de excitación manual sea activado.

#### **4.5.1.7. Led uel**

El led de límite de baja excitación indicará el estado de la corriente reactiva cuando la unidad DECS esté operando en el límite de baja excitación.

La unidad DECS guardará la corriente reactiva del generador en la que se activará, el mínimo nivel de corriente será seleccionado por el usuario. Si la unidad DECS está operando en el límite de corriente, se encenderá el led.

#### **4.5.1.8. Led oel**

El led de límite de alta excitación indicará el estado de la corriente de campo del límite de sobre excitación de la unidad DECS. La unidad DECS guardará la corriente de campo del generador en donde se activará, el nivel máximo de corriente de campo es seleccionado por el usuario. Cuando la unidad DECS esté operando en el límite el led se encenderá. Esta característica operará siempre y cuando la corriente de campo exceda el límite OEI3.

#### **4.5.1.9. Led vmatch**

El led de emparejamiento de voltaje indicará el estado del circuito comparador de voltaje cuando se compare el voltaje medido del generador y el voltaje medido en el bus. Una vez los voltajes comparados estén dentro de un 1% de diferencia entre ambos, este led se encenderá; le indicará al usuario que pueden ser iniciados los procedimientos de sincronización del generador.

#### **4.5.2. Pantalla alfa numérica**

Esta pantalla de cuatro caracteres es usada para dos funciones. Mostrar y ajustar. En el modo despliegue, el usuario puede pasar por una lista de medidas y por los parámetros programados para la operación del generador con sólo oprimir el botón select.

La siguiente entrada en la lista de mediciones es menu, éste permite al usuario pasar entre la lista de despliegue y la lista de ajustes, al presionar los botones up o down. Menu 1 permitirá al usuario acceder a la lista de ajuste. En la tabla VII se muestra la lista de despliegue y en la tabla V se muestra la lista de ajustes.

**Tabla VII. Lista de pantalla frontal**

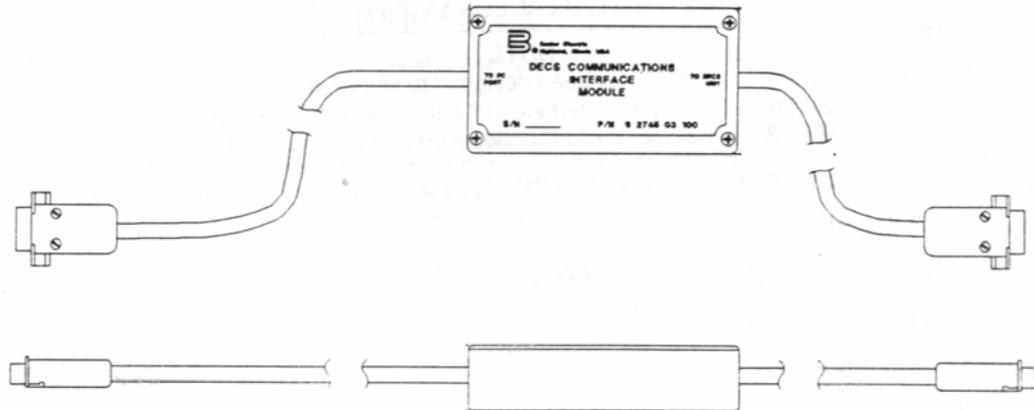
<b>Acrónimo mostrado</b>	<b>Función / valor mostrado</b>
VOLT	Valor RMS de voltaje del sistema trifásico
Hz	Frecuencia del generador en Hz
I B	Corriente de la fase B en amperios
kVA o MVA	Potencia aparente
kW o MW	Potencia real
KVAR o MVAR	Potencia reactiva
PF	Factor de potencia
ACC	Entrada de accesorios en voltios
FLDA	Corriente de campo en amperios
MENU	Permite seleccionar el modo display o lista de ajustes

**Fuente:** Basler Electric, *Instruction manual for digital excitation control systems*, página 4-13.

#### **4.6. Funciones de comunicación**

El DECS trae en el panel frontal un puerto serial a través del cual se conecta el módulo de interfase de comunicación (DCIM), de esta manera se tiene acceso por medio de una computadora al control DECS. El DCIM se muestra en la figura 22. Es usado para la comunicación con el sistema de control de excitación digital (DECS). El DCIM requiere una computadora compatible personal IBM para que corra el *Software* DCOM15 que se comunica con la unidad DECS.

**Figura 22. Módulo de Interfase de comunicación DECS**



**Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 5-1.**

#### **4.6.1. Especificaciones del hardware.**

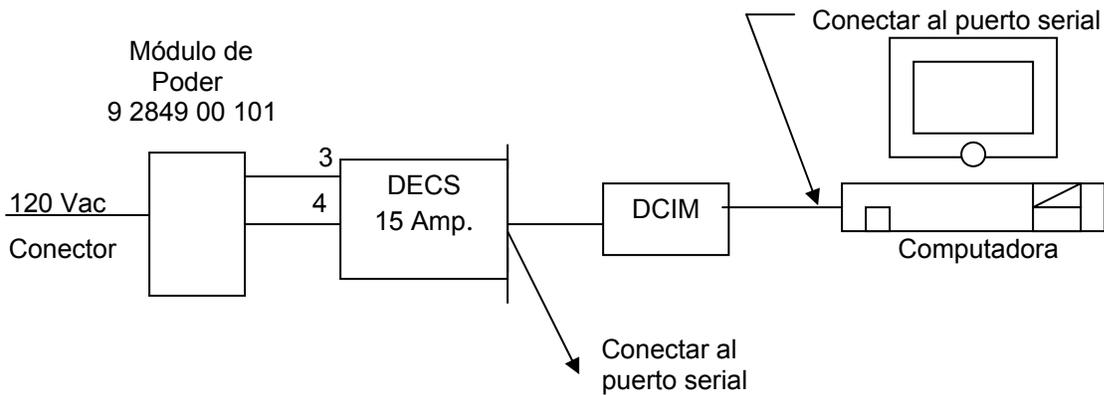
La lista de componentes auxiliares necesarios para comunicarse con el DECS, usando el DCIM , son:

- DCIM (Módulo de Interfase de Comunicación DECS).
- Requerimientos mínimos necesarios para la computadora:
  1. 80386, IBM Compatible con MSDOS, versión 3.0 o mayor
  2. Puerto serial de 9 pines. Si solamente está disponible un puerto de 25 pines, entonces se requiere un adaptador de 9 pines a 25 pines.
  3. *Floppy* para discos de 3.5 “.
  4. Disco de *Software* con los programas DCIM15.EXE (*Software* para interfase DECS), PID2.EXE (*Software* de parámetros de estabilidad de generación), y INSTALL.BAT

#### 4.6.2. Interconexión del DCIM.

El DCIM debe ser conectado a la unidad DECS y también a la computadora personal para que el programa DCOM15 pueda establecer comunicación por medio del puerto serial con el DECS. La unidad DECS debe ser energizada con un voltaje de entrada. El diagrama de interconexión de la interfase serial es mostrado en la figura 23.

**Figura 23. Interconexión entre los módulos DECS y DCIM**



**Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 5-2.**

## 5. OPERACIÓN DE UN DECS BAJO CARGA

La operación de un DECS bajo carga es regida por los parámetros de ajuste programados en la unidad, por el generador y por el sistema eléctrico de potencia. El modelo que se analizará es el 125-15-B2C5 V2.0.7., utilizado en la central hidroeléctrica Poza Verde.

### 5.1. Datos del generador síncrono

➤ Marca	:ALSTHOM
➤ Tipo	:AA 56 BVL8-8P
➤ Polos	:8
➤ Potencia aparente nominal	:4478kVA
➤ Factor de potencia	:0.9
➤ Voltaje nominal	:4160 V
➤ Frecuencia	:60 Hz
➤ Corriente nominal	:621.5 A
➤ Velocidad nominal	:900 RPM
➤ Tipo de aislamiento	:F
➤ Regulador automático de voltaje	:Basler

### 5.2. Parámetros de regulación primaria de voltaje

El sistema digital de control de la excitación marca Basler, está diseñado para obtener la regulación primaria de voltaje del generador síncrono. Los parámetros que vienen programados dentro de la unidad DECS, que intervienen para obtener la regulación primaria de voltaje en un generador síncrono, son programados en función de las características de regulación que se deseen obtener y son analizados a continuación.

### **5.2.1. Rango de estabilidad (SR)**

Este permite ajustar la estabilidad deseada en el generador cuando esta conectado a la red de potencia, el valor de este ajuste es programado en la unidad DECS según el tamaño y de la frecuencia del generador (véase la tabla VI). El rango de estabilidad para los generadores en estudio ha sido programado dentro de la unidad DECS a un valor de 9. Para este rango de estabilidad se tienen las siguientes características. Constante de tiempo del circuito con el generador abierto de 3.0 segundos; constante de tiempo del excitador del generador de 0.50 segundos; frecuencia del generador de 60 Hz.

El intervalo de tiempo del circuito excitador con el generador abierto, determina la constante de tiempo en la que el sistema de excitación debe actuar cuando el generador se encuentra en la etapa de sincronización.

La constante de tiempo del excitador del generador está programada a 0.5 segundos; la base para programar este valor a 0.5 S es que, siguiendo una alteración severa, el ángulo del rotor del generador gira normalmente entre 0.4 y 0.75 segundos. El sistema de excitación debe actuar entre este período de tiempo para mejorar la estabilidad transitoria para regular el voltaje del generador.

La frecuencia de 60 Hz es la frecuencia eléctrica de operación del generador, que depende de la frecuencia eléctrica del sistema de potencia al que éste conectado.

