

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**



**ESTIMACION DE PARAMETROS ELECTRICOS DE  
GENERADORES SINCRONOS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA  
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

**PRESENTA:**

**ALBERTO SOLIS ORTIZ**

**MONTERREY, N. L.**

**MARZO DE 1995**

TM

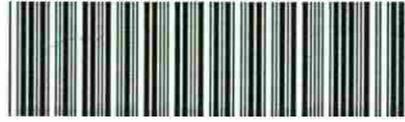
Z5853

.M2

FIME

1995

S64



1020091167



# UANL

---

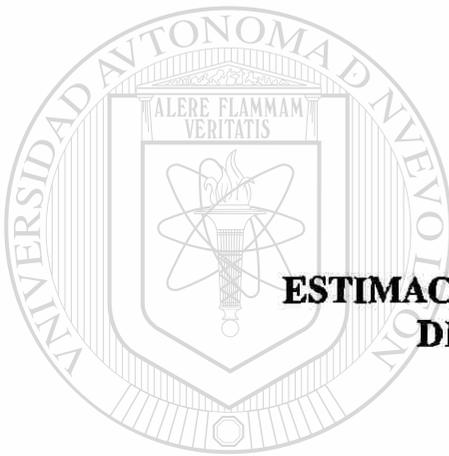
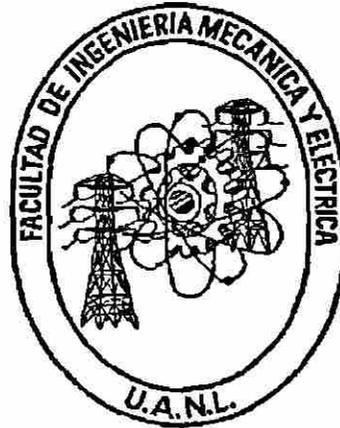
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**



**ESTIMACION DE PARAMETROS ELECTRICOS  
DE GENERADORES SINCRONOS**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIONES

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA/  
ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA:

**ALBERTO SOLIS ORTIZ**

MONTERREY, N.L.

MARZO DE 1995

TM  
25853  
.M2  
FILE  
1995  
56



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO TESIS

167325

**ESTIMACION DE PARAMETROS ELECTRICOS DE  
GENERADORES SINCRONOS**

Los miembros del Comité aprueban la Tesis  
de Maestría de Alberto Solís Ortiz

Dr. Florencio Aboytes García  
Asesor



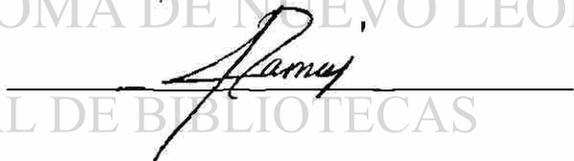
Handwritten signature of Dr. Florencio Aboytes García, written in black ink over a horizontal line.

Dr. Oscar Leonel Chacón Mondragón



Handwritten signature of Dr. Oscar Leonel Chacón Mondragón, written in black ink over a horizontal line.

Dr. Rogelio Ramírez Barradas

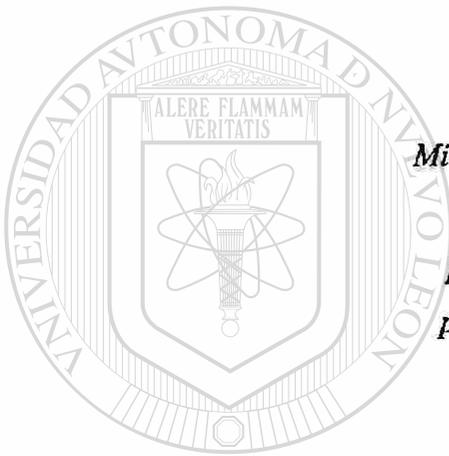


Handwritten signature of Dr. Rogelio Ramírez Barradas, written in black ink over a horizontal line.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

## DEDICATORIA



*Mi deseo siempre ha sido agradarte,  
y nunca causarte desilusión,  
pero soy cosa pequeña y frágil,  
polvo que mueves con dirección.*

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Florencio Aboytes García por su comprensión y valiosas sugerencias durante el desarrollo de la investigación.

Al profesor Dr. Oscar Leonel Chacón Mondragón por el apoyo muy grande que me ha brindado y sus importantes críticas sobre la investigación realizada.

Al Dr. Rogelio Ramírez Barradas por su amistad y comentarios sobre el trabajo realizado.

Al Dr. Salvador Acha por brindarme la oportunidad de ingresar al Programa de Posgrado y por sus importantes observaciones en mis actividades escolares y de investigación.

Al profesor Dr. Héctor Jorge Altuve Ferrer por su ayuda y confianza para el logro de esta investigación.

Al Ing. Reyes, al Ing. Limón y al Ing. Alejandro por su apoyo y comprensión.

A los estudiantes del Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica por la ayuda considerable que me han brindado y por su amistad distinguida.

Al Instituto de Investigaciones Eléctricas por las facilidades y el apoyo brindados durante los estudios de posgrado.

Al CONACyT y Banco de México por el apoyo económico para la realización de los estudios de posgrado.

Marzo 24, 1995

## RESUMEN

### ESTIMACION DE PARAMETROS ELECTRICOS DE GENERADORES SINCRONOS

Publicación No. \_\_\_\_\_

Alberto Solís Ortiz, M. C. en Ingeniería Eléctrica  
Universidad Autónoma de Nuevo León, 1995

Profesor Asesor: Dr. Florencio Aboytes García

El objetivo de esta investigación es presentar de manera detallada diversos procedimientos para la determinación de parámetros eléctricos de generadores síncronos mediante pruebas de rechazo de carga.

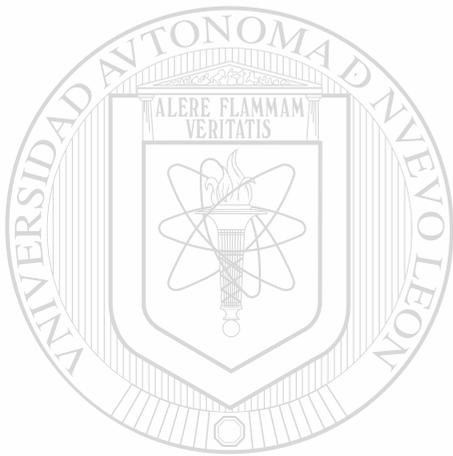
---

En el trabajo se considera un modelo de segundo orden para la máquina síncrona y permite distinguir la necesidad de modelos de mayor orden así como la implementación de otros métodos de prueba.

En el proceso de estimación de parámetros se analizan diversas metodologías; método analítico, método gráfico, redes neuronales tipo gradiente, técnicas de Fourier, mínimos cuadrados y algunas técnicas de optimización. El propósito es determinar la metodología que mejor se adapta al problema de identificación.

El procesamiento de información que requiere la prueba de rechazo de carga se logra mediante la implementación de varios procedimientos incluidos en un programa de simulación general. Entre los mismos destacan los algoritmos usados para el manejo y representación de la información y los referentes a transductores digitales.

Los resultados presentados se obtuvieron procesando la información registrada en pruebas reales de rechazo de carga a generadores síncronos instalados en centrales generadoras del país.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# INDICE

<i>Agradecimientos</i> . . . . .	iv
<i>Resumen</i> . . . . .	v
<i>Indice de figuras</i> . . . . .	xi
<i>Indice de tablas</i> . . . . .	xv
<i>Nomenclatura</i> . . . . .	xvi

## **CAPITULO 1 Introducción.**

1.1 Antecedentes . . . . .	2
1.2 Objetivo de la tesis . . . . .	3
1.3 Estructura de la tesis . . . . .	4

## **CAPITULO 2 Modelo y parámetros del generador síncrono.**

2.1 Introducción . . . . .	6
2.2 Modelo de la máquina síncrona . . . . .	7
2.2.1 Modelo de segundo orden . . . . .	11
2.2.2 Estructura del modelo . . . . .	14
2.3 Métodos para la determinación de parámetros . . . . .	14

## **CAPITULO 3 Pruebas de rechazo de carga para la determinación de parámetros.**

3.1 Introducción . . . . .	18
3.2 Parámetros del eje directo . . . . .	21

## INDICE (continuación)

3.2.1	Dinámica del transitorio en el eje directo . . . . .	22
3.2.2	Derivación de los parámetros de eje directo . . . . .	25
3.3	Parámetros del eje en cuadratura . . . . .	27
3.3.1	Dinámica del transitorio en el eje en cuadratura . . . . .	29
3.3.2	Derivación de los parámetros del eje en cuadratura . . . . .	33
3.4	Instrumentación y registro de datos experimentales . . . . .	35
3.5	Factores de corrección . . . . .	38
3.5.1	Corrección por velocidad . . . . .	38
3.5.2	Corrección por variación en el voltaje de campo . . . . .	39
3.5.3	Saturación . . . . .	40
3.6	Registros reales de las pruebas de rechazo de carga . . . . .	44
3.7	Procesamiento de los registros experimentales . . . . .	49
3.8	Observaciones . . . . .	54

### CAPITULO 4 Metodologías para estimar parámetros de generadores síncronos.

4.1	Introducción . . . . .	55
4.2	Determinación de la curva de decremento de voltaje . . . . .	57 <sup>®</sup>
4.3	Técnicas de estimación . . . . .	59
4.3.1	Método gráfico . . . . .	60
4.3.2	Método analítico . . . . .	63
4.3.3	Mínimos cuadrados con modelo lineal . . . . .	66
4.3.4	Redes neuronales tipo gradiente . . . . .	69
4.3.5	Técnicas de Fourier . . . . .	74
4.3.6	Técnicas de optimización . . . . .	77

## INDICE (continuación)

4.4	Resultados .....	80
4.5	Análisis comparativo .....	83

### CAPITULO 5 Caso de estudio.

5.1	Características del generador .....	87
5.2	Valores base .....	88
5.3	Pruebas de rechazo de carga .....	88
5.3.1	Resultados experimentales de las pruebas de rechazo .....	89
5.4	Curva de saturación en vacío .....	92
5.5	Parámetros de eje directo .....	92
5.5.1	Corriente de línea .....	94
5.5.2	Voltaje en terminales .....	95
5.5.3	Aplicación de términos de corrección al voltaje terminal .....	96
5.5.4	Constantes de tiempo transitoria y subtransitoria .....	97
5.5.5	Modelo de segundo orden para el eje directo .....	100
5.5.6	Cálculo de parámetros para el eje directo .....	100
5.6	Parámetros de eje en cuadratura .....	102
5.6.1	Corriente de línea .....	102
5.6.2	Voltaje en terminales .....	103
5.6.3	Aplicación de términos de corrección al voltaje terminal .....	103
5.6.4	Constantes de tiempo transitoria y subtransitoria .....	104
5.6.5	Modelo de segundo orden para el eje en cuadratura .....	105
5.6.6	Cálculo de parámetros para el eje en cuadratura .....	107
5.7	Constante de inercia .....	108
5.8	Prueba de verificación .....	109

## INDICE (continuación)

### CAPITULO 6 Conclusiones y recomendaciones.

6.1	Introducción .....	110
6.2	Conclusiones .....	110
6.3	Recomendaciones para trabajos futuros .....	114
6.4	Aportaciones .....	115

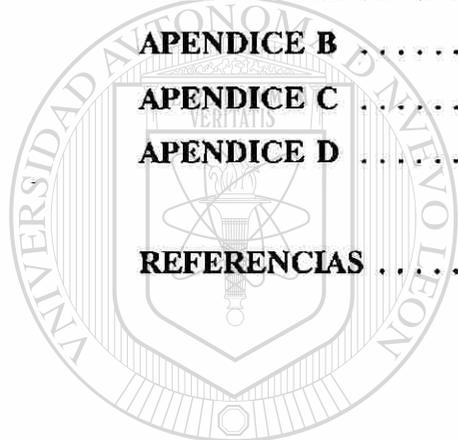
<b>APENDICE A</b> .....	116
-------------------------	-----

<b>APENDICE B</b> .....	120
-------------------------	-----

<b>APENDICE C</b> .....	124
-------------------------	-----

<b>APENDICE D</b> .....	125
-------------------------	-----

<b>REFERENCIAS</b> .....	129
--------------------------	-----



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## INDICE DE FIGURAS

<i>No. de figura</i>	<i>Descripción</i>	<i>Pág.</i>
2.1	<i>Representación esquemática de la máquina síncrona</i> .....	7
2.2	<i>Circuito equivalente del generador síncrono</i> .....	8
2.3	<i>Diagrama de bloques para el generador de polos lisos</i> .....	15
3.1	<i>Relación fasorial en la prueba de eje directo</i> .....	20
3.2	<i>Curva de decremento de voltaje en el eje directo</i> .....	24
3.3	<i>Condición de operación para <math>I_d = 0</math></i> .....	27
3.4	<i>Lugar geométrico de potencias</i> .....	28
3.5a	<i>Punto de operación para el eje q</i> .....	29
3.5b	<i>Por ciento de variación de <math>I_f</math></i> .....	29
3.6	<i>Curva de decremento de voltaje para el eje en cuadratura</i> .....	32
3.7	<i>Diagrama unifilar de conexiones</i> .....	36
3.8	<i>Corrección de voltaje por velocidad</i> .....	39
3.9	<i>Curva característica de un generador síncrono</i> .....	41
3.10	<i>Voltaje eficaz (eje d)</i> .....	44
3.11	<i>Voltaje de campo (eje d)</i> .....	44
3.12	<i>Corriente de campo (eje d)</i> .....	44
3.13	<i>Voltaje terminal instantáneo (eje d)</i> .....	44
3.14	<i>Corriente instantánea <math>I_a</math> (eje d)</i> .....	45
3.15	<i>Potencia activa (eje d)</i> .....	45
3.16	<i>Potencia reactiva (eje d)</i> .....	45
3.17	<i>Voltaje instantáneo <math>V_{bc}</math> (eje d)</i> .....	45
3.18	<i>Corriente instantánea <math>I_c</math> (eje d)</i> .....	46
3.19	<i>Voltaje eficaz (eje q)</i> .....	46
3.20	<i>Voltaje de campo (eje q)</i> .....	46
3.21	<i>Corriente de campo (eje q)</i> .....	46
3.22	<i>Voltaje instantáneo <math>V_{ab}</math> (eje q)</i> .....	47

## INDICE DE FIGURAS (continuación)

3.23	<i>Corriente instantánea <math>I_a</math> (eje <math>q</math>)</i>	47
3.24	<i>Potencia activa (eje <math>q</math>)</i>	47
3.25	<i>Potencia reactiva (eje <math>q</math>)</i>	47
3.26	<i>Voltaje instantáneo <math>V_{ab}</math> (eje <math>q</math>)</i>	48
3.27	<i>Corriente instantánea <math>I_c</math> (eje <math>q</math>)</i>	48
3.28	<i>Aplicación de la rutina <i>rms</i></i>	51
3.29	<i>Filtrado digital de la corriente de campo</i>	52
3.30	<i>Comportamiento de la frecuencia y curva ajustada</i>	53
3.31	<i>Región del voltaje instantáneo</i>	53
3.32	<i>Valores instantáneos muestreados</i>	52
4.1	<i>Voltaje instantáneo en terminales</i>	57
4.2	<i>Valor eficaz del voltaje instantáneo</i>	57
4.3	<i>Suavización de los valores eficaces</i>	58
4.4	<i>Región de interés en el disturbio</i>	58
4.5	<i>Curva de decremento de voltaje</i>	60
4.6	<i>Resultado de restar <math>V(\infty)</math> a <math>V(0^-)</math></i>	60
4.7	<i>Trazo semilogarítmico del voltaje transitorio</i>	62
4.8	<i>Componente subtransitoria del voltaje</i>	63
4.9	<i>Trazo semilogarítmico del voltaje subtransitorio</i>	63
4.10	<i>Componente transitoria</i>	64
4.11	<i>Componente subtransitoria</i>	64
4.12	<i>Modelo ajustado y curva real</i>	68
4.13	<i>Arquitectura de la red neuronal para la estimación de parámetros</i>	73
4.14	<i>Valor eficaz del voltaje instantáneo</i>	73
4.15	<i>Resultado del ajuste</i>	73
4.16	<i>Gráfica del logaritmo del tiempo</i>	77
4.17	<i>Aspecto de la derivada</i>	77

## INDICE DE FIGURAS (continuación)

4.18	<i>Voltaje terminal para el eje q</i> .....	78
4.19	<i>Recuadro de la región subtransitoria</i> .....	84
5.1	<i>Voltaje terminal (P=0, Q=-50)</i> .....	90
5.2	<i>Potencia activa (P=0, Q=-50)</i> .....	90
5.3	<i>Potencia reactiva (P=0, Q=-50)</i> .....	90
5.4	<i>Corriente de campo (P=0, Q=-50)</i> .....	90
5.5	<i>Voltaje de campo (P=0, Q=-50)</i> .....	90
5.6	<i>Velocidad (P=0, Q=-50)</i> .....	90
5.7	<i>Corriente de línea (P=0, Q=-50)</i> .....	90
5.8	<i>Voltaje terminal (P=50, Q=-27)</i> .....	91
5.9	<i>Potencia activa (P=50, Q=-27)</i> .....	91
5.10	<i>Potencia reactiva (P=50, Q=-27)</i> .....	91
5.11	<i>Corriente de campo (P=50, Q=-27)</i> .....	91
5.12	<i>Voltaje de campo (P=50, Q=-27)</i> .....	91
5.13	<i>Velocidad (P=50, Q=-27)</i> .....	91
5.14	<i>Corriente de línea (P=50, Q=-27)</i> .....	91
5.15	<i>Voltaje terminal (P=40, Q=+10)</i> .....	92
5.16	<i>Potencia activa (P=40, Q=+10)</i> .....	92
5.17	<i>Potencia reactiva (P=40, Q=+10)</i> .....	92
5.18	<i>Corriente de campo (P=40, Q=+10)</i> .....	92
5.19	<i>Voltaje de campo (P=40, Q=+10)</i> .....	92
5.20	<i>Velocidad (P=40, Q=+10)</i> .....	92
5.21	<i>Corriente de línea (P=40, Q=+10)</i> .....	92
5.22	<i>Voltaje terminal (P=50, Q=-20)</i> .....	93
5.23	<i>Potencia activa (P=50, Q=-20)</i> .....	93
5.24	<i>Potencia reactiva (P=50, Q=-20)</i> .....	93
5.25	<i>Corriente de campo (P=50, Q=-20)</i> .....	93

## INDICE DE FIGURAS (continuación)

5.26 Voltaje de campo ( $P=50$ , $Q=-20$ ) .....	93
5.27 Velocidad ( $P=50$ , $Q=-20$ ) .....	93
5.28 Corriente de línea ( $P=50$ , $Q=-20$ ) .....	93
5.29 Curva de saturación del generador .....	94
5.30 Corriente de armadura .....	95
5.31 Derivada de la corriente de armadura .....	95
5.32 Voltaje terminal y valores estimados .....	98
5.33 Error del valor estimado .....	98
5.34 Estimación de la corriente de campo .....	99
5.35 Derivada de la corriente de armadura .....	102
5.36 Voltaje en terminales .....	103
5.37 Comportamiento de la velocidad .....	104
5.38 Corrección del voltaje por velocidad .....	104
5.39 Valores registrados y valores estimados .....	105
5.40 Variación de la velocidad .....	108
A.1 Pantalla de entrada al programa .....	115
A.2 Menú principal del programa .....	116
A.3 Menú de manejo de datos .....	116
A.4 Menú para el análisis armónico de datos .....	117
A.5 Menú de opciones en transductores digitales .....	117
A.6 Algunas tareas útiles en la opción de funciones .....	117
A.7 Menú de ajuste polinomial .....	117
A.8 Aplicación del ajuste polinomial .....	118
A.9 Resultados obtenidos al aplicar potencia espectral .....	118

## INDICE DE TABLAS

<i>No. de tabla</i>	<i>Descripción</i>	<i>Pág.</i>
2.1	Parámetros de eje directo .....	12
2.2	Parámetros de eje en cuadratura .....	13
3.1	Instrumentación necesaria para la prueba .....	37
3.2	Cambio en los parámetros del eje d por saturación en $L_{md}$ .....	42
3.3	Cambio en los parámetros del eje q por saturación en $L_{mq}$ .....	42
4.1	Datos de la máquina .....	80
4.2	Resultados para el eje directo .....	81
4.3	Resultados para el eje en cuadratura .....	81
4.4	Resumen de resultados para los ejes d y q .....	82
4.5	Parámetros de eje directo .....	82
4.6	Parámetros de eje en cuadratura .....	83
5.1	Datos de la máquina .....	87
5.2	Pruebas de rechazo de carga .....	88
5.3	Resultados del modelo de segundo orden .....	100
5.4	Parámetros de eje directo .....	101
<del>5.5</del>	<del>Resultados del modelo de segundo orden .....</del>	<del>106</del>
5.6	Parámetros de eje en cuadratura .....	107

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## NOMENCLATURA

$T_m$	<i>Par mecánico</i>
$T_e$	<i>Par eléctrico</i>
$\delta$	<i>Ángulo de carga</i>
$\phi$	<i>Ángulo de fase</i>
$H$	<i>Constante de inercia</i>
$k_d, k_q$	<i>Devanados de amortiguamiento</i>
$L_{md}$	<i>Inductancia de magnetización del eje d</i>
$L_{mq}$	<i>Inductancia de magnetización del eje q</i>
$L_d$	<i>Inductancia síncrona del eje d</i>
$L_q$	<i>Inductancia síncrona del eje q</i>
$L_l$	<i>Inductancia de dispersión</i>
$t$	<i>Tiempo</i>
$P$	<i>Potencia activa</i>
$Q$	<i>Potencia reactiva</i>
$\omega_r$	<i>Velocidad angular del rotor</i>
$\omega_s$	<i>Velocidad angular síncrona</i>
$\theta_r$	<i>Ángulo del rotor respecto al eje de la fase a</i>
$\theta_e$	<i>Ángulo de fase del voltaje de la fase a</i>
$a, b, c$	<i>Fases</i>
$f$	<i>Campo</i>
$\tau, \tau_p, \tau_2$	<i>Constante de tiempo</i>
$\alpha$	<i>Inverso de la constante de tiempo</i>
$V(\cdot), V$	<i>Voltaje</i>
$V(t)'$	<i>Componente transitoria del voltaje</i>
$V(t)''$	<i>Componente subtransitoria del voltaje</i>
$V(0), V_o$	<i>Voltaje en <math>t = 0</math>, voltaje inicial</i>
$V(\infty)$	<i>Voltaje en estado permanente</i>

## NOMENCLATURA (continuación)

$\mu$	Constante de tiempo de los integradores
$\sigma(\cdot)$	Función de energía
$V_m$	Voltaje medido
$I(\cdot), I, i$	Corriente
$R, r$	Resistencia
$\psi$	Enlaces de flujo
$L$	Inductancia
$X$	Reactancia
$d$	Eje directo
$q$	Eje en cuadratura
$l$	Dispersión
'	Efecto transitorio
”	Efecto subtransitorio
$A, B, C$	Coefficientes de las curvas de decremento de voltaje
$E(\cdot)$	Función objetivo, función de energía
$e$	Error
$E_i^2$	Cuadrado del error

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION

En este trabajo se presenta de manera detallada el procedimiento para la determinación de parámetros eléctricos de generadores síncronos a partir de datos experimentales registrados durante pruebas de rechazo de carga. Los resultados que se presentan en la tesis corresponden a datos experimentales obtenidos en plantas de generación de energía eléctrica del país. Estos parámetros son de gran utilidad en la operación y control de sistemas eléctricos de potencia ya que permiten analizar el comportamiento dinámico del sistema ante perturbaciones.

La determinación de los parámetros eléctricos de generadores permite validar los datos que proporciona el fabricante. En algunos casos, inclusive, esta información no se tiene disponible por lo cual se requiere implementar métodos de prueba para su obtención. Un criterio que a menudo se utiliza es duplicar los parámetros de máquinas con las mismas características, lo cual no siempre es aceptable.

Otro aspecto relevante que hace necesaria la determinación de los parámetros es que después de la instalación y durante la operación normal, los elementos magnéticos y eléctricos del generador síncrono sufren deterioros, lo que requiere de algún tipo de reparación. Como es obvio que la reparación puede cambiar el valor de los parámetros, surge la necesidad de actualizar el valor de los mismos.

Un motivo más que hace necesaria la determinación de los parámetros se debe a la necesidad de hacer cambios en la operación de un generador síncrono. Un caso posible, por ejemplo, es el cambio de frecuencia de operación de 50 a 60 Hz.

La determinación de los parámetros eléctricos del generador síncrono a partir de pruebas experimentales requiere de herramientas tomadas de la teoría de identificación y

estimación. El objetivo es encontrar un modelo, el más sencillo posible, que permita reproducir el comportamiento, transitorio y en estado permanente, del generador síncrono.

El trabajo de tesis se desarrolla considerando un modelo de segundo orden para la máquina síncrona y permite distinguir la necesidad de considerar modelos de orden mayor que dos, pues se ha observado en las pruebas experimentales un término que decae muy rápido. Esto requiere, a su vez, de la implementación de otros métodos de prueba.

### 1.1 ANTECEDENTES.

El concepto de "reactancia de corto circuito" apareció por 1920 y se fundamentaba en el principio de los enlaces de flujo constantes [17, 40]. A partir de esta idea Park y Robertson desarrollaron la idea de diversas reactancias en la máquina síncrona, así como los conceptos de componentes transitorias y subtransitorias en las corrientes, voltajes y flujos asociados a un cambio repentino en la red eléctrica a la que se encuentra conectado el generador. En 1928 Park amplió los conceptos de eje directo y eje en cuadratura al desarrollar la transformación de cantidades de fase a valores en los ejes directo y cuadratura [29, 32].

En 1931 Kilgore publicó algunos factores a ser considerados en el cálculo de las reactancias de la máquina síncrona en base a la geometría y propiedades físicas del rotor y el estator. También en 1931, Wright formalizó mediante procedimientos de prueba la determinación de varias cantidades de la máquina síncrona en estado transitorio y subtransitorio.

Antes de 1960 los estudios de estabilidad consideraban sólo la primera oscilación. En la década de los 60's el amortiguamiento de las oscilaciones creó la necesidad de estudiar los efectos de los circuitos amortiguadores de la máquina.

Después de 1960 el considerable avance logrado en los sistemas computacionales permitió el análisis de sistemas de potencia mucho mayores y el impacto del sistema de excitación y los controles en la estabilidad.

Los datos para el análisis de estabilidad se obtenían de registros de pruebas de corto circuito. En forma alterna la prueba de incremento de voltaje en terminales del estator al aplicar corriente directa en forma repentina al campo de la máquina síncrona a velocidad nominal y sin carga proporcionaba alguna información adicional. Los datos disponibles involucraban solo al eje directo, y no se tenía información sobre el eje en cuadratura.

Los estudios de estabilidad en la actualidad requieren representar adecuadamente el eje en cuadratura, así como la obtención de los valores de los parámetros correspondientes. Se sabe que la reactancia síncrona del eje en cuadratura ( $X_q$ ) se relaciona con el ángulo interno de la máquina y afecta principalmente el ángulo inicial.

Es preciso mencionar que las componentes armónicas de las corrientes de amortiguamiento provocan que se tengan trayectorias diferentes en los circuitos equivalentes. Esto hace necesario dos circuitos equivalentes en el cuerpo del rotor para los ejes  $d$  y  $q$ , por lo tanto se requiere información adicional de dos constantes de tiempo y cuatro inductancias.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 1.2 OBJETIVO DE LA TESIS.

El propósito del trabajo de investigación es establecer una metodología confiable para la identificación de parámetros de generadores síncronos a partir de los registros de variables obtenidas mediante pruebas de rechazo de carga.

En el análisis de fenómenos transitorios en sistemas eléctricos de potencia existe la necesidad de implementar programas digitales para evaluar al comportamiento real del

sistema, donde la correcta simulación requiere de la aplicación de modelos matemáticos confiables y de fácil implementación. La obtención y validación de los modelos matemáticos se hace en forma experimental midiendo las variables eléctricas de interés. Para elegir un modelo y determinar los parámetros del modelo se deben contemplar las características propias de los sistemas reales para hacer las correcciones a las desviaciones que resulten al compararlas con el caso idealizado.

El proceso de identificación de parámetros requiere del desarrollo de herramientas para el procesamiento de la información de una manera confiable, rápida y amigable al usuario. También existe la necesidad de procedimientos de ajuste y validación de modelos que proporcionen índices de validez de los modelos y de sus parámetros.

### **1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS.**

El trabajo de tesis consta de seis capítulos y cuatro apéndices, conformados de la siguiente manera:

En el primer capítulo se plantea la situación para la realización de la presente investigación. Se describen algunos antecedentes históricos sobre los parámetros eléctricos de la máquina síncrona, metodología y problemática para su determinación. También se plantean los objetivos principales del trabajo.

En el segundo capítulo se presenta una descripción del modelo de la máquina síncrona, sus parámetros y se describen algunos procedimientos para determinar el valor de los mismos.

En el tercer capítulo se describe en forma detallada la prueba de rechazo de carga. Se indica el procedimiento para determinar el valor de los parámetros a partir de los registros de decremento de voltaje. Se analizan los términos de corrección debido a que las

condiciones ideales para la prueba no se cumplen. Se detalla la implementación experimental de la prueba de rechazo de carga y algunos aspectos de la instrumentación. También se muestran los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de rechazo de carga para la determinación de parámetros en los ejes directo y cuadratura de un generador síncrono así como algunos de los resultados obtenidos al aplicar las rutinas desarrolladas para el procesamiento de los registros experimentales.