### **5.2.2. Estabilidad (STAB)**

Como se mencionó en el inciso 4.4.9., un valor alto de STAB da una función más estable con una respuesta más lenta, comparado con un valor bajo de STAB. Un valor STAB de 0 da una función menos estable y de respuesta rápida, mientras que un valor de 250 da una función más estable y de respuesta lenta.

El ajuste STAB esta programado dentro de la unidad DECS en estudio, a un valor de 200. Este valor permite mantener más estable la salida de voltaje del generador; además, permitirá obtener una respuesta lenta cuando se produzcan pequeñas variaciones de voltaje, originadas por los cambios de carga en el sistema eléctrico de potencia al que está conectado el generador. Es adecuado este valor de ajuste STAB, ya que permite una mejor estabilidad manteniendo una buena linealidad del voltaje terminal del generador con respecto al tiempo. En el S.N.I. se producen variaciones momentáneas de voltaje, producidas por los cambios de carga, la respuesta lenta del DECS permite que el voltaje de campo del generador no cambie instantáneamente al nuevo valor, necesario para mantener el voltaje constante en las terminales del generador. Esta característica es útil cuando las variaciones de carga en el sistema permanecen por un corto período de tiempo.

### **5.2.3. VAR**

Este ajuste dentro de las unidades DECS en estudio se encuentra deshabilitada, por lo cual el generador no regulará el voltaje en función del ajuste programado en VAR.

#### 5.2.4. FP

Este ajuste se encuentra habilitado dentro de las unidades DECS en estudio. El valor de factor de potencia al que se desea que opere el generador es programado directamente en la unidad DECS y también puede ser programado desde el sistema SCADA, para controlar la operación del generador.

El valor al que es programado el factor de potencia dependerá de las características de regulación de voltaje que requiera el S.N.I.. Cuando se necesite subir el voltaje del sistema se programará un factor de potencia positivo (capacitivo) y el rango entre el que se puede programar varía desde 0.90 a 1.0; el valor al que se programará, dependerá del valor al que se desee subir el voltaje del sistema. Cuando el nivel del voltaje en S.N.I. esté muy por encima del valor nominal, será necesario consumir potencia reactiva para regular el voltaje, para esto será necesario programar un factor de potencia negativo (inductivo) y el rango entre el que se puede programar varía desde - 0.90 a 1.0. El valor al que se programara, dependerá del nivel al que se desea bajar el voltaje.

Los voltajes que son tomados como referencia para regular el factor de potencia son:

- El voltaje del generador, que debe mantenerse igual o un poco arriba de 4160 V.
- El voltaje del S.N.I., que debe mantenerse igual o un poco arriba de 69000 V.

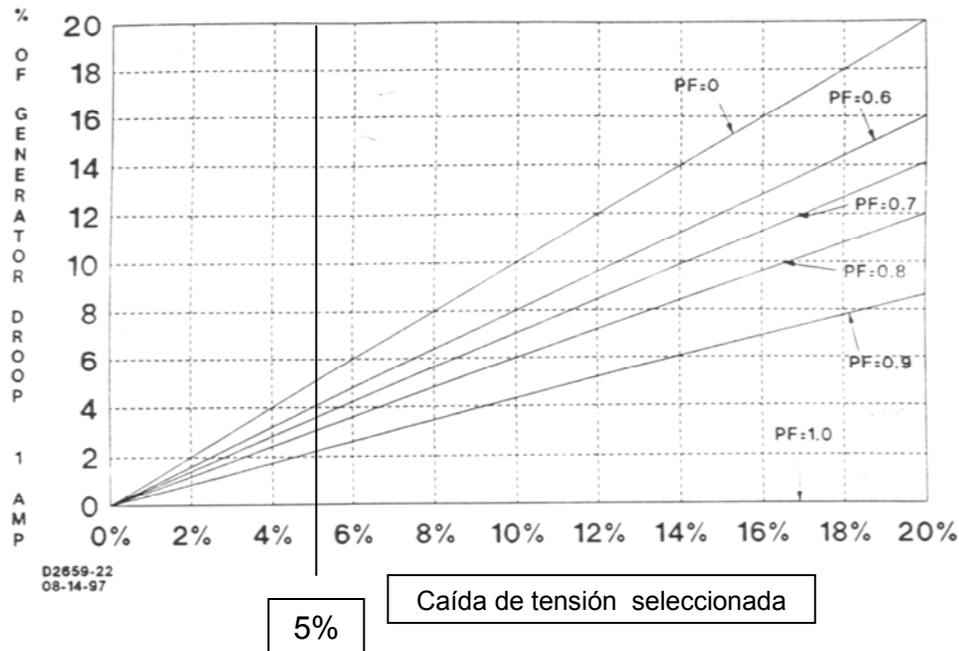
El factor de potencia que es programado en la unidad DECS o en el sistema SCADA para operar el generador, determinará el factor de potencia al que éste será operado en régimen permanente.

### 5.2.5. Caída de voltaje (DRP)

El rango de este ajuste varía entre 0% y 20% de caída de voltaje. Con un valor alto de DRP se incrementa la cantidad de caída de voltaje del generador con la aplicación de una carga reactiva; por el contrario, con un valor bajo de DRP se reduce el nivel de caída de voltaje del generador con la aplicación de una carga reactiva.

El ajuste DRP se encuentra programado en la unidad DECS en estudio a un valor de 5%, en la figura 24 se muestra la línea vertical para este ajuste.

**Figura 24. Caída de voltaje programada a 5%**



Fuente: Basler Electric, Instruction manual for digital excitation control systems, página 4-9.

Este valor de ajuste DRP, limitará que la caída de voltaje en el generador para la aplicación de cargas a diferente factor de potencia, varíe dentro de la línea vertical para el ajuste DRP a 5%. Por ejemplo; si el valor de la señal entre las terminales CTB1 y CTB2 del DECS tiene un valor de 5 amperios, 5 VA y el factor de potencia de la carga aplicada es de 0.9 inductivo, la caída de voltaje en las terminales del generador será de 2.2%. Para el ajuste DRP a 5%, la máxima caída de voltaje que se podrá producir en las terminales del generador será de 5% y se producirá cuando la carga aplicada tenga un factor de potencia igual a 0 (factor de potencia inductivo).

El valor de ajuste DRP a 5% además permitirá que, al momento de aplicar una carga reactiva inductiva al generador, su voltaje baje levemente. Así se regulará el voltaje de una manera adecuada en el S.N.I. sin tener una gran caída de voltaje en el generador al aplicar carga inductiva.

En los siguientes ejemplos se muestra la caída de voltaje en las terminales del generador a diferentes valores del ajuste DRP, al aplicar una carga inductiva con factor de potencia igual a 0.9.

- Ajuste DRP a 5%: para este valor, la aplicación de una carga inductiva con factor de potencia igual a 0.9 produciría una caída de voltaje del 2.2 %. El voltaje nominal del generador es de 4160 V, la caída de voltaje del generador sería de 91.52 voltios y el voltaje en las terminales de este bajaría a 4068 voltios.
- Ajuste DRP a 14%: para este valor la aplicación de una carga inductiva con factor de potencia igual a 0.9 produciría una caída de voltaje del 6% en las terminales del generador.

El voltaje nominal del generador es de 4160 V, la caída de voltaje del generador sería de 249.6 voltios y el voltaje medido en las terminales de éste bajaría a 3910.4 voltios.

Los factores que deben ser tomados en cuenta para seleccionar un adecuado nivel de caída de voltaje (DRP) en el generador son mantener una adecuada característica de regulación de voltaje del generador al estar sincronizado al S.N.I. y evitar daños en el generador por una alta caída de voltaje al momento de aplicar una carga eléctrica en sus terminales.

### **5.3. Limitantes de sobre- excitación y sub- excitación**

#### **5.3.1. Térmicos**

Uno de los factores que determina los límites de potencia de un generador síncrono es el calentamiento de sus embobinados. Los límites reales en estado estable de un generador síncrono dependerán del calentamiento que pueden soportar sus embobinados.

Un generador síncrono tiene dos embobinados: el embobinado de campo y el embobinado del estator. Cada embobinado debe ser protegido de sobrecalentamiento.

El embobinado de campo del generador, es de gran interés en el análisis térmico de un generador; esto se debe a que está construido de cobre y por lo tanto tendrá pérdidas por efecto joule, que se manifiestan en forma de calor. A través de este embobinado circula la corriente de campo del generador y esto producirá calentamiento.

Cuanto más grande sea la corriente de campo, más pérdidas existirán en el embobinado del rotor y éstas, por supuesto, aumentarán la temperatura del generador. Las pérdidas en el embobinado de cobre del rotor se calculan con la siguiente ecuación:

$$P_{\text{cobre-rotor}} = I_{\text{campo}}^2 R_{\text{campo}}$$

Las pérdidas calculadas en el embobinado del rotor del generador en estudio, para una resistencia de campo de 1.83516 ohm a una temperatura de 115 ° C, son mostradas en la tabla VIII.

**Tabla VIII. Pérdidas en el embobinado del rotor**

<b>Factor de potencia = 0.9</b>		<b>Factor de potencia = 1.0</b>	
<b>% de carga</b>	<b>Pérdida [Watts]</b>	<b>% de carga</b>	<b>Pérdida [Watts]</b>
110	26338	110	14791
100	22707	100	12805
75	15157	75	8685
50	9548	50	5754
25	5673	25	3995

**Fuente: Harang S, ACEO, determinación de las pérdidas.**

Como se observa en la tabla VIII; a una mayor corriente de campo (FP = 0.9), las pérdidas serán mayores comparadas con la operación del generador a un factor de potencia de 1.0 (menor corriente de campo). Para observar de manera práctica la manera cómo afecta a la temperatura de un generador síncrono el valor de la corriente de campo, observe los valores de las tablas IX y X de pruebas realizadas al generador 1 de Central Hidroeléctrica Poza Verde.

**Tabla IX. Análisis de temperaturas del estator del generador síncrono a un factor de potencia de 0.97 (capacitivo).**

Hora de lectura	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Potencia real [kW]	1849	1867	1875	1866	1900	1883	1862	1875	1802
Potencia reactiva [kVARS]	392	384	399	403	401	442	416	399	324
Factor de potencia (capacitivo)	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.98
I exc [amperios]	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
T ambiente [°C]	26	27	29	29	29	29.5	29.5	29	28
T. Fase A [°C]	85	86	87	89	90	91	92	91	90
T. Fase B [°C]	87	88	89	92	91	92	94	93	92
T. Fase C [°C]	83	84	85	88	89	90	90	90	89

**Tabla X. Temperaturas del estator del generador síncrono a un factor de potencia de 0.93 (capacitivo).**

Hora de lectura	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Potencia real [kW]	1876	1893	1918	1916	1921	1924	1899	1808	1814
Potencia reactiva [kVARS]	540	700	715	681	719	720	662	662	681
Factor de potencia (capacitivo)	0.96	0.93	0.93	0.94	0.93	0.93	0.94	0.94	0.93
I exc [amperios]	3.3	3.3	3.3	3.4	3.4	3.4	3.3	3.4	3.3
T ambiente [°C]	26	27	28	29	29	29.5	29.5	29	28
T. Fase A [°C]	86	87	88	90	91	92	91	90	91
T. Fase B [°C]	88	89	91	93	93	94	94	93	93
T. Fase C [°C]	85	85	87	89	90	91	90	89	90

Como se puede observar en las tablas IX y X al operar el generador a un factor de potencia mayor (mayor entrega de potencia reactiva), existirá un mayor calentamiento del generador. Se debe tomar en cuenta que es necesario que las condiciones de la temperatura ambiente para las dos tablas sean las mismas; ya que de lo contrario, la temperatura ambiente actuaría de manera desigual originando resultados que no podrían ser comparados en base al factor de potencia y la corriente de excitación del generador.

El máximo calentamiento permitido en el embobinado de campo limitará la máxima corriente de campo del generador; refiérase a la figura 21, donde se indican las máximas corrientes que pueden ser proporcionadas por el DECS para el circuito de campo del generador y los límites de tiempo que pueden ser aplicadas.

La importancia de tener los valores máximos de corriente de campo del generador es que, limitan directamente el máximo factor de potencia permitido cuando el generador está operando en sus kVA nominales y además, aseguran reducir los riesgos de sobre calentamiento en el generador.

Para los generadores en estudio, la potencia nominal es de 4478 kVA y un factor de potencia máximo de 0.9. Para este factor de potencia, la máxima potencia reactiva que podrá suministrar el generador se calcula como sigue:

$$Q = 3 V_{\phi} I_A \text{ sen } \theta$$

$$Q = 3 * (4160 / \sqrt{3}) * 621.5 * \text{sen } (25.84)$$

$$Q = 1951 \text{ kVAR}$$

Es posible operar el generador con un factor de potencia capacitivo mayor a 0.9, esto se logrará sólo si se disminuyen los kVA suministrados por el generador. Operando el generador a sus valores nominales de corriente ( $I_A$ ) y de voltaje en las terminales ( $V_T$ ), el factor de potencia no podrá ser mayor a 0.9. Si se deseara operar el generador a un factor de potencia mayor de 0.9, será necesario sobre excitar el generador, esto producirá que el embobinado de campo se sobrecaliente y luego se queme. Por esta razón el máximo calentamiento permitido limitará la máxima corriente de campo del generador.

Al sobre excitar el generador se producirá también sobre calentamiento en el estator. El embobinado del estator será de gran importancia en el análisis térmico del generador, esto se debe a que también está construido de cobre y por lo tanto tendrá pérdidas que se manifestarán en forma de calor.

La manera como afecta la corriente de campo al embobinado del estator se puede observar en la tabla XI. Al operar el generador con una corriente de excitación mayor (factor de potencia 0.9), las pérdidas en el embobinado del estator serán mayores. Esto es porque, al existir una corriente de excitación mayor, la temperatura del generador será mayor y la resistencia del embobinado del estator aumentará, produciendo así mayores pérdidas. Para el generador 1 de central hidroeléctrica Poza Verde, las pérdidas calculadas en el cobre del estator a una resistencia de 0.02024 ohm y una temperatura de 115 ° C son mostradas a continuación.

**Tabla XI. Pérdidas en el embobinado de cobre del estator**

<b>Factor de potencia = 0.9</b>		<b>Factor de potencia = 1.0</b>	
<b>% de carga</b>	<b>Pérdida [Watts]</b>	<b>% de carga</b>	<b>Pérdida [Watts]</b>
110	44170	110	35778
100	36505	100	29569
75	20534	75	16632
50	9126	50	7392
25	2282	25	1848

**Fuente: Harang S, ACEO, determinación de las pérdidas.**

En la tabla XII se muestra cómo afecta la temperatura del generador a la resistencia del estator.

**Tabla XII. Valores de resistencia del estator**

<b>Fase</b>	<b>Resistencia a 19° C [Ohm]</b>	<b>Resistencia a 115 C° [Ohm]</b>
<b>A</b>	<b>0.014707</b>	<b>0.02024</b>
<b>B</b>	<b>0.014684</b>	<b>0.02024</b>
<b>C</b>	<b>0.014684</b>	<b>0.02024</b>

Fuente: Harang S, ACEO, ensayo en carga y determinación de pérdidas.

### **5.3.2. Dieléctricos**

La máxima temperatura que podrán soportar los embobinados de un generador dependerá del tipo de dieléctrico que es utilizado en sus embobinados. El tipo de aislamiento del que están construidos los generadores de hidroeléctrica Poza Verde es un aislamiento tipo F. Con este tipo de aislamiento la máxima sobre temperatura que podrán soportar estos generadores será de 105° C, por encima de la temperatura ambiente. La temperatura ambiente que es tomada como referencia es de 40° C, por lo que la máxima temperatura que podrán alcanzar los embobinados del estator será de 145 ° C.

Como se mencionó, uno de los efectos que se producirá en el generador al sobre o sub excitarlo será que se producirá sobrecalentamiento en los embobinados del rotor y del estator, cuando el calentamiento sobrepase los 145 ° C se producirá daño en el dieléctrico. Para evitar que esto suceda, el generador tiene sensores y protecciones que miden constantemente las temperaturas internas para que los límites de temperatura no sean sobre pasados. Otro efecto importante que debe tomarse en cuenta es que, al exceder los límites de sobre excitación en el generador, el voltaje interno del generador será muy grande y esto producirá que se rompa el aislamiento eléctrico del generador.

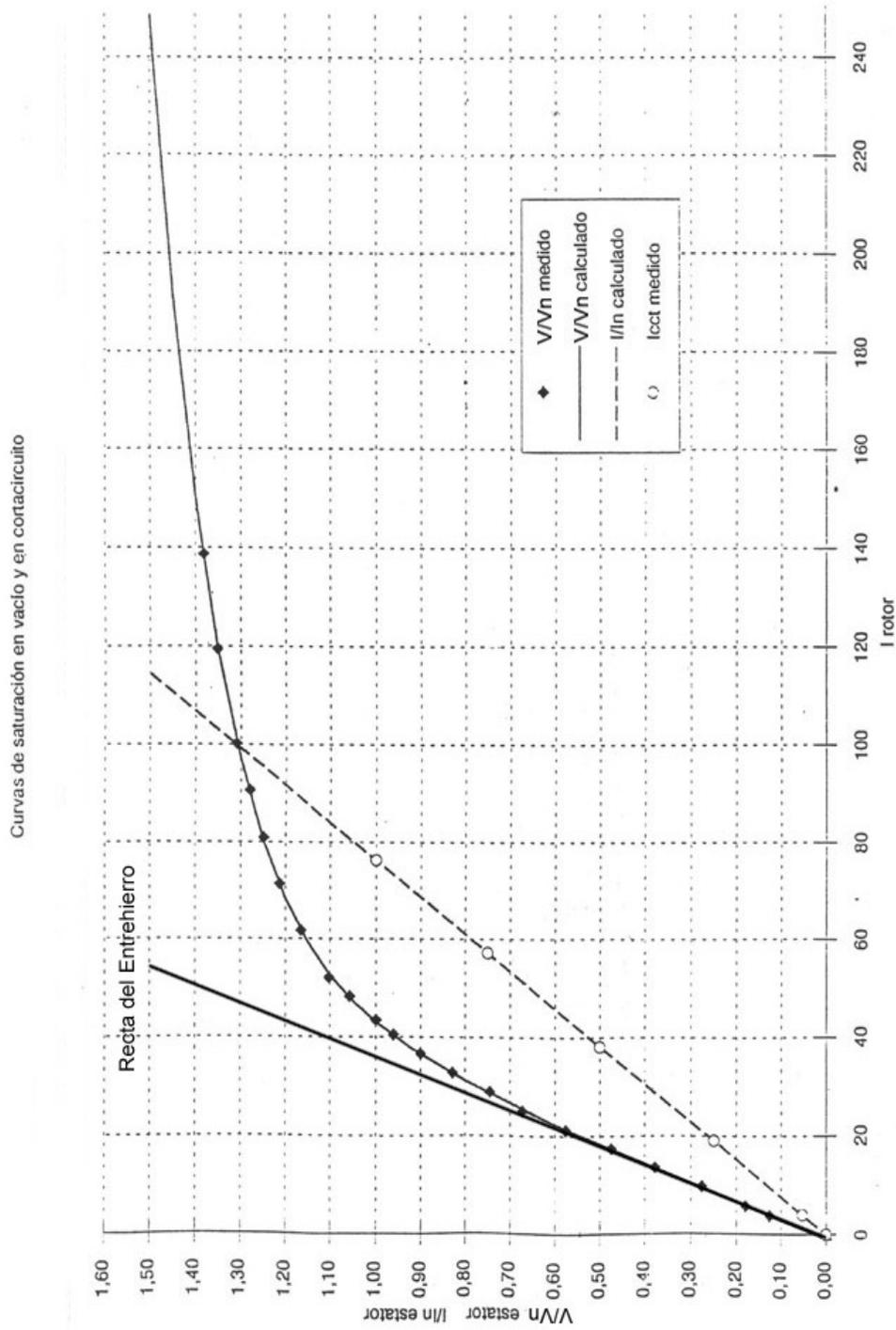
Esto no sucederá porque los límites de sobreexcitación se encuentran dentro de los rangos adecuados de operación, que evitan un rompimiento del aislamiento eléctrico.