En el cuarto capítulo se describen varias de metodologías para estimar el valor de los parámetros considerando un modelo de segundo orden. Se detallan los procedimientos utilizados en cada metodología y se realiza un análisis comparativo.

En el quinto capítulo se presenta el caso de estudio para la determinación de parámetros eléctricos mediante la prueba de rechazo de carga. Se muestra el procedimiento para la obtención de parámetros del eje directo y en cuadratura.

En el sexto capítulo se resumen las conclusiones del trabajo realizado y se recomiendan posibles actividades que pueden complementar la presente investigación. Finalmente, se detallan las principales aportaciones del presente trabajo de investigación.

En el Apéndice A se incluye una descripción del programa desarrollado para el procesamiento de la información y la obtención de resultados.

En el Apéndice B se desarrolla un modelo para el generador síncrono considerando los parámetros tradicionales que proporciona el fabricante. Este modelo se conoce como modelo de Shultz.

En el Apéndice C se obtienen las constantes de tiempo y las inductancias que caracterizan a las curvas de decremento de voltaje en el modelo de segundo orden.

Finalmente, en el Apéndice D se muestran algunos aspectos sobre saturación.

## CAPITULO 2

### MODELO Y PARAMETROS DEL GENERADOR SINCRONO

#### 2.1 INTRODUCCION.

El comportamiento dinámico de los sistemas de potencia puede ser afectado de manera significativa por las características de la máquina síncrona. El procedimiento más utilizado para estudiar dicho comportamiento consiste en la formulación matemática y simulación en computadora digital del fenómeno de interés. En los primeros estudios dinámicos el modelo matemático del generador consideraba enlaces de flujo constantes, utilizando solo la ecuación de oscilación del rotor y despreciando la dinámica eléctrica del generador. Esta formulación fue adecuada para estudios de primera oscilación del rotor. En la actualidad la evaluación de los SEP's requiere de una mejor representación del generador que incluya el transitorio eléctrico [33, 34].

Una modelación completa del generador síncrono requiere de información detallada de parámetros del generador. Las técnicas más empleadas utilizan los cálculos de diseño del fabricante y la prueba de corto circuito en las terminales del generador.

El problema de la determinación de los parámetros de máquinas síncronas va ligado inherentemente a la estructura del modelo matemático del generador. La estructura matemática define el orden del modelo y la relación entre las variables y coeficientes de las ecuaciones diferenciales. Los coeficientes de estas ecuaciones son los que se deben determinar experimentalmente. El número de parámetros a determinar depende del orden del modelo. El objetivo de un modelo es lograr la representación más fiel de los fenómenos reales con la formulación matemática más sencilla [38].

Para esto es necesario desarrollar procedimientos adecuados y pruebas experimentales de implementación sencilla, cuidando la integridad del generador.

## 2.2 MODELO DE LA MAQUINA SINCRONA.

La Figura 2.1 muestra una representación esquemática de la máquina síncrona:

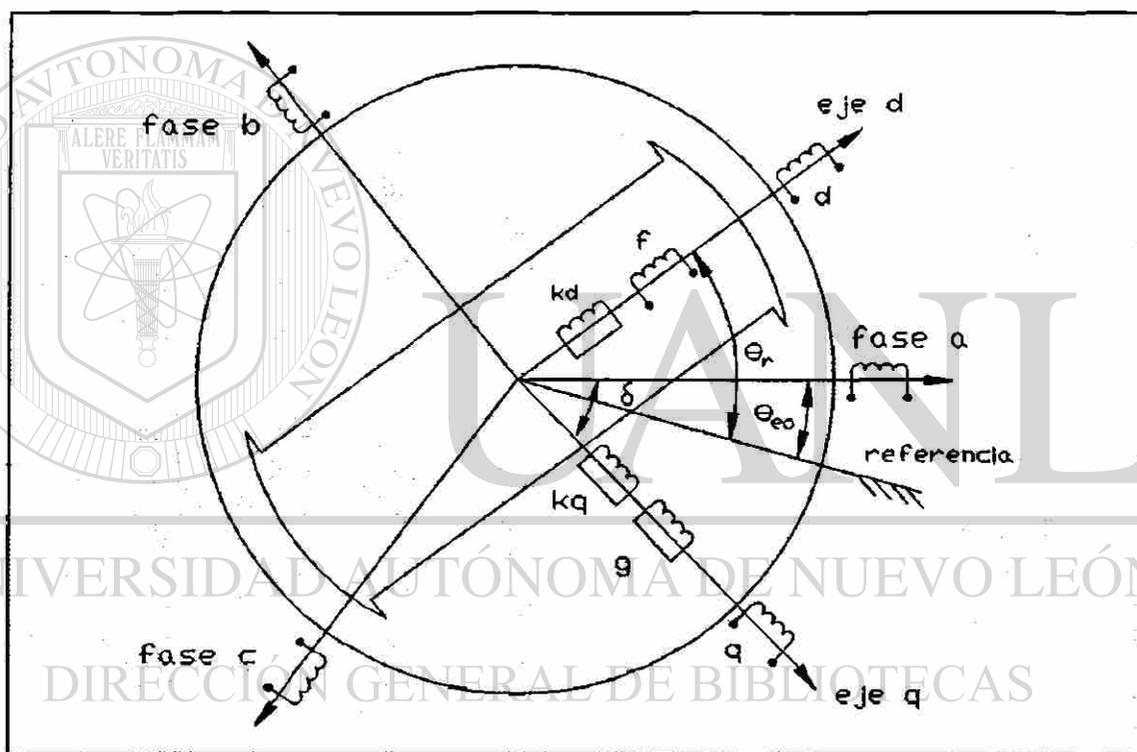


Fig. 2.1 Representación esquemática de la máquina síncrona.

Se tienen tres devanados sobre el estator, uno por cada fase, y cuatro en el rotor; circuito de campo y devanados amortiguadores sobre los ejes directo y cuadratura, además del devanado que representa las corrientes de Eddy en el rotor [18, 19, 35, 51].

El comportamiento de las variables eléctricas se define por las ecuaciones de voltaje y enlaces de flujo en los devanados. Las ecuaciones de voltaje en los devanados de fase se expresan en función de inductancias que varían con la posición del rotor. Aplicando la transformación de Park se pasa del marco de referencia estático y variante en el tiempo ( $abc$ ) a un marco giratorio e invariante en el tiempo ( $dqo$ ). El cambio de referencia provoca que las inductancias mutuas entre los circuitos de rotor y estator sean constantes pero de diferente valor. Sin embargo, con un sistema por unidad adecuado se expresan las ecuaciones y variables del generador con inductancias mutuas iguales. Con el cambio de referencia aparecen también los voltajes rotacionales que dependen de la velocidad. Las relaciones que rigen el comportamiento del generador se presentan en el circuito equivalente de la Figura 2.2.

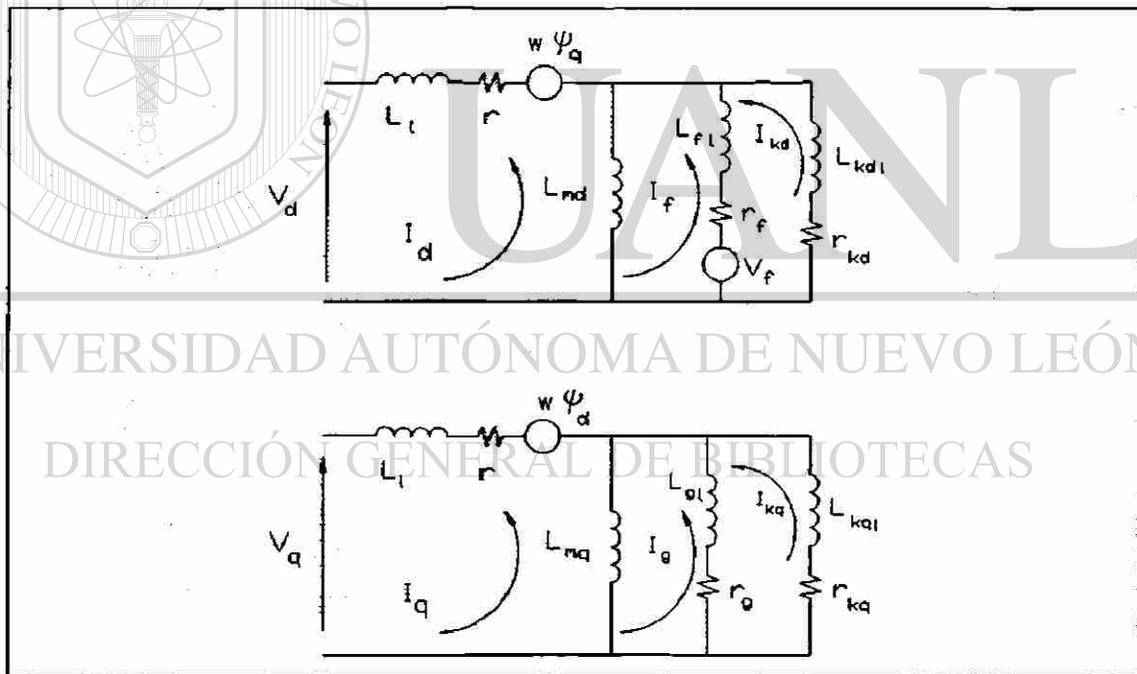


Fig. 2.2 Circuito equivalente del generador síncrono.

En condiciones estáticas balanceadas, las ecuaciones de voltaje y enlaces de flujo en los ejes  $d$  y  $q$  se expresan como:

$$V_d = -r I_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad (2.1)$$

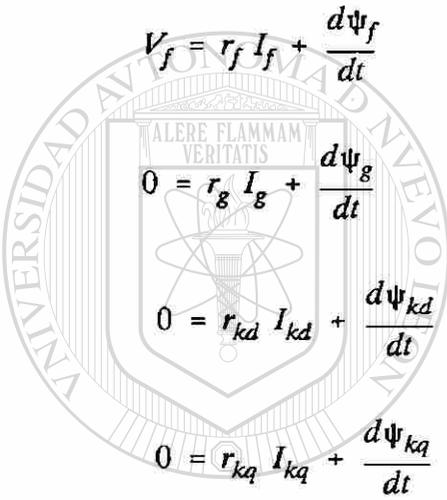
$$V_q = -r I_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \quad (2.2)$$

$$V_f = r_f I_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (2.3)$$

$$0 = r_g I_g + \frac{d\psi_g}{dt} \quad (2.4)$$

$$0 = r_{kd} I_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt} \quad (2.5)$$

$$0 = r_{kq} I_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (2.6)$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

$$\psi_d = - (L_{md} + L_l) I_d + L_{md} I_f + L_{md} I_{kd} \quad (2.7) \quad \text{®}$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$\psi_q = - (L_{mq} + L_l) I_q + L_{mq} I_g + L_{mq} I_{kq} \quad (2.8)$$

$$\psi_f = - L_{md} I_d + (L_{fl} + L_{md}) I_f + L_{md} I_{kd} \quad (2.9)$$

$$\psi_g = - L_{mq} I_q + (L_{gl} + L_{mq}) I_g + L_{mq} I_{kq} \quad (2.10)$$

$$\Psi_{kd} = -L_{md} I_d + L_{md} I_f + (L_{kdl} + L_{md}) I_{kd} \quad (2.11)$$

$$\Psi_{kq} = -L_{mq} I_q + L_{mq} I_g + (L_{kql} + L_{mq}) I_{kq} \quad (2.12)$$

Las ecuaciones de potencia activa y reactiva, y par eléctrico de la máquina son:

$$P = V_d I_d + V_q I_q \quad (2.13)$$

$$Q = V_d I_q - V_q I_d \quad (2.14)$$

$$T_e = \frac{3}{2} [L_{md}(-I_d + I_f + I_{kd})I_q + L_{mq}(-I_q + I_{kq} + I_g)I_d] \quad (2.15)$$

La ecuación de oscilación es:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H}(T_m - T_e) \quad (2.16)$$

Las ecuaciones de la máquina síncrona vistas anteriormente contienen términos de inductancias y resistencias que corresponden a los circuitos del rotor y el estator [1, 2, 4, 49, 50, 51]. Esos coeficientes se conocen como **parámetros básicos**.

Cuando ocurre un disturbio se inducen corrientes en los circuitos del rotor con diferente dinámica. Los parámetros que influyen en el decaimiento rápido de la corriente se conocen como **parámetros subtransitorios**, los que influyen en la región lenta se conocen como **parámetros transitorios**, y aquellos que lo hacen en forma sostenida se conocen como **parámetros síncronos**. Las inductancias y las constantes de tiempo que determinan la rapidez de decaimiento conforman los **parámetros estándar**, y especifican las características eléctricas de la máquina síncrona.

### 2.2.1 MODELO DE SEGUNDO ORDEN.

El estado del arte para las estructuras del modelo de segundo orden para los ejes  $d$  y  $q$  son adecuadas para representar la dinámica del flujo de la máquina en respuesta a las corrientes del estator [53].

Los refinamientos en el modelado de la máquina deben considerar técnicas para la representación de la saturación de manera de lograr un mejoramiento en la precisión del modelo [39, 48].

Los modelos que se usan en esta investigación consideran la saturación como una función del flujo subtransitorio total y distribuyen el efecto en proporción a las componentes subtransitorias del flujo en esos dos ejes. Esta representación es una mejora a otros modelos pero no considera la saturación en el eje  $q$ .

Un modelo más detallado requiere que se verifique la representación de la saturación. Esto puede lograrse a partir de mediciones en estado estable bajo determinadas condiciones de carga y excitación en la máquina, preferentemente en máquinas con parámetros ya identificados.

Los circuitos equivalentes para los ejes  $d$  y  $q$  más usados aplican un sistema por unidad, el cual permite representar con un mismo valor la inductancia entre los devanados del rotor y el estator.

En las Tablas 2.1 y 2.2 se muestra la expresión para las inductancias y constantes de tiempo de los ejes directo y en cuadratura, respectivamente.