Los sobre calentamientos a los que sea sometido un generador pueden afectar de manera directa el aislamiento, esto produciría que se dañe el material aislante y en este caso existe riesgo de rompimiento del aislamiento eléctrico. Por esta razón se determinan los límites máximos de temperatura del generador en las protecciones del generador, los límites máximos de corriente de excitación en la unidad DECS y los tiempos que se pueden aplicar (ver la figura 21).

### **5.3.3. Saturación**

La saturación en un material ferromagnético es un factor muy importante a tomar en cuenta para el diseño y operación de un generador síncrono. Para conocer las características de saturación del material ferromagnético del que están contruidos los generadores síncronos, es necesario analizar la característica de circuito abierto del generador. En la figura 25, se muestra la curva de saturación en vacío del generador 1 de la hidroeléctrica Poza Verde, y en la tabla XIII, se indican sus valores respectivos de voltaje en las terminales a circuito abierto y sus respectivos valores de corriente de excitación.

Figura 25. Curva de saturación en vacío



Fuente: Harang S, ACEO, Curva de saturación en vacío.

**Tabla XIII. Característica en vacío**

<b>Voltaje</b>	<b>I exc</b>	<b>Velocidad (r.p.m)</b>
5750	7	900
5625	6	900
5450	5	900
5325	4.5	900
5200	4	900
5050	3.5	900
4850	3	900
4590	2.5	900
4400	2.3	900
4160	2.05	900
4000	1.9	900
3750	1.7	900
3450	1.5	900
3100	1.3	900
2800	1.1	900
2400	0.9	900
1975	0.7	900
1575	0.5	900
1150	0.3	900
750	0.1	900
525	0	900

**Fuente:** Harang S, ACEO, Característica en vacío.

Para la corriente de excitación igual a 0, se puede observar que existirá tensión inducida en las terminales del generador; esto será debido a la remanencia magnética.

En la figura 25 se pueden observar los siguientes detalles:

- Al inicio, la curva de saturación en vacío se comporta como una línea recta, esto se debe a que el núcleo ferromagnético no está saturado.

En esta región, un pequeño aumento en el flujo magnético produce un enorme aumento en la relación del voltaje  $V/V_n$  medido en el estator.  $V_n$  es el voltaje nominal del estator (4160 V) y  $V$  el voltaje medido en las terminales del estator en la prueba en vacío.

- A una relación de voltaje  $V/V_n$  igual a 0.60, la curva de saturación en vacío se separa de la línea del entrehierro, produciéndose en este punto el primer cambio en su pendiente. Esta pendiente se mantiene hasta la relación de voltaje  $V/V_n$  igual a 0.90.
- Entre la relación de voltaje  $V/V_n$  igual a 0.90 y 1.00, se produce el segundo cambio en la pendiente de la curva de saturación en vacío. En este punto se empieza a evidenciar que el aumento en la intensidad del flujo magnético producido por el aumento de la corriente del rotor, ya no produce el mismo aumento en la relación de voltaje  $V/V_n$  que se producía entre  $V/V_n$  0.00 y 0.60.
- Entre la relación de voltaje  $V/V_n$  igual a 1.00 y 1.10, se produce el tercer cambio en la pendiente de la curva de saturación en vacío. Aquí ya no existe una relación lineal entre la intensidad del flujo magnético y el voltaje del generador.
- La zona entre las relaciones de voltaje  $V/V_n$  1.00 y 1.25, es la zona de transición entre la región no saturada y la saturada.
- Se puede observar que cuando se tengan corrientes de excitación bajas, no existirá riesgo de saturación magnética.

Los límites de sobre excitación son importantes en el análisis de saturación magnética, ya que al sobre excitar el generador se saturará el núcleo ferromagnético del generador. Los límites de sobre excitación que se definieron en la sección 4.4.12, definen la máxima intensidad de flujo magnético del generador para que éste opere de manera eficiente y sin riesgos de saturación magnética.

## **5.4. Tiempos de respuesta**

### **5.4.1. Régimen permanente**

Las condiciones de operación de un generador en régimen permanente son estables. En este régimen no se presentan grandes variaciones de voltaje en las terminales del generador y además, la demanda de potencia reactiva del sistema de carga permanece constante o con variaciones leves. En régimen permanente, se programará a través del sistema Scada o de la Unidad DECS las condiciones que regirán el funcionamiento del generador.

La regulación de voltaje del generador durante la operación en régimen permanente se fundamenta en que, es necesario mantener constante el voltaje del generador a un valor igual o un poco mayor de 4160 voltios. A través del parámetro de ajuste STAB en la unidad DECS programado a un valor de 200, se ha definido una función de respuesta lenta ante pequeñas variaciones de voltaje en el sistema de carga, resultando así una función más estable y constante de la amplitud de voltaje del generador.

En la unidad de tiempo se dan pequeños cambios en la amplitud del voltaje en las terminales del generador, estos pequeños cambios se deben a que constantemente la carga conectada al generador está cambiando.

Cuando los cambios en la carga no producen grandes modificaciones en las condiciones de operación del generador, éste entonces se encuentra operando en condiciones de régimen permanente.

#### 5.4.1.1. Gráficos del voltaje en las terminales del generador

En la figura 26, 27, 28, 29, 30 y 31 se muestra el comportamiento del generador 1 de la central hidroeléctrica Poza Verde, en régimen permanente. Se gráfica el voltaje en las terminales del generador, la corriente de excitación necesaria para mantener este voltaje y la potencia reactiva medida en sus terminales; todas en función del tiempo.