TABLA 2.1  
PARAMETROS DE EJE DIRECTO

Nombre	Símbolo	Definición
Inductancia síncrona	$L_d$	$L_d = L_l + L_{md}$
Inductancia transitoria	$L_d'$	$L_l + \frac{L_{md} L_f}{L_f + L_{md}}$
Inductancia subtransitoria	$L_d''$	$L_l + \frac{L_{kd} L_{md} L_f}{L_{md} L_f + L_{md} L_{kd} + L_f L_{kd}}$
Constante de tiempo transitoria de circuito abierto	$T_{do}'$	$\frac{1}{r_f} \left\{ L_f + L_{md} \right\}$
Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto	$T_{do}''$	$\frac{1}{r_{kd}} \left\{ L_{kd} + \frac{L_{md} L_f}{L_{md} + L_f} \right\}$
Constante de tiempo transitoria de corto circuito	$T_d'$	$\frac{1}{r_f} \left\{ L_f + \frac{L_{md} L_l}{L_{md} + L_l} \right\}$
Constante de tiempo subtransitoria de corto circuito	$T_d''$	$\frac{1}{r_{kd}} \left\{ L_{kd} + \frac{L_{md} L_f L_l}{L_f L_{md} + L_f L_l + L_{md} L_l} \right\}$

TABLA 2.2  
PARAMETROS DE EJE EN CUADRATURA

Nombre	Símbolo	Definición
Inductancia síncrona	$L_q$	$L_q = L_l + L_{mq}$
Inductancia transitoria	$L_q'$	$L_l + \frac{L_{mq} L_{kqt}}{L_{kqt} + L_{mq}}$
Inductancia subtransitoria	$L_q''$	$L_l + \frac{L_{kqt} L_{mq} L_{gt}}{L_{mq} L_{kqt} + L_{mq} L_{gt} + L_{kqt} L_{gt}}$
Constante de tiempo transitoria de circuito abierto	$T_{qo}'$	$\frac{1}{r_{kq}} \{ L_{kqt} + L_{mq} \}$
Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto	$T_{qo}''$	$\frac{1}{r_g} \left\{ L_{gt} + \frac{L_{mq} L_{kqt}}{L_{mq} + L_{kqt}} \right\}$
Constante de tiempo transitoria de corto circuito	$T_q'$	$\frac{1}{r_{kq}} \left\{ L_{kqt} + \frac{L_{mq} L_l}{L_{mq} + L_l} \right\}$
Constante de tiempo subtransitoria de corto circuito	$T_q''$	$\frac{1}{r_g} \left\{ L_{gt} + \frac{L_{mq} L_{kqt} L_l}{L_{mq} L_l + L_{mq} L_{kqt} + L_{kqt} L_l} \right\}$

## 2.2.2 ESTRUCTURA DEL MODELO.

El problema de identificación que se trata de resolver es un problema de determinación de parámetros con una estructura del modelo definida. Esto se debe a que se ha hecho trabajo considerable sobre la modelación, de la máquina síncrona a raíz de las ecuaciones de Park y se han obtenido resultados favorables.

La simulación del comportamiento dinámico de generadores síncronos con rotor liso y de polos salientes, considerando efectos de amortiguamiento, se estudian en forma aproximada con un modelo de segundo orden. El modelo considera estructuras existentes que modelan la máquina síncrona en base a constantes de tiempo y reactancias tradicionales en los ejes  $d$  y  $q$ .

En la Figura 2.3 se muestra el diagrama de bloques de un modelo para el generador síncrono. En los bloques de la misma figura aparecen los parámetros que son objeto de estudio en este trabajo. En el Apéndice B se desarrollan las relaciones que se establecen en el diagrama de bloques de la Figura 2.3.

## 2.3 METODOS PARA LA DETERMINACION DE PARAMETROS.

Las pruebas que se hacen en fábrica a generadores síncronos para determinar el valor de sus parámetros proporcionan información que se usa para la verificación de los diseños así como en los modelos de la máquina síncrona.

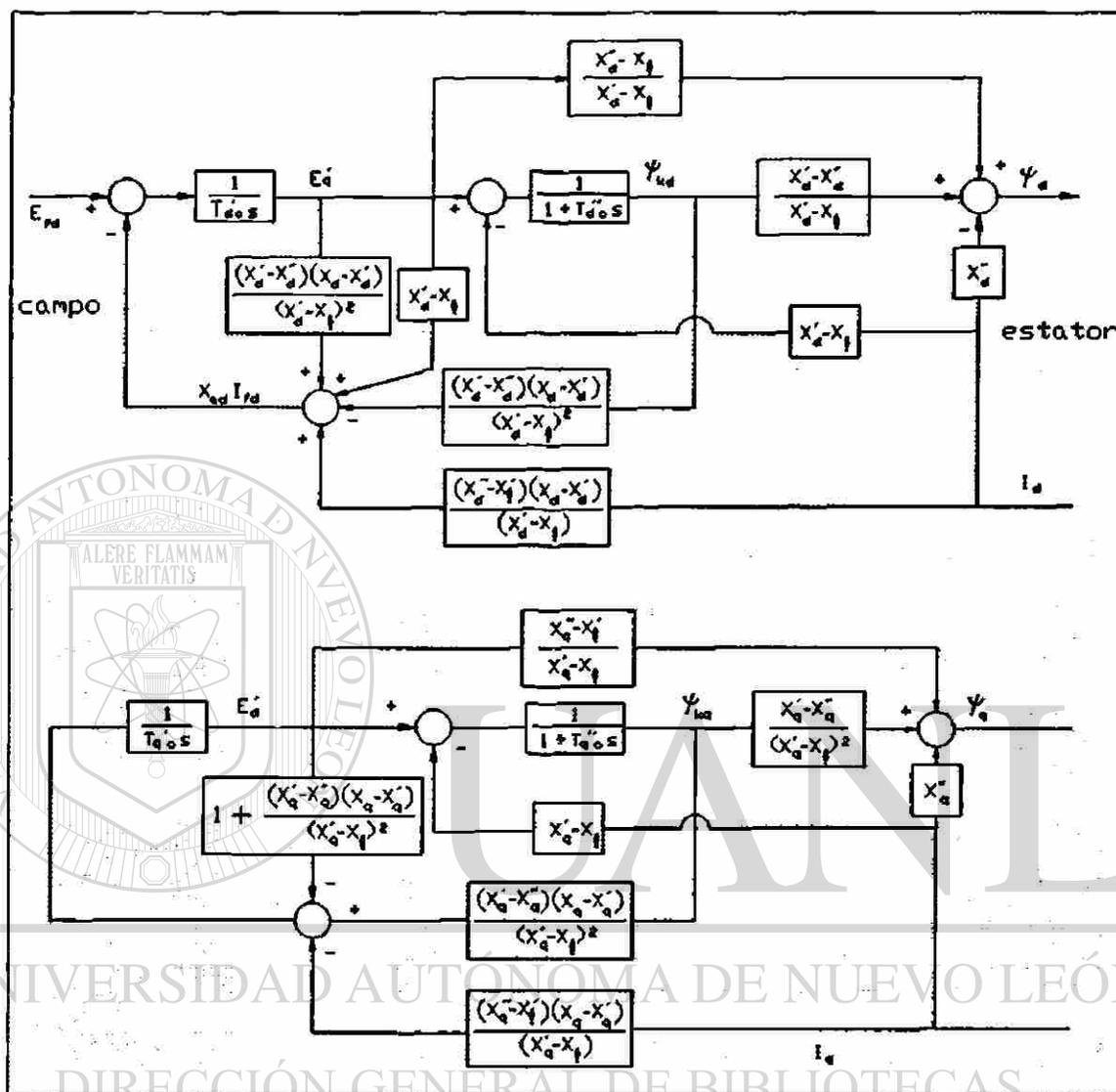


Fig. 2.3 Diagrama de bloques para el generador polos lisos.

Existen diversos métodos de prueba para obtener los parámetros de la máquina síncrona, algunos de ellos se indican a continuación:

**Diseño del fabricante.** Aquí se consideran las propiedades de los materiales

involucrados en la construcción de la máquina síncrona, para su adecuada ubicación y dimensionamiento con el objetivo de que la máquina proporcione la mayor potencia posible. Aquí se aplican los principios de conversión de la energía, teoría de circuitos y teoría electromagnética [28, 32].

Con esto es factible determinar el valor de los parámetros de resistencias, reactancias, inductancias y constantes de tiempo, y otras variables como potencia, voltaje, corriente, pérdidas en el cobre y pérdidas en el núcleo.

**Respuesta a la frecuencia a rotor parado.** En esta prueba la máquina está libre de conexiones en el estator y el campo. Aquí se mide la respuesta a la frecuencia entre los devanados del estator y el campo, con el rotor parado. Se aplica una señal de corriente entre dos terminales del estator, con el campo abierto o en corto circuito y se analiza la función de transferencia entre el voltaje y la corriente [2, 3, 36, 42, 44, 54].

**Respuesta a circuito abierto.** En esta prueba la unidad trabaja en circuito abierto a voltaje reducido. El campo es excitado a varias frecuencias y se mide la respuesta a la frecuencia en el voltaje del estator. La diferencia entre esta respuesta y la que se obtiene en la prueba a rotor parado proporciona información sobre los efectos rotacionales. La prueba se hace a diversos niveles de tensión para ver los efectos de saturación [2, 3, 44, 54].

**Prueba de cortocircuito.** En este caso se aplica un corto circuito en terminales de la máquina cuando ésta se encuentra operando a velocidad nominal y en circuito abierto. Las variables que se registran son las corrientes de armadura, los voltajes de armadura y una señal de referencia. A esos registros se les determina su envolvente y se identifican regiones conforme al tiempo de respuesta [17, 21, 31, 39].

Esta prueba sirve para identificar las características del circuito de campo al medir

las corrientes del rotor. Esta prueba no proporciona parámetros del eje  $q$  con precisión además de que expone a la máquina a esfuerzos eléctricos y mecánicos muy drásticos.

**Método de rechazo de carga.** Este método es recomendable porque es sencillo de implementar y no pone en riesgo la integridad de la máquina. En este procedimiento la máquina síncrona se lleva a determinadas condiciones de operación de tal manera que el comportamiento transitorio tras la apertura del interruptor se manifieste solo en el eje bajo estudio, ya sea el eje directo o el eje en cuadratura [16, 24, 37, 38, 39, 53]. El método se fundamenta en el estudio de la variación del voltaje en terminales bajo diversas condiciones de operación. Las variables a medir durante el transitorio son las corrientes del estator, el voltaje en terminales, la frecuencia, el voltaje de campo y la corriente de campo.

**Método basado en el elemento finito.** En este método se analiza y se determina gráficamente la distribución de los campos eléctricos y los campos magnéticos para el diseño de las máquinas eléctricas [43]. El método se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo y las condiciones de las regiones frontera y el conocimiento de las propiedades de los materiales tales como permitividad, permeabilidad y resistividad. Además se requiere construir la malla del equipo bajo estudio mediante elementos finitos, resolver numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales y mostrar en forma gráfica los resultados.

# CAPITULO 3

## PRUEBAS DE RECHAZO DE CARGA PARA LA DETERMINACION DE PARAMETROS

### 3.1 INTRODUCCION.

El comportamiento dinámico de los sistemas eléctricos de potencia es afectado seriamente por las características de la máquina síncrona. Esto crea la necesidad de contar con un conjunto de parámetros eléctricos confiable de cada generador síncrono conectado a la red eléctrica ya que dichos parámetros están incluidos en los modelos comúnmente usados en los actuales estudios de estabilidad.

Para la obtención de los parámetros eléctricos de generadores es necesario implementar métodos de prueba. Esto permite, además, validar los datos que proporciona el fabricante. En el capítulo uno se comentaron diversas técnicas para la determinación de los parámetros. Una de esas técnicas es la prueba de rechazo de carga.

---

Esta prueba se basa en el análisis del decremento de voltaje terminal del generador al interrumpir la circulación de corriente en sus terminales.

El método no presenta riesgos de daño al generador, es de fácil implementación, y la instrumentación necesaria es mínima.

Las condiciones de operación se escogen de tal forma que el fenómeno transitorio se manifieste en uno solo de los dos ejes, directo o en cuadratura. De este modo, el decremento de las variables depende exclusivamente de los parámetros del eje correspondiente. Los parámetros se determinan para una estructura de segundo orden.

En algunos generadores de rotor sólido se han reportado diferencias en la simulación del transitorio de la corriente de excitación [16], lo que sugiere la necesidad de una estructura de tercer orden [39]. Esta dificultad se resuelve ajustando los parámetros, obteniendo siempre un equivalente de segundo orden. La adopción de una estructura de segundo orden implica que los decrementos de las variables tengan una representación matemática que consiste de un término constante ( $V(\infty)$ ) más la suma de dos términos exponenciales con diferentes constantes de tiempo ( $\tau_1, \tau_2$ ). Esto es,

$$V(t) = V(\infty) + V'(t) + V''(t) \quad (3.1)$$

donde

$$V'(t) = A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (3.1a)$$

$$V''(t) = B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3.1b)$$

### 3.2 PARAMETROS DEL EJE DIRECTO.

Para determinar los parámetros de eje directo se lleva la máquina a una condición de operación en la cual la dinámica del proceso transitorio tenga lugar en este eje. Esto se consigue para una potencia activa cero, donde el flujo resultante del estator se encuentra alineado con el flujo del campo principal, por lo cual los encadenamientos de flujo y corrientes en el eje en cuadratura son cero.

Cuando el generador absorbe potencia reactiva el flujo del estator y del rotor actúan en la misma dirección, lo cual hace que el flujo resultante sea mayor al

correspondiente cuando la corriente en el estator es igual a cero (condición después del rechazo de carga). Esto significa que para una condición de operación sin carga y en subexcitación ( $P=0, Q<0$ ), al abrir el interruptor de máquina habrá un decremento del flujo resultante en el eje directo. La representación fasorial de las condiciones mencionadas se muestra en la Figura 3.1.

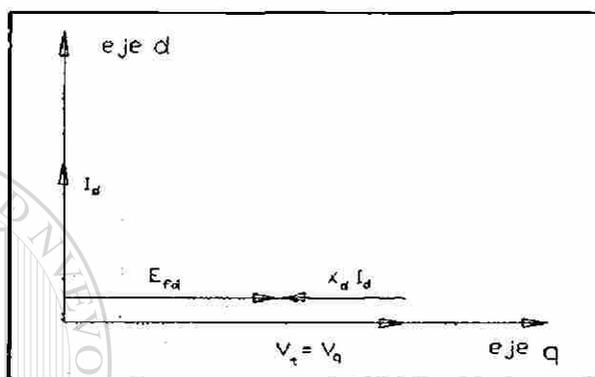


Fig. 3.1 Relación fasorial en la prueba de eje directo.