**Figura 26. Régimen permanente, factor de potencia inductivo a 0.98**

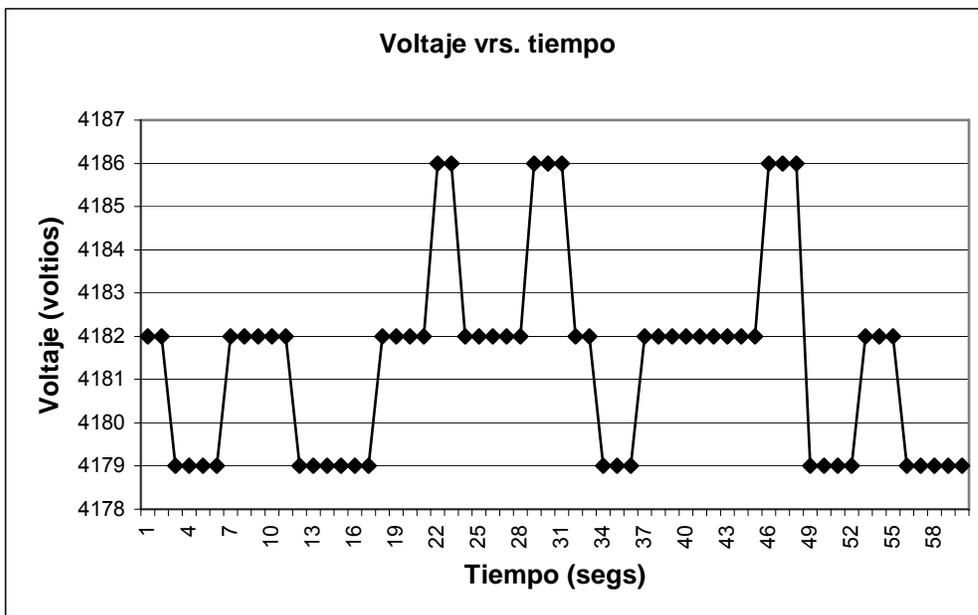


Figura 27. Régimen permanente, factor de potencia inductivo a 0.98

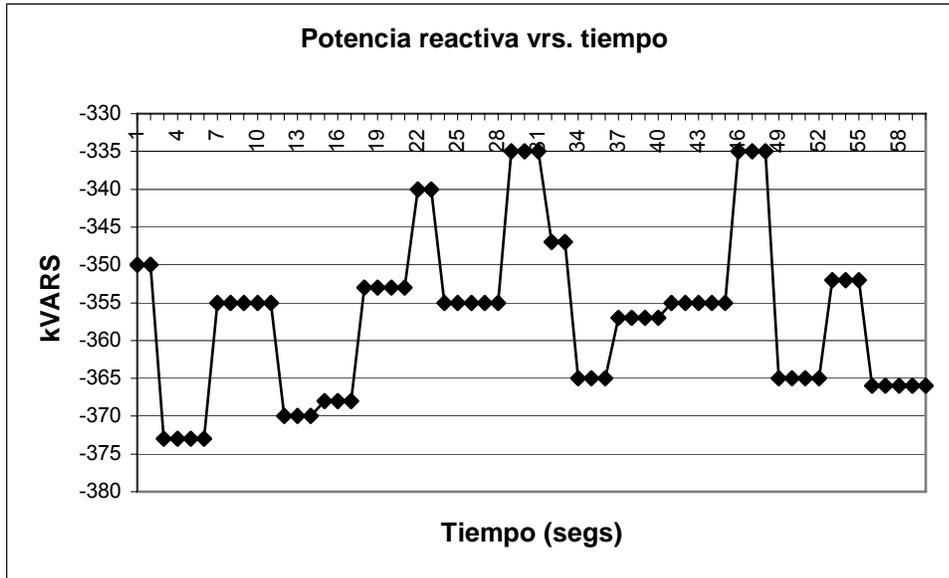


Figura 28. Régimen permanente, factor de potencia inductivo a 0.98

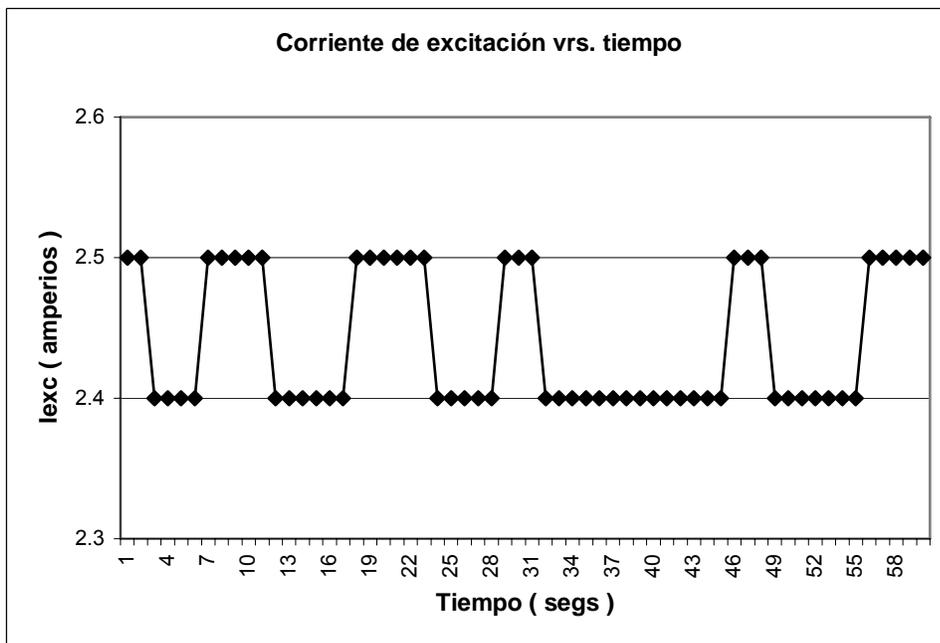


Figura 29. Régimen permanente, factor de potencia capacitivo a 0.98

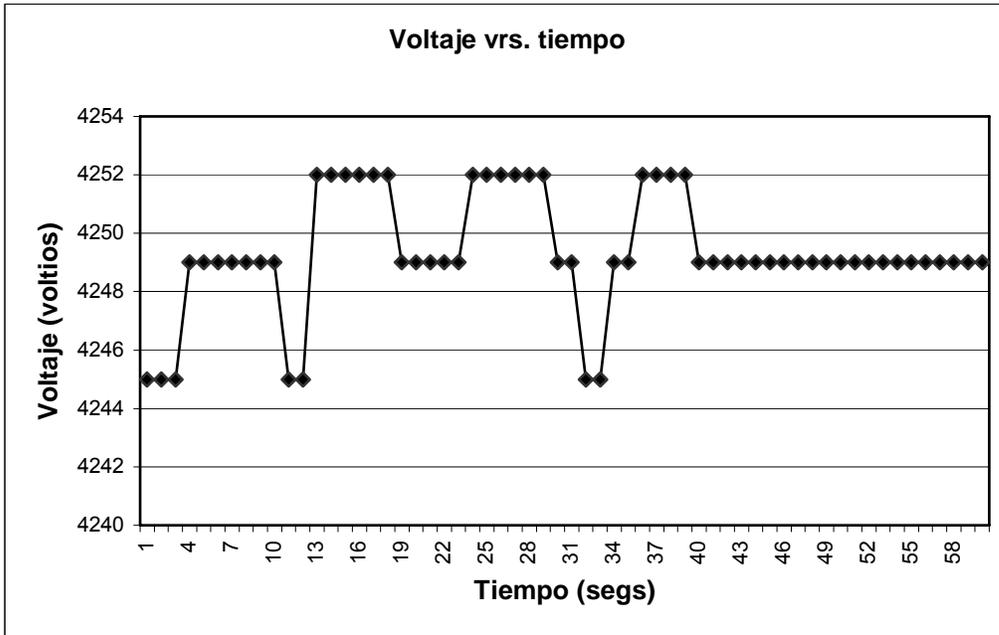
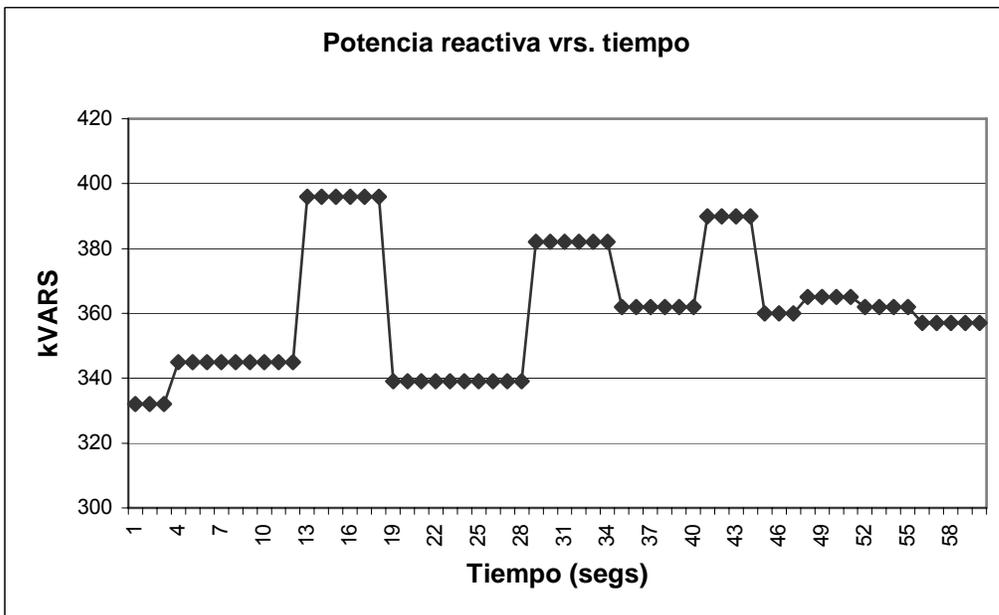
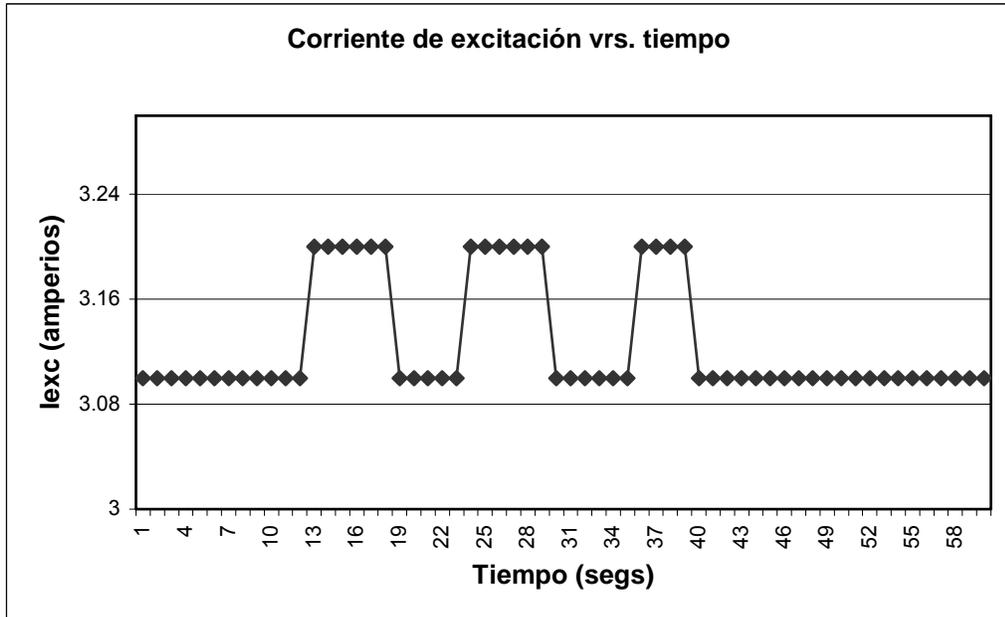


Figura 30. Régimen permanente, factor de potencia capacitivo a 0.98



**Figura 31. Régimen permanente, factor de potencia capacitivo a 0.98**



#### **5.4.2. Régimen transitorio**

Algunos de los fenómenos transitorios que pueden darse en un generador síncrono son:

- Cuando el generador se conecta al S.N.I., existe un período de tiempo de régimen transitorio antes que el generador se estabilice.
- Período transitorio que experimenta el generador, al cambiar su factor de potencia de operación en régimen permanente.
- Fenómenos transitorios por corto circuito.