Las relaciones matemáticas antes de la apertura del interruptor son las siguientes:

$$V_t = E_{fd} + X_d I_d \quad (3.2)$$

donde

$$E_{fd} = \omega L_{md} \frac{V_f}{r_f} = X_{md} \frac{V_f}{r_f} \quad (3.3)$$

además

$$V_q = \omega \psi_d - r I_q \quad (3.4)$$

$$V_d = - \omega \psi_q - r I_d \quad (3.5)$$

donde

$$\psi_d = - L_d I_d + L_{md} I_f + L_{md} I_{kd} \quad (3.6)$$

$$\psi_f = - L_{md} I_d + (L_{fl} + L_{md}) I_f + L_{md} I_{kd} \quad (3.7)$$

$$\psi_q = L_q I_q - L_{mq} I_g - L_{mq} I_{kq} \quad (3.8)$$

Para las condiciones en estado permanente se tiene:

$$I_q = I_g = I_{kq} = I_{kd} = \psi_q = 0 \quad (3.9)$$

Si se considera que la resistencia es muy pequeña:

$$V_d = 0 \quad (3.10)$$

$$V_q = \omega \psi_d = X_{md} \frac{V_f}{r_f} + X_d I_d \quad (3.11)$$

La condición de operación para la prueba de eje directo permite que la potencia reactiva sea de cualquier valor, aunque se debe tener cuidado de no sobrepasar el límite por criterio de estabilidad. El valor de potencia reactiva recomendado es del 20 por ciento del valor nominal [37, 53].

Como la condición de potencia activa cero es difícil de lograr, se recomienda tomar precauciones para evitar la motorización del generador.

En el rechazo de carga, al hacer cero la corriente del estator, las corrientes del rotor reaccionan para compensar el cambio en el flujo del estator, que corresponden al

primer término de las expresiones de flujo (3.6, 3.7). El voltaje terminal del generador es proporcional al flujo del estator en el eje directo, la constante de proporcionalidad es la velocidad del generador que debe permanecer constante durante la prueba, por lo que tendrán la misma forma. La relación matemática de la dinámica del voltaje terminal se expresa por:

$$V(t) = V(\infty) + V'(t) + V''(t) \quad (3.1)$$

donde

$$V'(t) = A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (3.1a)$$

$$V''(t) = B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3.1b)$$

donde  $V(\infty)$  es el voltaje en estado permanente del generador,  $A_d$  y  $B_d$  son las constantes de proporcionalidad de las componentes de voltaje transitorio y subtransitorio. Las constantes de tiempo y proporcionalidad se determinan del análisis de registros del voltaje terminal del generador y con ellos se determinan los parámetros eléctricos de la máquina.

### 3.2.1 DINAMICA DEL TRANSITORIO EN EL EJE DIRECTO.

Debido a que los encadenamientos de flujo no pueden cambiar instantáneamente, la pérdida de la componente de flujo del estator ( $L_{md}I_d$ ) de (3.7), se compensa con el incremento de las corrientes del rotor de tal forma que los encadenamientos de flujo de campo, antes y después de abrir el interruptor sean constantes. La corriente de campo

$I_f$  y la corriente del devanado de amortiguamiento  $I_{kd}$  cambian instantáneamente y conforme transcurre el tiempo estas corrientes decrecen en valor hasta llegar a la condición de estado permanente. La variación de las corrientes en el tiempo es función de las constantes de tiempo de cada circuito. El valor final de las corrientes del rotor será igual al valor que tenían antes de la perturbación si el voltaje de campo se mantiene constante. Es decir:

$$I_{kd}(\infty) = I_{kd}(0) = 0 \quad (3.12)$$

$$I_f(\infty) = I_f(0) = \frac{V_f}{r_f} \quad (3.13)$$

Por lo que el voltaje terminal final será:

$$V_t(\infty) = X_{md} \frac{V_f}{r_f} \quad (3.14)$$

El voltaje terminal del generador también puede ser expresado en términos de sus componentes subtransitorias con la siguiente expresión [1, 3, 10, 49, 50]:

$$V_t = E_q'' + X_d'' I_d \quad (3.15)$$

donde el voltaje subtransitorio es función de las componentes de flujo del rotor

$$E_q'' = a_1 \psi_f + a_2 \psi_{kd} \quad (3.16)$$

para la condición antes de la apertura del interruptor se tiene:

$$V_t(0^-) = E_q''(0^-) + X_d'' I_d(0^-) \quad (3.17)$$

un instante después de la apertura del interruptor se tiene:

$$V_t(0^+) = E_q''(0^+) + X_d'' I_d(0^+) \quad (3.18)$$

donde

$$I_d(0^+) = 0 \quad E_q''(0^+) = E_q''(0^-)$$

Esto significa que en el instante mismo de la apertura del interruptor habrá un cambio brusco del voltaje terminal dado por la expresión:

$$\Delta V_t(0) = V_t(0^-) - V_t(0^+) = X_d'' I_d(0^-) \quad (3.19)$$

Lo anterior indica que el voltaje inicial pasará instantáneamente a un valor igual al voltaje subtransitorio y después el voltaje decrecerá exponencialmente, de acuerdo con (3.1), hasta alcanzar el valor final indicado por (3.14).

Una representación gráfica del comportamiento ideal del voltaje terminal se muestra en la Figura 3.2.

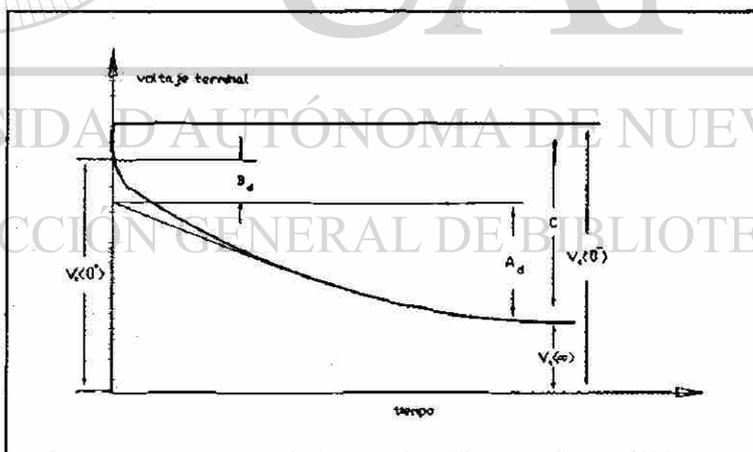


Fig. 3.2 Curva de decremento de voltaje en el eje directo.

### 3.2.2 DERIVACION DE LOS PARÁMETROS DEL EJE DIRECTO.

La respuesta del voltaje terminal después del rechazo de carga permite obtener los parámetros siguientes:

Reactancia síncrona de eje directo:

$$X_d = \frac{V_t(0^-) - V_t(\infty)}{I_d(0^-)} = \frac{C}{I_d(0^-)} \quad (3.20)$$

Reactancia transitoria de eje directo, considerando (3.20):

$$X_d' = \frac{V_t(0^-) - V_t(\infty) - A_d}{I_d(0^-)} = X_d - \frac{A_d}{I_d(0^-)} = \frac{C - A_d}{I_d(0^-)} \quad (3.21)$$

Reactancia subtransitoria de eje directo, considerando (3.21):

$$X_d'' = \frac{V_t(0^-) - V_t(\infty) - A_d - B_d}{I_d(0^-)} = \frac{C - A_d - B_d}{I_d(0^-)} \quad (3.22)$$

Reactancia mutua:

$$X_{md} = \frac{V_t(\infty)}{I_f} \quad (3.23)$$

Reactancia de campo:

$$X_f = \frac{X_{md}^2}{X_d - X_d'} \quad (3.24)$$

Resistencia de campo:

$$r_f = \frac{V_f}{I_f} \quad (3.25)$$

Constante de tiempo transitoria a circuito abierto:

$$T_{do}' = \frac{1}{r_f} \{L_{\beta} + L_{md}\}$$

Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto:

$$T_{do}'' = \frac{\tau_1 \tau_2}{T_{do}'} \quad (3.26)$$

Reactancia de dispersión [53]:

$$X_l = X_d' - \sqrt{\frac{(X_d - X_d')(X_d' - X_d'')}{(1 - \frac{T_{do}'}{\tau_1})(1 - \frac{T_{do}'}{\tau_2})}}$$

donde:

$V_i(0)$	voltaje inicial en terminales
$V_i(\infty)$	voltaje final en terminales
$V_f$	voltaje de campo
$I_f$	corriente de campo
$A_d, B_d$	coeficientes de la curva de decremento de voltaje
$\tau_1, \tau_2$	constantes de tiempo de la curva de decremento de voltaje
$I_d(0)$	corriente en el estator instantes antes de ocurrir el rechazo de carga

### 3.3 PARAMETROS DEL EJE EN CUADRATURA.

Los parámetros se obtienen utilizando una condición donde el comportamiento transitorio tiene lugar exclusivamente en el eje en cuadratura. Para esto se establecen las condiciones de carga donde la corriente del estator se encuentra totalmente sobre el eje en cuadratura. El diagrama fasorial para la condición de corriente de eje directo cero se muestra en la Figura 3.3.

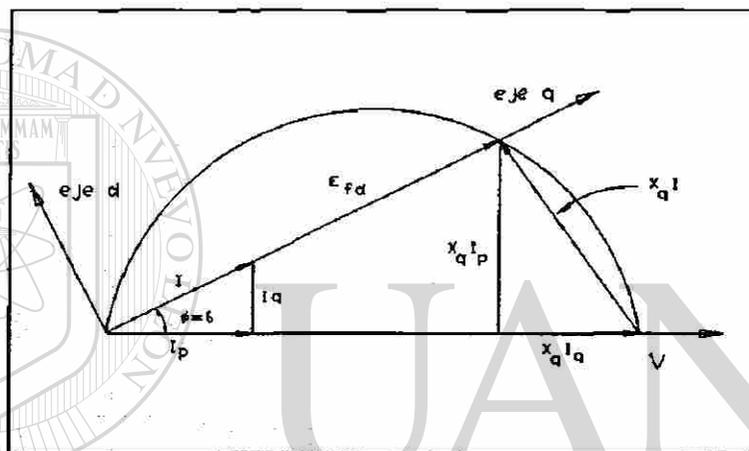


Fig. 3.3 Condición de operación para  $I_d=0$ .

Se observa que la condición  $I_d = 0$  se consigue cuando el ángulo entre el fasor de corriente y el voltaje terminal (factor de potencia) es igual al desplazamiento angular entre el eje en cuadratura y el voltaje terminal (ángulo de carga). Para el caso generador ( $P > 0$ ), el ángulo de carga es mayor que cero, lo que significa que el generador debe absorber reactivos (máquina subexcitada).

$$\cos \delta = \cos \phi = \frac{I_p}{I} = \frac{P}{VI} \quad (3.27)$$

Si se dispone de las lecturas de ángulo de carga, las condiciones buscadas se pueden conseguir cuando se cumpla (3.27).

Un procedimiento alternativo es el siguiente. De la Figura 3.3 se observa que la condición señalada se logra cuando los fasores de voltaje de campo ( $E_{fd}$ ) y la componente de voltaje en el eje directo ( $V_d = X_q I$ ) son ortogonales. El lugar geométrico del cruce de los dos fasores describe un semicírculo de diámetro igual al voltaje terminal ( $V$ ). Si se multiplican los fasores de voltaje de la Figura 3.3 por el término  $V/X_q$  y se gira la figura  $90^\circ$ , como se muestra en la Figura 3.4, se obtiene una gráfica que satisface las condiciones deseadas.

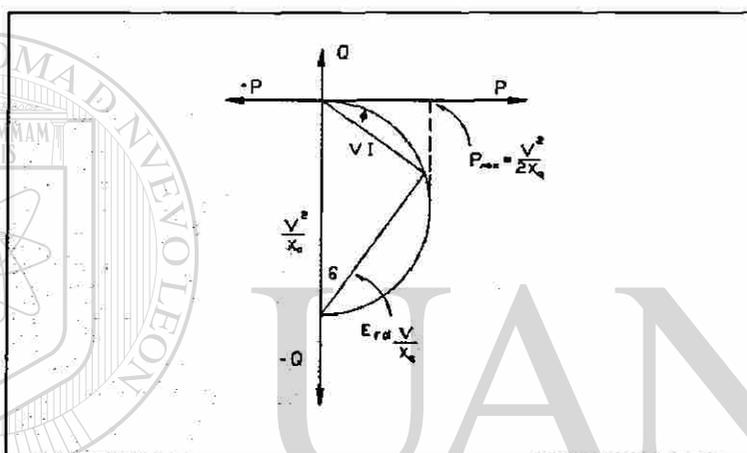


Fig. 3.4 Lugar geométrico de potencias.

Las proyecciones del fador  $V I$  sobre los ejes horizontal y vertical de la Figura 3.4 son las potencias activas y reactivas que cumplen con (3.27). El procedimiento consiste en trazar un semicírculo de diámetro igual a  $V^2/X_q$ , el cual se escala con una referencia de potencia y distancia.

Se observa que hay un límite máximo de potencia activa que corresponde a la mitad del diámetro del círculo. Para potencias menores al máximo existen dos valores probables de potencia reactiva.

Los valores de potencia activa y reactiva se eligen de tal forma que el rechazo de

potencia activa no sea tan severo y evitar se active la protección de sobrevelocidad. A su vez, la potencia reactiva no debe violar el límite por criterio de estabilidad. En este punto se tiene un compromiso ya que un valor menor de potencia activa hace que no se manifieste sensiblemente el decremento de voltaje, mientras que para un valor mayor de potencia activa se presenta un riesgo mayor en la aceleración de la máquina. La condición de operación para la prueba en el eje en cuadratura se verifica observando que no haya cambios en la corriente de campo cuando ocurra el rechazo de carga. Las Figuras 3.5a y 3.5b muestran gráficamente el comportamiento de la corriente de campo durante los rechazos de carga para el eje  $q$ , para determinar el punto de operación.

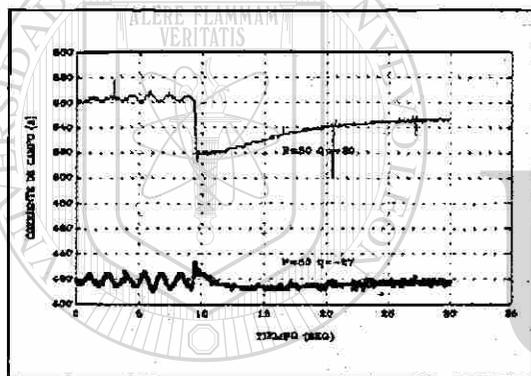


Fig. 3.5a Punto de operación para el eje  $q$ .

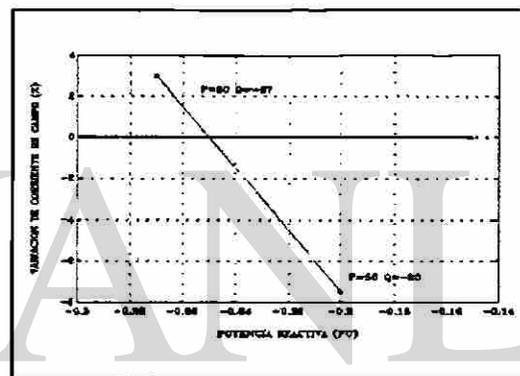


Fig. 3.5b Por ciento de variación de  $I_f$ .

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3.3.1 DINAMICA DEL TRANSITORIO EN EL EJE EN CUADRATURA.