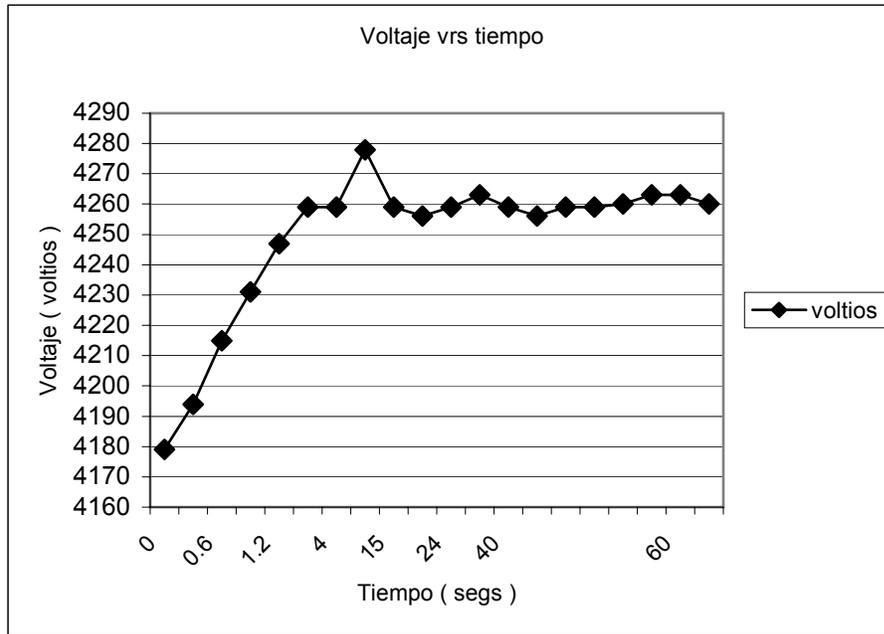
- Aplicación repentina de carga excesiva a las terminales del generador, que puede darse por salida de unidades generadoras, aplicación repentina de cubrimiento de carga excesiva del S.N.I.

Cuando el generador es afectado por un fenómeno transitorio, la estabilidad del voltaje en las terminales del generador dependerá de la fuerza del campo del generador y de los ajustes programados en la unidad DECS. El ajuste que definirá los intervalos de tiempo en que el sistema de excitación debe responder a la alteración del sistema de carga, es el rango de estabilidad (SR). Esto muestra la gran importancia al programar el valor para este ajuste en la unidad DECS. Como se mencionó, el valor de este ajuste dependerá del tamaño del generador y de su frecuencia.

#### **5.4.2.1. Gráficos del voltaje en las terminales del generador**

En las figura 32,33 y 34, se muestra el comportamiento del control de la excitación en régimen transitorio. El proceso que se grafica, muestra el voltaje y la potencia reactiva en las terminales del generador durante el proceso de transición al cambiar el factor de potencia de operación del generador, desde un factor de potencia inicial de 0.98 inductivo hasta el factor de potencia final de 0.98 capacitivo. Además, se muestra cómo regula el DECS la corriente de campo del generador para este proceso.

**Figura 32. Operación en régimen transitorio**



**Figura 33. Operación en régimen transitorio**

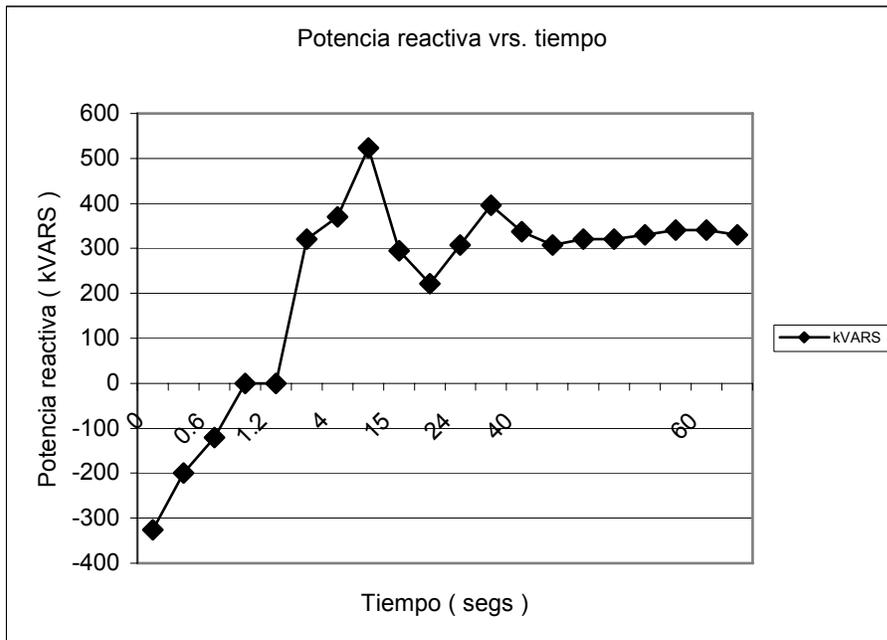
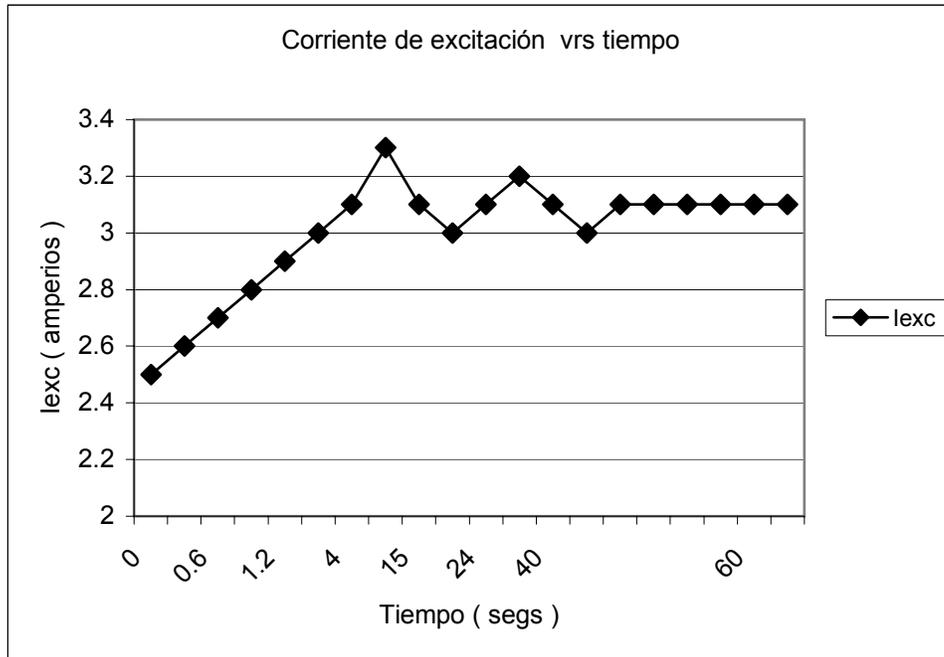


Figura 34. Operación en régimen transitorio



## 6. MANTENIMIENTO DE LA UNIDAD DECS

### 6.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo que debe ser realizado periódicamente a la unidad DECS es el siguiente:

- Limpieza y ajuste de las terminales de las conexiones ubicadas en la parte trasera de la carcasa del DECS. La limpieza se debe realizar con líquido limpiador de contactos, el ajuste de la terminal se verifica al introducirla dentro del conector en la unidad DECS. Si es necesario un mayor ajuste , se debe cerrar de manera gradual la terminal con una pinza hasta alcanzar el apriete adecuado. Para hacer esto es necesario retirar la alimentación de energía del DECS.
- Revisar que haya un buen contacto entre la tuerca y la terminal de conexión a tierra de la carcasa de la unidad DECS.
- Eliminar el polvo de los disipadores de calor ubicados en la parte trasera de la carcasa de la unidad DECS. Esto se debe realizar cada mes.
- Verificar que no exista corrosión en la carcasa metálica del DECS.
- Revisar los valores de ajuste programados en el MENU 1 de la unidad DECS.

Esto debe hacerse cada 6 meses para evitar una mala operación del sistema de control, los valores de ajuste deben anotarse cada vez que se realice la revisión.

## **6.2. Mantenimiento correctivo**

A continuación se detallan los problemas más comunes que pueden aparecer en el generador debidos al mal funcionamiento o mala programación de la unidad DECS; y además, los procedimientos que deben seguirse para solucionarlos.

### **6.2.1. El voltaje en las terminales del generador no sube**

- 1.** Verificar que todas la conexiones del DECS están correctas, refiérase a la figura 15. Si se detecta alguna mala conexión, conéctela apropiadamente.
- 2.** Revisar que el voltaje de alimentación al módulo de poder del DECS esté correcto, ver la tabla I para obtener el valor del voltaje nominal. Si no hay voltaje de entrada, revisar el circuito de alimentación de voltaje al módulo de poder del DECS y el módulo de poder. Si existe voltaje, proceder con el paso tres.
- 3.** Verificar que no exista ningún fusible abierto; si hay alguno abierto, entonces se debe reemplazar. Luego continuar con el paso 4.

4. Verificar que la velocidad del generador se encuentra a 900 RPM; si es menor, se debe incrementar. Para incrementar la velocidad deben abrirse dos paletas deflectoras de la turbina hidráulica hasta alcanzar la velocidad deseada. Si la velocidad es correcta, proceder al paso 5.
5. Verificar que en el panel frontal el led OVEREXC no esté iluminado. Si el led está iluminado, revisar las condiciones de carga del generador; luego se debe parar el generador por un período de 10 segundos y luego arrancarlo. Si el led no está iluminado, proceder con el paso 6.
6. Verificar que en el panel frontal el led OVERVOLT no esté iluminado. Si el led está iluminado, revisar el generador y sus condiciones de carga; luego parar el generador por un período de 10 segundos y arrancarlo de nuevo. Si el led no está iluminado, proceder con el paso 7.
7. Verificar que en el panel frontal el led OVERTEMP no está iluminado. Si el led está iluminado, aumente el aire de enfriamiento de la unidad DECS o disminuya la temperatura ambiente en el que se encuentra la unidad DECS; luego parar el generador por un período de 10 segundos y luego arrancarlo de nuevo. Si el led no se está iluminado, proceder con el paso 8.
8. Reemplazar la unidad DECS. Si el problema no se corrige después de haber reemplazado la unidad DECS, entonces el generador está defectuoso y es necesario consultar con el fabricante.

### **6.2.2. Baja salida de voltaje**

1. Verifique que el ajuste de voltaje natural (CV) en la unidad DECS no esté a un valor muy bajo. El valor de ajuste adecuado para los generadores en estudio es de 119. Si el valor del ajuste está a un valor muy bajo, entonces hay que ajustarlo a un valor más alto. Si el valor del ajuste es adecuado, proceder con el paso 2.
2. Verificar que el ajuste de voltaje fino (FV) no esté a un valor muy bajo. Si está muy bajo, entonces se debe ajustar a un valor más alto, el valor de ajuste normal para los generadores en estudio es de 12.5. Si el valor de ajuste FV esta bien, proceder con el paso 3.
3. Reemplazar la unidad DECS.

### **6.2.3. Alta salida de voltaje**

1. Verificar que el ajuste de voltaje natural no esté programado a un valor muy grande. Si está a un valor muy alto; arriba de 119, ajustarlo a un nivel más bajo. Si el valor de ajuste del voltaje natural es correcto, proceder con el paso 2.
2. Verificar que el ajuste de voltaje fino no esté a un valor muy alto. Si está a un valor muy alto; arriba de 12.5, ajustarlo a un nivel más bajo. Si el valor de ajuste del voltaje fino es correcto, proceder con el paso 3.
3. Reemplazar la unidad DECS.

#### **6.2.4. Si el generador no responde cuando se reajustan los valores programados en la unidad DECS**

1. Se debe resetear la unidad DECS, esto se logra apagando el generador para retirar el voltaje de alimentación; debe retirarse por un período de 10 segundos.
2. Arrancar el generador; si el generador no responde a los re ajustes hechos, reemplazar la unidad DECS.

#### **6.2.5. Baja regulación de voltaje**

1. Verificar que el chasis del DECS esté aterrizado adecuadamente. Si no es así, conecte a GND un alambre calibre #12 que esté conectado el circuito de tierra. Si la carcasa está aterrizada de manera adecuada, proceder con el paso 2.
2. Revisar que las terminales de campo no estén aterrizadas. Si están aterrizadas, deben ser aisladas. Si las terminales de campo no están aterrizadas, proceder con el paso 3.
3. Reemplazar la unidad DECS.

#### **6.2.6. Salida inestable del generador**

1. Verificar que el gobernador del motor primario opere adecuadamente.

2. Verificar que estén bien conectadas las terminales de los sensores y de los cables de alimentación de energía del DECS. Si las terminales y cables están conectados firmemente, proceder con el paso 3.
3. Verificar que el rango de estabilidad (SR) esté ajustado a un valor adecuado. Este valor para los generadores en estudio es de 9. Si el rango de estabilidad no está a un valor adecuado, reiniciar el rango de estabilidad y programarlo al valor adecuado. Refiérase a la tabla VI para elegir el valor adecuado de SR.

#### **6.2.7. El led uf (baja frecuencia) se ilumina**

1. Verificar que el generador esté operando a la velocidad correcta (900 RPM); si no es así, corrija la velocidad. Si el generador está operando a la velocidad correcta, proceder con el paso 2.
2. Verificar en el MENU 1 de la unidad DECS que el valor de ajuste UF esté seleccionado al rango adecuado (57 Hz). Si el valor de ajuste es el correcto, reiniciar la unidad DECS.
3. Revisar que las conexiones del sensor de velocidad y del voltaje de alimentación están seguras.

#### **6.2.8. El led overexc (sobre excitación) se ilumina**

1. Revisar que el generador no esté sobre cargando con potencia reactiva. Si el generador se está sobre cargando, baje el nivel de carga. De lo contrario proceda con el paso 2.
2. Reemplazar la unidad DECS. Si al reemplazarla la falla continúa, se debe revisar el manual del generador ya que está defectuoso.

#### **6.2.9. No hay caída de voltaje (el generador no comparte carga)**

1. Revisar que los alambres conectados a CTB no están abiertos. Si están abiertos, deben ser reparados. Si no están abiertos, proceder con el paso 2.
2. Verificar que la polaridad del CT es correcta. Si es incorrecta, invierta las conexiones en las terminales CTB1 y CTB2. Si la polaridad no está invertida, proceda con el paso 3.
3. Revisar el ajuste de caída de voltaje DRP; si está a un valor muy bajo, la caída de voltaje cuando se aplique una carga será mínima.
4. Si la falla continúa, reemplazar la unidad DECS.

#### **6.2.10. No hay emparejamiento de voltaje**

1. Verificar que la opción de emparejamiento de voltaje esté activada. Si no está activada, debe activarse desde el panel frontal. Si está activada, proceder con el paso 2.

2. Revisar que estén correctas las conexiones en las terminales BUS1 y BUS2 en la unidad DECS (ver la figura 15). Si están conectadas de manera incorrecta, conectarlas en base al diagrama. Si están conectadas de manera correcta, proceder con el paso 3.
3. Revisar que no exista ningún fusible abierto. Luego, revisar que el PT de medición conectado a las terminales BUS1 y BUS2 esté funcionando bien.
4. Verificar el estado de la bobina del contactor P25A, ubicado en el interior del panel de control del generador. Si está quemada, reemplazarla.
5. Si la falla no se soluciona al haber realizado los pasos anteriores, reemplazar la unidad DECS.

### **6.3. Mantenimiento predictivo**

#### **6.3.1. Medición de la corriente en las terminales CTB1 y CTB2**

La corriente de entrada a la unidad DECS en las terminales CTB1 Y CTB2 debe ser medida por medio de un amperímetro de gancho. La relación de transformación del CT que es utilizado para reducir la corriente de la fase B del generador es de 800:5 amperios. La máxima corriente del generador es de 621.5 amperios, y para esta corriente a través de las terminales CTB1 y CTB2 deben circular 3.88 amperios. Si la corriente que está circulando por los embobinados del estator fuera menor a 621.5 amperios, calcular la corriente que debe circular por las terminales CTB1 y CTB2.

Esto se hace por medio del valor de la relación de transformación del CT (800:5). Por ejemplo, si el valor de corriente para la fase B en la pantalla del DECS indicara 500 amperios:

$$I_{CTB1} = \frac{500 \cdot 5}{800} = 3.12 \text{ A}$$

El cálculo anterior indica la corriente que debe circular por las terminales CTB1 y CTB2 del DECS; cuando la corriente del estator del generador es de 500 A, debería ser de 3.12 amperios. Si la corriente medida por el amperímetro es distinta, hacer lo siguiente:

1. Verificar que la carga del generador corresponde al valor de corriente medido. Si la corriente medida con el amperímetro de gancho a través de las terminales CTB1 y CTB2 no corresponde al valor de carga del generador, continuar con el paso 2.
2. Parar el generador, limpiar los contactos y apretar las terminales conectadas a CTB1 y CTB2.
3. Revisar que el CT está bien conectado y limpiar sus conexiones.
4. Arrancar el generador, medir de nuevo el valor de corriente de las terminales CTB1 y CTB2 con el amperímetro de gancho. Si la falla continúa, el CT está fallando y debe ser revisado o reemplazado si es necesario.
5. Si la corriente medida con el amperímetro de gancho corresponde al valor de carga del generador; y la unidad DECS no muestra en su pantalla el valor correcto de corriente, la unidad DECS está fallando y debe ser revisada o reemplazada si es necesario.

### **6.3.2. Medición de la corriente en las terminales F+ y F-**

El valor de corriente de las terminales F+ y F- debe ser medido con un amperímetro de gancho, el valor medido debe ser igual al valor mostrado en la función FLDA de la pantalla del DECS. Si el valor es diferente, el DECS está fallando y debe ser revisado.

### **6.3.3. Medición del voltaje de entrada al módulo de poder del DECS**

El voltaje de alimentación al módulo de poder puede variar entre un rango de 190 a 277  $V_{RMS} \pm 10\%$  y tener una frecuencia entre 50 y 400 Hz. Este voltaje debe ser medido por medio de un voltímetro; si el voltaje medido se encuentra fuera del rango de los valores indicados arriba, se darán las siguientes fallas:

1. Un voltaje debajo de 190 voltios producirá que el voltaje de salida hacia el DECS no sea suficiente, entonces el DECS no funcionará.
2. Un voltaje superior a 277 voltios dañará el módulo de poder del DECS.

Si el voltaje medido se encuentra fuera del rango de 190-277  $V_{RMS}$ , hacer lo siguiente:

1. Revisar las líneas de alimentación de voltaje desde la salida del PT hasta la entrada del voltaje al módulo de poder del DECS. Se deben limpiar los contactos y apretar tornillos.

2. Medir el voltaje de salida del PT que alimenta el voltaje al módulo de poder del DECS, este PT tiene una relación de transformación de 4200/240 voltios. Se debe verificar que el voltaje del generador esté a 4200 V para obtener una salida de 240 voltios; si el voltaje del generador es diferente, hay que calcular el voltaje que debe existir en el lado secundario del PT por medio de la relación de transformación. Si el voltaje medido en el secundario del PT no corresponde al voltaje del generador, revisar el PT con un TTR y si es necesario debe reemplazarse.