Esta prueba se realiza sin activar el regulador automático de voltaje y la dinámica solo tiene lugar en el eje en cuadratura, todas las variables en el eje directo permanecerán constantes durante el transitorio. Lo anterior se cumple mientras no haya cambios notables en la velocidad del rotor ante el rechazo de carga, en caso contrario se deberán tomar las medidas correctivas apropiadas.

Durante el proceso transitorio las variables en el eje directo son:

$$I_d(t) = I_d(0) = I_d(\infty) = 0 \quad (3.28)$$

$$I_{kd}(t) = I_{kd}(0) = I_{kd}(\infty) = 0 \quad (3.29)$$

$$I_f(t) = I_f(0) = I_f(\infty) = \text{constante} \quad (3.30)$$

$$\Psi_d(t) = L_{md} I_f(t) = \text{constante} \quad (3.31)$$

La componente de voltaje en el eje en cuadratura es proporcional a la componente de flujo en el eje directo, de acuerdo a la expresión:

$$V_q(t) = \omega(t) \Psi_d(t) \quad (3.32)$$

Esta componente de voltaje será constante si la velocidad del rotor permanece sin cambio.

La dinámica de los encadenamientos de flujo del eje en cuadratura tendrá un comportamiento dinámico transitorio y subtransitorio. Para la condición inicial y final las corrientes en el rotor son iguales a cero, esto es:

$$I_g(0) = I_g(\infty) = 0 \quad (3.33)$$

$$I_{kq}(0) = I_{kq}(\infty) = 0 \quad (3.33)$$

además:

$$I_q(\infty) = 0 \quad (3.34)$$

Como todas las corrientes en el eje en cuadratura son igual a cero en estado permanente, los encadenamientos de flujo y el voltaje final en el eje directo también serán igual a cero:

$$\psi_q(\infty) = V_d(\infty) = 0 \quad (3.35)$$

de aquí que el voltaje terminal final sea igual a la componente de voltaje en eje de cuadratura:

$$V_q(\infty) = \omega(\infty) \psi_d(\infty) \quad (3.36)$$

$$V_d(\infty) = V_q(0) \frac{\omega(\infty)}{\omega(0)} \quad (3.37)$$

En el instante mismo de la apertura del interruptor, la corriente del estator  $I_q(0^+)$  se hace cero y como los encadenamientos de flujo no pueden cambiar instantáneamente, las corrientes del rotor en el eje q incrementan su valor para compensar el cambio en la corriente del estator. Al transcurrir el tiempo las corrientes del rotor disminuyen de valor, de acuerdo a sus constantes de tiempo, hasta llegar nuevamente a cero.

El cambio en las corrientes en el rotor se refleja en variaciones en los encadenamientos de flujo en el eje en cuadratura, según (3.8), y éstos a su vez influyen en la componente de voltaje en el eje directo. La variación del voltaje tiene un patrón similar al decremento de voltaje mostrado en (3.1), pero con un valor final igual a cero.

$$V_d(t) = A_q e^{-\frac{t}{\tau_1}} + B_q e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3.38)$$

En el instante del rechazo de carga habrá un cambio brusco de la componente del voltaje en eje directo de acuerdo al principio indicado para el caso de la prueba en el eje directo [37]. El cambio de voltaje en  $t = 0$  es:

$$\Delta V_d(0) = V_d(0^-) - V_d(0^+) = X_q'' I_q(0^-) \quad (3.39)$$

Una representación gráfica del comportamiento ideal del voltaje en terminales debido al rechazo de carga se muestra en la Figura 3.6.

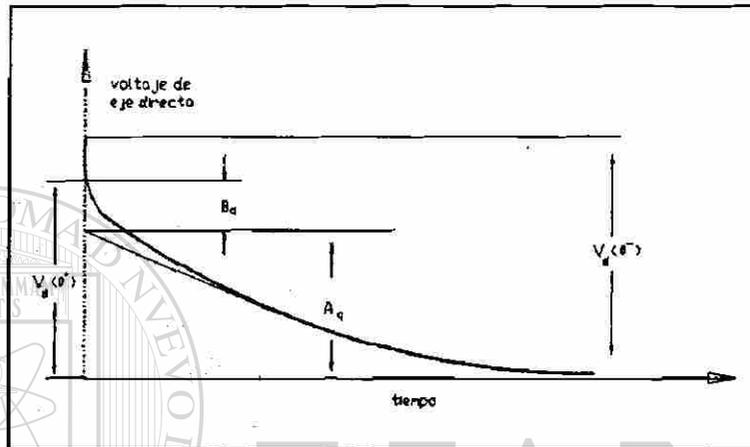


Fig. 3.6 Curva de decremento de voltaje para el eje en cuadratura.

El decremento de voltaje en el eje directo puede representarse también por sus componentes transitoria y subtransitoria como:

$$V_d(t) = V_d'(t) + V_d''(t) \quad (3.40)$$

donde

$$V_d'(t) = A_q e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (3.41)$$

es la componente transitoria de voltaje en el eje directo, y

$$V_d''(t) = B_q e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3.42)$$

es la componente subtransitoria de voltaje en el eje directo.

La componente de voltaje en el eje directo se obtiene con la expresión:

$$V_d(t) = \sqrt{V_t(t)^2 - V_q(0^-)^2} \quad (3.43)$$

El voltaje  $V_q(0^-)$  se obtiene de la característica en vacío para la corriente de campo inicial.

La componente transitoria del voltaje en el eje directo se obtiene de (3.40) y (3.43) como:

$$V_d'(t) = \sqrt{V_t(t)^2 - V_q(0^-)^2} - V_d''(t) \quad (3.44)$$

### 3.3.2 DERIVACION DE LOS PARAMETROS DEL EJE EN CUADRATURA.

El rechazo de carga en el eje en cuadratura permite obtener:

Reactancia síncrona de eje en cuadratura:

$$X_q = \frac{\sqrt{V_t(0^-)^2 - V_t(\infty)^2}}{I_q(0^-)} \quad (3.45)$$

Reactancia transitoria de eje en cuadratura:

$$X_q' = \frac{\sqrt{V_t(0^-)^2 - V_t(\infty)^2 - A_q}}{I_q(0^-)} = X_q - \frac{A_q}{I_q(0^-)} \quad (3.46)$$

Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura:

$$X_q'' = \frac{\sqrt{V_t(0^-)^2 - V_t(\infty)^2} - A_q - B_q}{I_q(0^-)} = X_q' - \frac{B_q}{I_q(0^-)} \quad (3.47)$$

Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto [53]:

$$T_{qo}'' = \frac{\tau_1 + \tau_2 - \sqrt{(\tau_1 + \tau_2)^2 - 4\tau_1\tau_2 \left[ 1 + \frac{(X_q - X_q')(X_q' - X_q'')}{(X_q' - X_l)^2} \right]}}{2 \left[ 1 + \frac{(X_d - X_d')(X_d' - X_d'')}{(X_q'' - X_l)^2} \right]} \quad (3.48)$$

Constante de tiempo transitoria de circuito abierto [53]:

$$T_{qo}' = \frac{\left[ 1 + \frac{(X_q - X_q')(X_q' - X_q'')}{(X_q' - X_l)^2} \right] T_{qo}'' \tau_2 - \tau_2^2}{T_{qo}'' - \tau_2} \quad (3.49)$$

donde:

$V_t(\infty)$	es el voltaje final en terminales
$V_t(0^-)$	es el voltaje inicial en terminales
$A_q, B_q$	coeficientes de la curva de decremento de voltaje
$\tau_1, \tau_2$	constantes de tiempo de la curva de decremento de voltaje
$I_q(0^-)$	corriente en el estator instantes antes de ocurrir el rechazo de carga

### 3.4 INSTRUMENTACION Y REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES.

Uno de los objetivos de la implementación experimental es especificar las características técnicas para el registro dinámico de variables durante las oscilaciones electromecánicas del sistema eléctrico de potencia. Este objetivo se logra mediante la realización de simulaciones digitales previas [53].

Para la prueba de rechazo de carga se recomienda lo siguiente:

- 1.- Mantener el voltaje de campo constante, conectando el sistema de excitación en manual a otra fuente de voltaje.
- 2.- Desconectar los servicios propios del generador bajo prueba.
- 3.- Evitar interferencia electromagnética en el registro de las señales.
- 4.- Instalar transductores para la medición de la potencia activa, de la potencia reactiva, del voltaje en terminales y de la corriente.
- 5.- Disponer de medición de voltaje y corriente de los transformadores de potencial y de los transformadores de corriente.
- 6.- Calibrar los instrumentos de medición y registro.
- 7.- Almacenar las variables a registrar en una computadora personal.

Una de las consideraciones importantes para la obtención de parámetros mediante pruebas experimentales involucra las características de los equipos de medición y registro.

En este sentido, el registrador debe ser versátil en cuanto a hardware y software basado en tarjetas convertidoras A/D y PC-compatibles. Se debe tener presente que las variables de interés poseen constantes de tiempo rápidas que hacen difícil su registro.

El sistema de registro y medición [38] está constituido por:

- \* Tarjeta convertidora A/D
- \* Computadora compatible PC-IBM
- \* Transductores analógicos
- \* Acondicionadores de señales

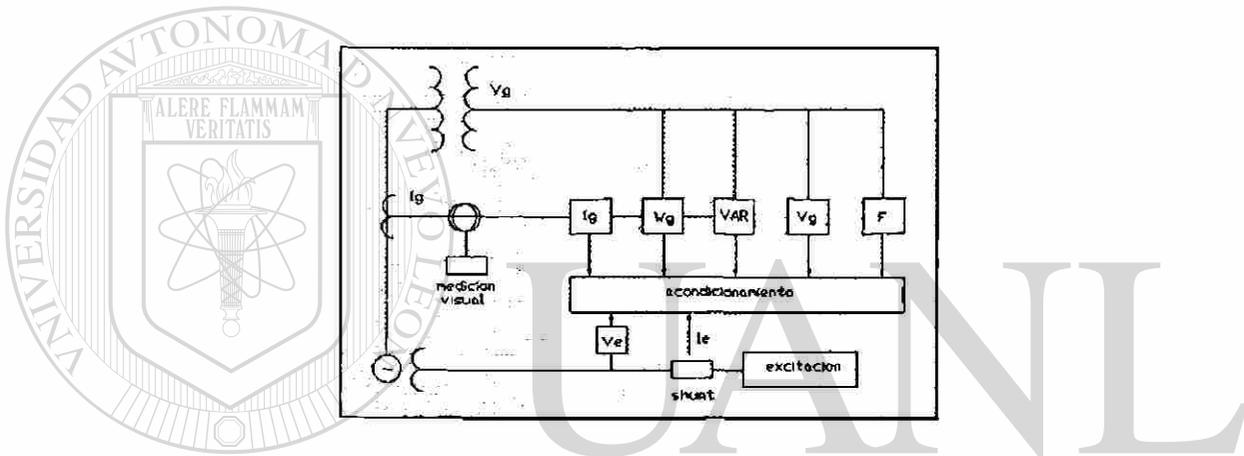


Fig. 3.7 Diagrama unifilar de conexiones.

La Tabla 3.1 indica las características de la instrumentación para la prueba. Las variables que se registran en la computadora personal considerando el esquema mostrado en la Figura 3.7, son:

- \* Voltaje de fase ( $V_g$ )
- \* Corrientes de fase ( $I_g$ )
- \* Voltaje de campo ( $V_e$ )
- \* Corriente de campo ( $I_e$ )
- \* Potencia activa ( $W_g$ )
- \* Potencia reactiva ( $VAR$ )
- \* Frecuencia ( $F$ )

Los valores registrados de las variables anteriores se almacenan en una

computadora personal. Las Figuras 3.10 a 3.27 de la sección 3.6 muestran una representación gráfica de los datos experimentales obtenidos en las pruebas de rechazo de carga para el eje directo y para el eje en cuadratura para un generador síncrono de una planta de generación. El intervalo de tiempo mostrado solo es una parte del evento total. Ante la gran cantidad de información es obvia la necesidad de contar con herramientas de computación digital para el procesamiento de la información y la aplicación de técnicas de estimación de parámetros.

TABLA 3.1

## INSTRUMENTACION NECESARIA PARA LA PRUEBA

#	Variable	Punto de medición	Transductor y características
1	Voltaje del generador	Secundario del TP del generador	0-150VCA/0-1mACD tiempo de respuesta al 99% < 0.4s
2	Voltaje del generador	Secundario del TP del generador	0-115VCA/0-6.3VCA tiempo de respuesta despreciable
3	Corriente de generador	Secundario del TC del generador	0-5ACA/0-1mACD tiempo de respuesta al 99% < 0.4s
4	Corriente de generador	Secundario del TC del generador	Amperímetro de gancho digital
5	Potencia activa	Secundarios del TC y TP del generador	0-1000W/0-±1mACD tiempo de respuesta al 99% < 0.4s
6	Potencia reactiva	Secundarios del TC y TP del generador	0-1000VAR/0-±1mACD mismo tiempo de respuesta
7	Voltaje de excitación	Terminales del campo	Divisor resistivo 0-1000VCD/ 0-10VCD
8	Corriente de campo	Terminales del shunt del campo	Shunt de CD 0-1000A/ 0-100mV
9	Frecuencia	Secundario del TP del generador	55-65Hz/±1mA tiempo de respuesta al 99% < 0.4s

### 3.5 FACTORES DE CORRECCION.

Debido a la naturaleza de la prueba de rechazo de carga no es posible lograr las condiciones ideales para su realización. Sin embargo, se pueden alcanzar situaciones muy próximas a las ideales. Para estos casos se deben utilizar algunos factores de corrección sobre los valores medidos.

#### 3.5.1 CORRECCION POR VELOCIDAD.

En un caso real el rechazo de carga puede causar un cambio apreciable en la velocidad de la máquina. Esto afecta la forma del voltaje en terminales, resultando necesario corregir la curva para incluir las variaciones de velocidad. La Figura 3.7 muestra el efecto de esta corrección en la curva de decremento de voltaje para la prueba de rechazo de carga en el eje en cuadratura. El comportamiento mostrado en la gráfica de la Figura 3.8 indican que, evidentemente, es necesario tener un mejor control de la velocidad. Estos resultados se obtienen aplicando la rutina para el cálculo de frecuencia en la opción de transductores digitales ubicados en el programa que se describe en el Apéndice A.