#### **6.3.4. Medición del voltaje de entrada al DECS**

El voltaje nominal de entrada al DECS es de  $240 V_{RMS} \pm 5\%$ , este voltaje debe ser medido por medio de un voltímetro entre las terminales 3 y 4 de la unidad DECS. Si el voltaje medido se encuentra fuera del rango establecido, hacer lo siguiente:

1. Revisar que los cables estén bien conectados y que no hay falsos contactos. Si la falla persiste, continuar con el paso 2.
2. Revisar que el voltaje de entrada al módulo de poder del DECS se encuentra dentro del rango de voltaje establecido. ( Leer la sección 6.3.3.)
3. Si el voltaje de entrada al módulo de poder del DECS se encuentra dentro de los rangos establecidos; y la salida de voltaje del módulo no es del valor correcto, el módulo de poder del DECS debe ser reemplazado.

### **6.3.5. Medición del voltaje en las terminales E1, E2 y E3**

Estas terminales de la unidad DECS monitorean el voltaje de salida del generador. Para realizar esta medición son utilizados 2 PTS; su relación es de transformación de 4200/120 V. Los valores de los voltajes en las terminales E1, E2 y E3 pueden ser medidos por medio de un voltímetro; cuando los voltajes medidos no corresponden al valor correcto, hacer lo siguiente:

1. Revisar que los cables están bien conectados y que no hay falsos contactos. Si la falla persiste, continuar con el paso 2.
2. Revisar que los cables que conectan el PT y la unidad DECS no tienen corto circuito o están dañados.
3. Verificar que los fusibles en el lado secundario del PT están haciendo buen contacto. Si la falla persiste, continuar con el paso 4.
4. Verificar que el voltaje del generador esté a 4200 V para obtener una salida de 120 voltios; si el voltaje del generador es diferente, calcular el voltaje que debe existir en el lado secundario del PT por medio de la relación de transformación. Si el voltaje medido en el secundario del PT no corresponde al voltaje del generador, hay que revisar el PT.
5. Revisar la relación de transformación de los PT con un TTR; si uno o los dos PT está fallando, debe ser reemplazado.

### **6.3.6. Temperatura de la unidad DECS**

La temperatura de operación de la unidad DECS debe permanecer dentro de un rango que va desde  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La temperatura puede ser medida por medio de un termómetro. En los disipadores de calor ubicados en la parte trasera de la unidad DECS, se produce mayor calentamiento, por esta razón la medición de temperatura debe ser realizada en esta sección.

Cuando la temperatura sobrepase los límites establecidos se deben realizar los siguientes pasos:

1. Verificar que la temperatura ambiente se encuentre a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; si la temperatura es superior, reducirla por medio de un sistema de aire acondicionado o un ventilador.
2. Si al reducir la temperatura ambiente; la temperatura de la unidad DECS continúa alta, la unidad DECS está fallando y debe ser reemplazada.

### **6.3.7. Detección de vibración en la unidad DECS**

Cuando la operación de la unidad DECS es normal, no presenta niveles de vibración que sean percibidos. Si se detectara vibración, será necesario medir su nivel por medio de equipo de medición de vibraciones. Para asegurar un adecuado funcionamiento de la unidad DECS, los niveles de vibración que pueden ser detectados se indican a continuación

- Aceleración  $9.8\text{ m/S}^2$  y una frecuencia que varié entre 5 y 26 Hz.

- Doble amplitud de 0.036 pulgadas y una frecuencia que varíe entre 27 y 52 Hz.
- Aceleración 49 m/S<sup>2</sup> y una frecuencia que varíe entre 53 y 500 Hz.

Si se detecta una vibración fuera de los rangos mostrados anteriormente, hacer lo siguiente:

1. Revisar que los tornillos que sujetan la unidad DECS a la carcasa del panel del generador están bien apretados. Si los tornillos están bien apretados, continuar con el paso 2.
2. Revisar que el nivel de voltaje en las terminales 3 y 4 de la unidad DECS están a un valor de 240 VRMS ± 5%. Si el valor de voltaje no es el adecuado, leer la sección 6.3.4.. Si el valor de voltaje es adecuado, continuar con el paso 3.
3. La unidad DECS tiene alguna falla interna y se debe revisar o reemplazar si es necesario.

#### **6.3.8. Análisis por medio de termografía infrarroja**

Por medio de termografía infrarroja analizar puntos calientes en las siguientes secciones:

- PT identificados como PT 1-2 y PT 1-3, utilizados para la medición del voltaje del generador en la unidad DECS.
- PT identificado como EPT-1, provee el voltaje de alimentación al módulo de poder del DECS.

- PT identificados como PT1 y PT2, conectan el generador con el S.N.I. para lograr la sincronización del generador.

Si son detectados puntos calientes en PT 1-2, PT 1-3 o en EPT-1, hacer lo siguiente:

1. Si el problema es detectado en los fusibles del PT ubicados del lado de alto voltaje, parar el generador, luego revisar que las mordazas de soporte de los fusibles lo están sujetando fuertemente; si no es así, se deben cerrar más.
2. Si el calentamiento es detectado directamente en el chasis del PT, revisar el PT físicamente y medirlo con TTR. Si el PT está dañado, debe reemplazarse.

Si los puntos calientes son detectados en PT1 y PT2 , hacer lo siguiente:

1. Desenergizar la barra de 13.8 kV.
2. Realizar los pasos 1 y 2, descritos anteriormente.



## CONCLUSIONES

1. Los sistemas digitales de control de excitación, permiten controlar de manera adecuada y segura las condiciones de operación de los generadores síncronos.
2. Las funciones de control que vienen programadas en la unidad DECS, deben ser ajustadas, en base a las condiciones de operación que deseen obtenerse y las características físicas del generador.
3. Un mal ajuste en las funciones de control de la unidad DECS, podrá causar perturbaciones al S.N.I., además el generador podría sufrir daños físicos.
4. Para asegurar una adecuada regulación primaria de voltaje, es importante que los parámetros que la determinan, sean ajustados a valores adecuados y seguros para el generador; además es importante, monitorear constantemente el voltaje del generador y de la barra de alta tensión de transmisión del S.N.I.
5. Cuando el voltaje del generador sometido a estudio sea menor a 4160 voltios, será necesario entregar más potencia reactiva al sistema para subir el voltaje al valor adecuado; esto se logrará aumentando la corriente de excitación del generador.
6. Si el voltaje del generador es muy alto (por ejemplo 4300 voltios en los generadores sometidos a estudio), será necesario bajarlo, esto se logra disminuyendo la corriente de excitación.

7. Al sobre excitar los generadores, es importante monitorear que el tiempo de duración de la misma no exceda los límites permitidos para el diseño del generador, ya que de lo contrario el embobinado de campo se quemará.
8. Es importante no exceder los límites de temperatura de los generadores, el límite de temperatura de los generadores de Central Hidroeléctrica Poza Verde es de 145 ° C, por esta razón las condiciones de operación del generador deben ser monitoreadas constantemente, para evitar su sobrecalentamiento.
9. Un mantenimiento adecuado a la unidad DECS, reducirá los riesgos de falla y/o de operación en forma inadecuada

## RECOMENDACIONES

1. Debido a la importancia del funcionamiento de la unidad DECS, debe ser programada y ajustada únicamente por personal calificado, una mala programación de los ajustes produciría daño a la unidad o al generador.
2. Es importante revisar constantemente los niveles de voltaje del generador y de la barra de alta tensión del S.N.I.; el voltaje del generador objeto de estudio debe permanecer igual o arriba de 4160 (aproximadamente a 4250 voltios), y el voltaje de la barra de alta tensión del S.N.I. se debe mantener igual o arriba de este valor.
3. Si es necesario subir el voltaje del generador, la corriente de excitación se debe subir únicamente al valor necesario y no más; un nivel más alto de lo necesario, calentaría el generador y produciría que sus pérdidas aumentaran y así se reduciría la eficiencia del generador.
4. Si el voltaje del generador o del sistema de 69 kV es muy alto y se desea bajar, será necesario reducir el nivel de la corriente de excitación para consumir potencia reactiva, el valor mínimo de voltaje del generador debe ser de 4160 voltios, la corriente de excitación no debe ser reducida a un valor donde el voltaje sea menor a éste.
5. Cuando se desee entregar potencia reactiva al sistema, se debe programar un factor de potencia capacitivo en el sistema SCADA; el valor programado puede variar entre 0.90 y 1.00, cuando el generador esté operando a su potencia y voltaje nominal la máxima potencia

reactiva entregada es de 1950 kVAR; si el generador no está operando a su potencia (kVA) nominal, el factor de potencia podrá ser más baja de 0.90.

6. Cuando se desee consumir potencia reactiva del sistema, se debe programar un factor de potencia inductivo en el sistema SCADA; el valor programado puede variar entre 0.90 y 1.00, dependerá de la cantidad de potencia reactiva que se necesite consumir del sistema para regular el voltaje, la potencia reactiva máxima que se podrá consumir es de 1700 kVAR.
7. El mantenimiento de la unidad DECS debe ser realizado cada año, con la unidad apagada; por esta razón debe ser programado en época de verano, para evitar paradas innecesarias durante la época de invierno.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Ateliers de Constructions Electriques d'Orléans. **Quality folder.** Francia: s.e., 1998.
2. Basler Electric. **Instruction manual for digital excitation control system.** Estados Unidos: s.e., 1998.
3. Basler Electric Company. **DECS computer model.** s.l. s.e., 1995
4. Eugene A. Avallone, Theodore Baumeister III. **Manual del ingeniero mecánico.** 9na ed. (Volumen 2) México: McGraw-Hill Interamericana, 1999.
5. Fitzgerald, A.E. y otros. **Máquinas eléctricas.** 5ª ed. México: McGraw-Hill, 1992.
6. Kenneth G. Jackson, Raphael Feinberg. **Diccionario de ingeniería eléctrica.** 1ra. Ed. Barcelona: Hurope, 1986.
7. Kundur, Prabha. **Power system stability and control.** Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc, 1994.
8. Stephen J. Chapman. **Máquinas eléctricas.** 2da ed. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 1997.