La corrección por velocidad se hace usando la expresión siguiente:

$$V_{ic} = V_{tr} \frac{f_o}{f_r} \quad (3.50)$$

donde

- $V_{ic}$  voltaje en terminales corregido
- $V_{tr}$  voltaje en terminales registrado
- $f_r, f_o$  frecuencia registrada y la frecuencia nominal, respectivamente

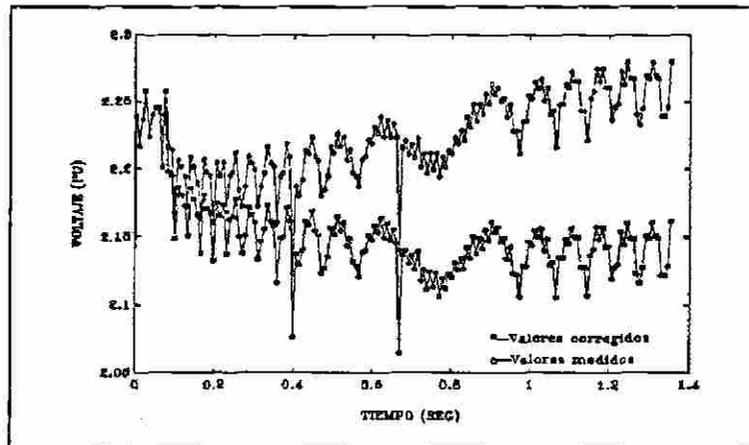


Fig. 3.8 Corrección de voltaje por velocidad.

### 3.5.2 CORRECCION POR VARIACION EN EL VOLTAJE DE CAMPO.

En muchas pruebas se observa que la corriente de campo inicial y final no son iguales, por lo que existe una componente de la corriente de campo adicional que tiene un efecto en el voltaje en terminales. Si se analiza el comportamiento del voltaje de campo se observa un cambio de valor durante el fenómeno transitorio. Aunque se supone que con el regulador en manual el voltaje de campo debe permanecer constante, en pruebas reales se ha observado variación.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para corregir el efecto anterior se determina la diferencia entre la corriente inicial y la corriente final en estado estable. El cambio en la corriente se obtiene de la variación del voltaje en terminales utilizando la parte lineal de la característica de saturación en vacío.

En la determinación de parámetros el problema mayor se tiene en la ubicación del eje  $q$ . El procedimiento usual es la estimación de la condición de operación donde la corriente de armadura solo tenga componente en el eje  $q$ . El cambio observado en el

rechazo de carga puede considerarse pequeño si se compara con el valor medido en la condición de predisturbio.

### 3.5.3 SATURACION.

En forma conceptual la saturación en un generador síncrono es el fenómeno que se presenta cuando, al excitar el devanado de campo, un incremento en el flujo magnético no se traduce en un incremento proporcional en el voltaje terminal del estator debido al incremento de la reluctancia en la trayectoria del flujo magnético. En realidad la saturación es función de varias variables y afecta a todos los parámetros [22]. El problema es complejo y propenso a polémica, de hecho existen en el mundo diversas técnicas para considerar el efecto de la saturación en los parámetros de los modelos del generador síncrono [42]. En el Apéndice D se describen varias metodologías para el problema de saturación y como afecta en la sensibilidad de los parámetros.

La representación de saturación magnética en estudios de estabilidad [2] considera que:

- a) Los valores de las inductancias de dispersión son independientes de la saturación. En cambio las inductancias mutuas pueden ser afectadas por la saturación.
- b) Los flujos de dispersión son pequeños y su trayectoria coincide con el flujo principal. El flujo de dispersión en el entrehierro determina la saturación.
- c) No hay acoplamiento entre los ejes  $d$  y  $q$ .

La Figura 3.9 muestra la curva característica de un generador síncrono de 346 MVA, 20 kV y 60 Hz que es objeto de estudio en el Apéndice D.

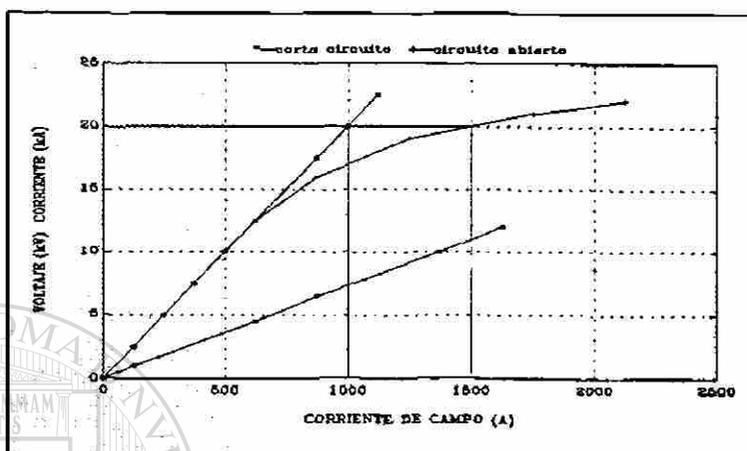


Fig. 3.9 Curva característica de un generador síncrono.

La curva característica se obtiene mediante las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito. Los resultados de esta prueba permiten hacer las correcciones en el voltaje terminal por variaciones en la corriente de campo durante las pruebas de rechazo de carga correspondientes al eje en cuadratura.

En la curva característica de la Figura 3.9 se aprecian intersecciones de rectas paralelas con el eje horizontal y el eje vertical. Estas intersecciones son útiles para calcular la reactancia síncrona de eje directo y la relación de corto circuito.

En las Tablas 3.2 y 3.3 se muestra la variación del valor de los parámetros cuando existe saturación en el eje en cuadratura y en el eje directo, respectivamente [3].

TABLA 3.2  
CAMBIO EN LOS PARAMETROS DEL EJE D  
POR SATURACION EN  $L_{md}$

Nombre	Símbolo	Cambio
Inductancia síncrona	$L_d$	$\Delta L_{md}$
Inductancia transitoria	$L_d'$	$\left( \frac{L_g}{L_{fo} + L_{mdo}} \right)^2 \Delta L_{md}$
Inductancia subtransitoria	$L_d''$	$\left( \frac{L_{do}'' - L_l}{L_{mdo}} \right)^2 \Delta L_{md}$
Constante de tiempo transitoria de circuito abierto	$T_{do}'$	$\left( \frac{1}{f_f} \right) \Delta L_{md}$
Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto	$T_{do}''$	$\left( \frac{1}{r_{td}} \frac{\partial L_d'}{\partial L_{md}} \right) \Delta L_{md}$

TABLA 3.3  
CAMBIO EN LOS PARAMETROS DEL EJE Q  
POR SATURACION EN  $L_{mq}$

Nombre	Símbolo	Cambio
Inductancia sincrona	$L_q$	$\Delta L_{mq}$
Inductancia transitoria	$L_q'$	$\left(\frac{L_{kq}}{L_{kq0}}\right)^2 \Delta L_{mq}$
Inductancia subtransitoria	$L_q''$	$\left(\frac{L_{q0}'' - L_I}{L_{mq0}}\right)^2 \Delta L_{mq}$
Constante de tiempo transitoria de circuito abierto	$T_{q0}'$	$\left(\frac{1}{r_{sq}}\right) \Delta L_{mq}$
Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto	$T_{q0}''$	$\left(\frac{1}{r_s} \frac{\partial L_q'}{\partial L_{mq}}\right) \Delta L_{mq}$

### 3.6 REGISTROS REALES DE LAS PRUEBAS DE RECHAZO DE CARGA.

Las Figuras 3.10 a 3.27 muestran gráficamente los registros de pruebas experimentales de rechazo de carga. Puede observarse en algunas de ellas la presencia de ruido y distorsión.

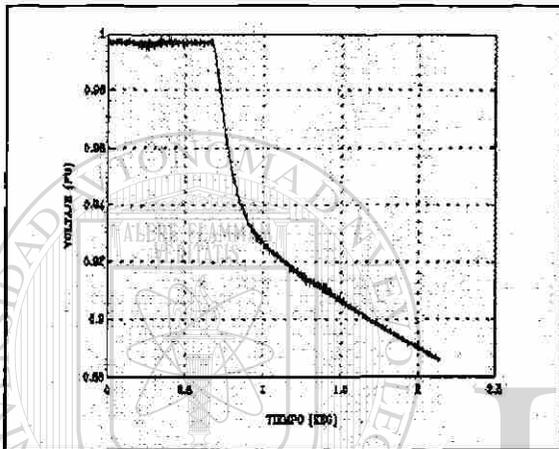


Fig. 3.10 Voltaje eficaz (eje d).

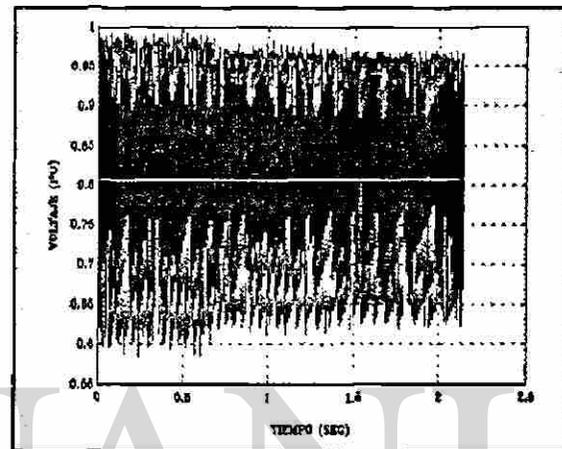


Fig. 3.11 Voltaje de campo (eje d).

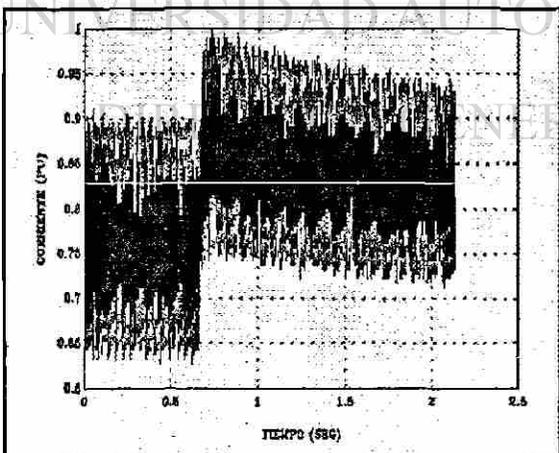


Fig. 3.12 Corriente de campo (eje d).

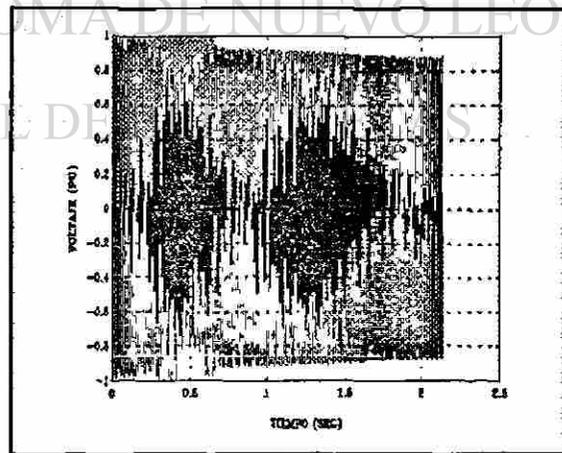


Fig. 3.13 Voltaje instantáneo  $V_{ab}$  (eje d).

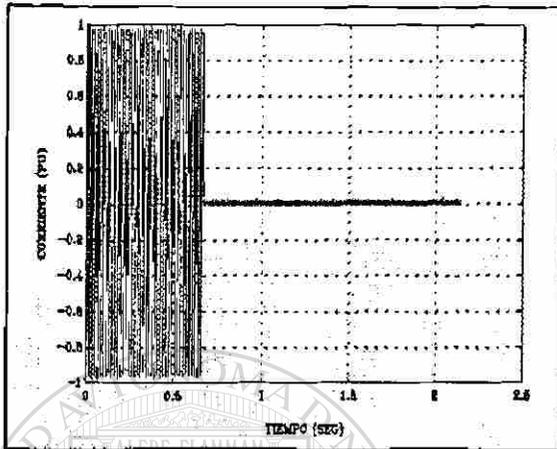


Fig. 3.14 Corriente instantánea  $I_a$  (eje d).

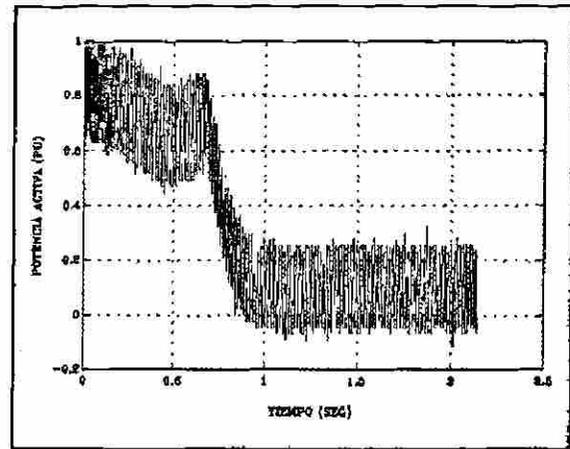


Fig. 3.15 Potencia activa (eje d).

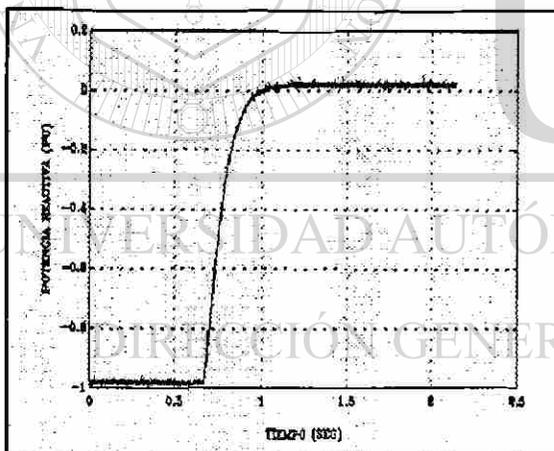


Fig. 3.16 Potencia reactiva (eje d).

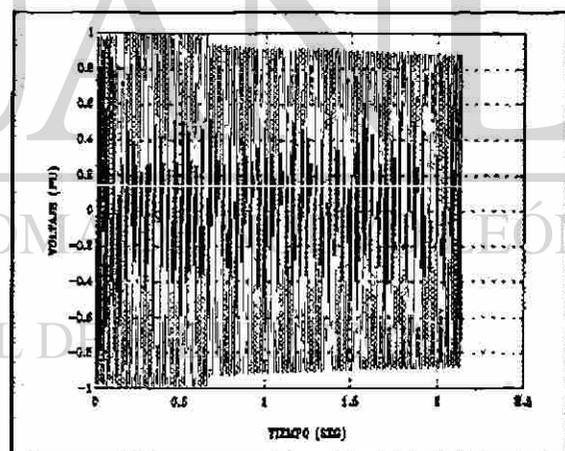


Fig. 3.17 Voltaje instantáneo  $V_{bc}$  (eje d).

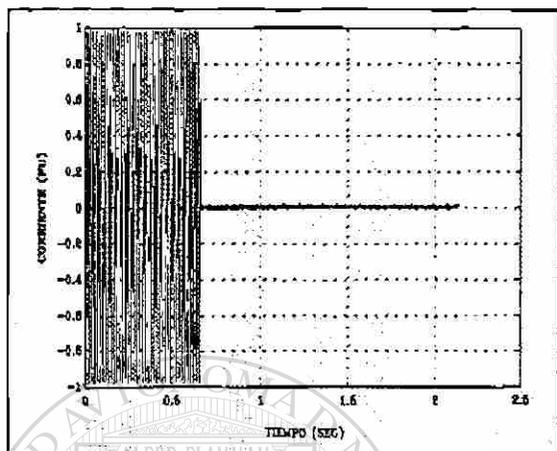


Fig. 3.18 Corriente instantánea  $I_c$  (eje d).

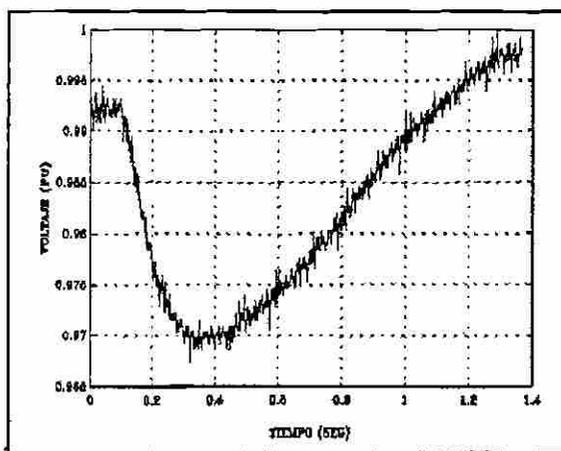


Fig. 3.19 Voltaje eficaz (eje q).

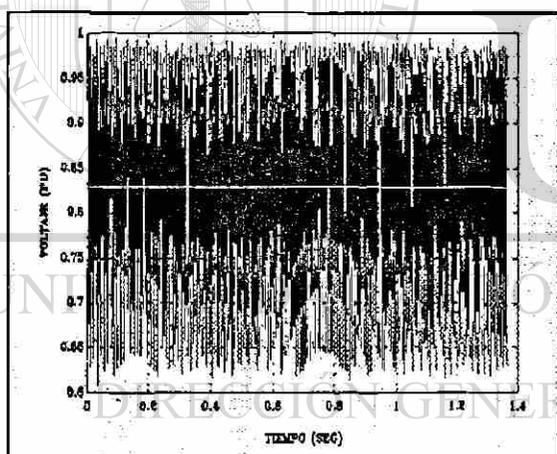


Fig. 3.20 Voltaje de campo (eje q).

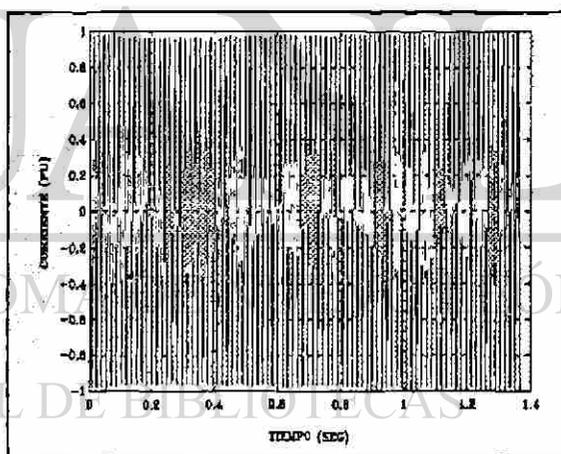


Fig. 3.21 Corriente de campo (eje q).

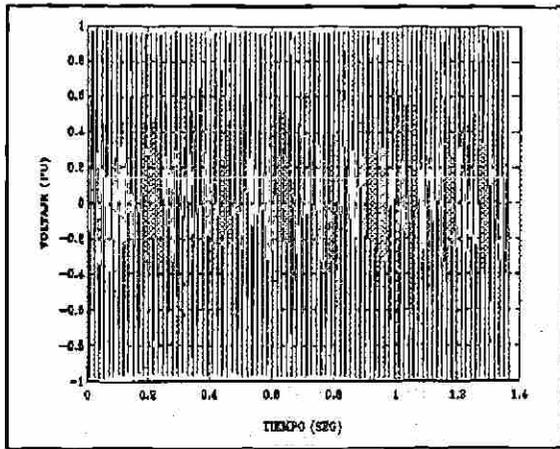


Fig. 3.22 Voltaje instantáneo  $V_{ab}$  (eje  $q$ ).

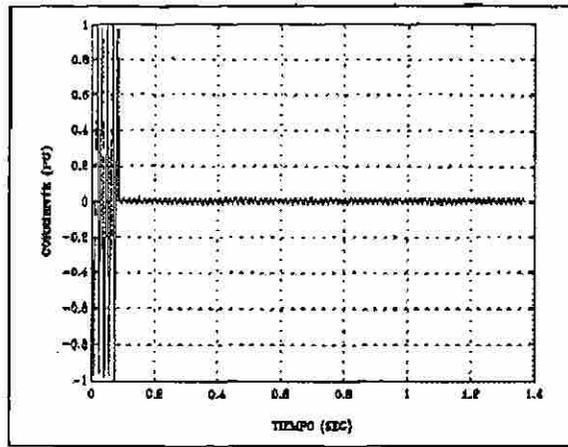


Fig. 3.23 Corriente instantánea  $I_a$  (eje  $q$ ).

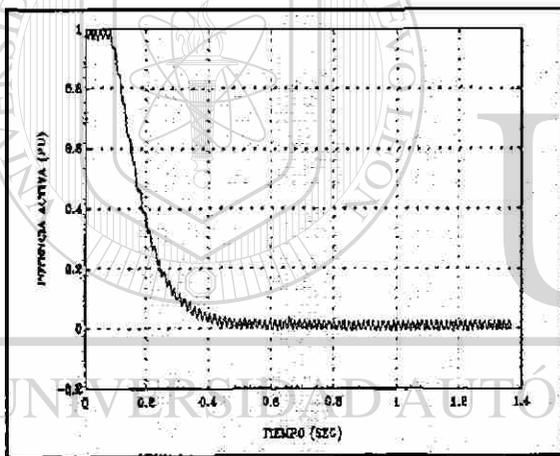


Fig. 3.24 Potencia activa (eje  $q$ ).

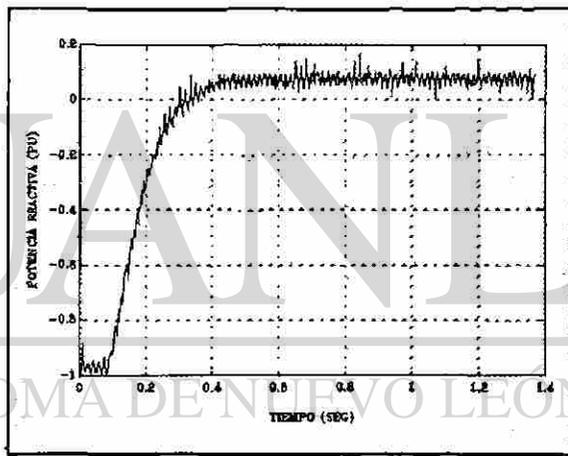


Fig. 3.25 Potencia reactiva (eje  $q$ ).

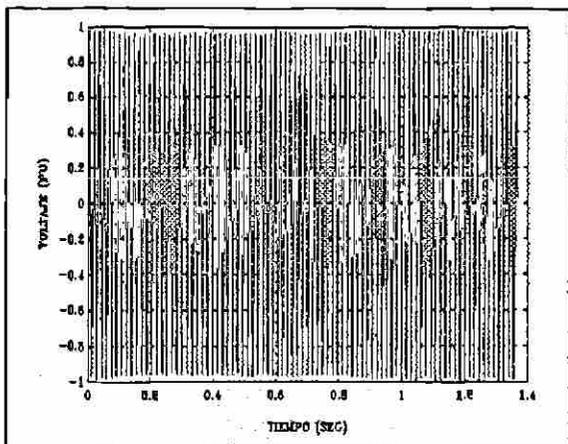


Fig. 3.26 Voltaje instantáneo  $V_{ab}$  (eje  $q$ ).

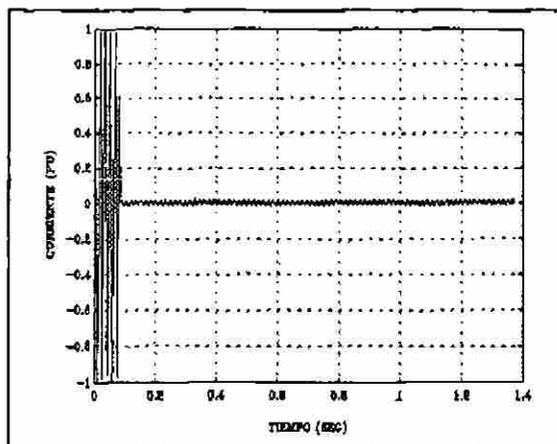


Fig. 3.27 Corriente instantánea  $I_c$  (eje  $q$ ).

En las Figuras 3.11 y 3.20 se muestra gráficamente el valor del voltaje de campo. Esta señal contiene ruido que no permite distinguir el valor real, que idealmente debe ser una recta horizontal.

Las Figuras 3.10 y 3.19 muestran los registros del decremento de voltaje en terminales obtenidos de los transductores. Se aprecia que la región transitoria prácticamente se pierde. En la Figura 3.19 se puede observar como el aumento en la velocidad angular se manifiesta en un incremento en el voltaje en terminales.

Las Figuras 3.14, 3.23 y 3.27 muestran gráficamente el comportamiento de las corrientes de fase. Obviamente como la apertura del interruptor no permite la circulación de corriente, la señal registrada asume un valor de cero.

### 3.7 PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS EXPERIMENTALES.

El considerable volumen de información que se obtiene al realizar la prueba experimental se guarda en una serie de archivos llamados frames que guardan de 1 a 2 segundos del evento total (10 a 40 segundos). Los datos que se representan enseguida, por ejemplo, corresponden a solo una parte del frame FR2D.PRN que ocupa 0.5 MB de memoria en el disco duro.

```

INFO*.L19
WAF
WAF
WAF
TITLE#
DATE#
TIME#
*REQUESTED PRIN#
*ACT#FILE#
*REQUESTED SWEEP#
*ACT#SWEEP#
*CHAN#*
*START.CHAN#*
*END.CHAN#*
*RESULTS#*
*NUMPOINTS#
*FORMAT#
*BOARD TYPES#
*UNITS POLAR#
*SIG. G.DIR.#L#
*CLOCK TYPE#
*CLOCK UNIT#
*CIAD#*

```

```

*Request Storage Scope (TM#)
07-06-1987, 09-23-87, 1001000000, 995024874, 2, 19, 05, 2, 19, 905
154,146,22,11,"EQP", "RTI" #01 12, "a", "z", "S", "I", "a", "Sec", 1, 000000,
1, 000000, 1, 000000, 1, 000000, 1, 000000, 1, 000000, 1, 000000, 1, 000000,
1, 000000, 1, 000000, 1, 000000, 1, 000000, 1, 000000, 1, 000000, 1, 000000,
*TR#, 1
*Request Storage Scope (TM#)
3.875918E+000 7.519531E+000 3.540039E+000 8.935547E+000 -4.052794E+000 1.049905E+000 -5.029297E+000 1.437988E+000 3.149148E+000 3.954844E+000 1.423340E+000 2.491408E+000 3.810840E+000 2.751463E+000 -1.709944E+000
3.113477E+000 5.590820E+000 3.100586E+000 8.544932E+000 -1.883789E+000 1.049905E+000 -5.029297E+000 1.860449E+000 2.928682E+000 3.959615E+000 1.411133E+000 8.000000E+000 2.610840E+000 2.780762E+000 -1.709944E+000
3.810035E+000 8.877891E+000 4.803904E+000 -4.787109E+000 7.226543E+000 1.000977E+000 -5.829297E+000 2.202145E+000 -2.799615E+000 3.959615E+000 1.411133E+000 2.441408E+000 3.610840E+000 2.717285E+000 -1.709944E+000
3.811008E+000 7.855644E+000 3.411969E+000 -1.398924E+000 -7.495117E+000 9.277344E+000 3.204835E+000 2.116699E+000 5.033715E+000 1.959280E+000 1.411133E+000 2.441408E+000 3.610840E+000 2.785445E+000 -1.957125E+000
3.813077E+000 7.153208E+000 4.323289E+000 -3.928711E+000 -4.445313E+000 8.544922E+000 -4.980449E+000 1.950488E+000 -4.860152E+000 1.959778E+000 1.400691E+000 4.822813E+000 1.610840E+000 2.770994E+000 -1.709944E+000
3.813477E+000 8.477448E+000 3.423088E+000 -2.175202E+000 -4.620868E+000 7.568399E+000 -4.980449E+000 1.959778E+000 -7.961128E+000 1.959615E+000 1.411133E+000 4.822813E+000 1.610840E+000 2.697871E+000 -1.709944E+000
3.791132E+000 8.740234E+000 4.541016E+000 -1.547652E+000 2.441408E+000 -4.822813E+000 1.220780E+000 -4.364515E+000 9.765258E+000 3.942402E+000 1.411133E+000 4.822813E+000 1.610840E+000 2.697871E+000 8.544922E+000
3.791132E+000 8.740234E+000 4.541016E+000 -1.547652E+000 2.441408E+000 -4.822813E+000 1.220780E+000 -4.364515E+000 9.765258E+000 3.942402E+000 1.400691E+000 1.464844E+000 2.527822E+000 2.691117E+000 8.544922E+000
3.788072E+000 8.207172E+000 3.548887E+000 -2.762025E+000 -2.441408E+000 -4.822813E+000 1.220780E+000 -1.671905E+000 4.822813E+000 3.942402E+000 1.411133E+000 7.334219E+000 1.527822E+000 2.528297E+000 8.544922E+000

```

En ocasiones los datos registrados están almacenados en forma binaria con la extensión \*.STM. Esto no permite visualizar el tipo de información, por éste motivo es

necesario hacer la conversión del archivo a la forma \*.PRN con el paquete SNAPSHOT. Además, los editores comerciales existentes como el editor SK de SIDEKICK, el editor del DOS, el editor NOTEPAD de WINDOWS o procesadores de palabras como WORDPERFECT no permiten leer los archivos \*.PRN debido a su considerable tamaño. Esto se resuelve ejecutando el archivo WS.EXE de WORDSTAR para el manejo inicial de la información. Se puede observar que al inicio aparece una serie de datos del tipo alfanumérico así como varias columnas de datos numéricos, en ocasiones con diferente formato.

En ocasiones los datos registrados tienen una apariencia más sencilla. Los datos que se muestran enseguida corresponden a una pequeña parte del archivo SAM220.PRN:

"C.T. SAMALAYUCA. U-2"  
 "PRUEBA DE EJE EN CUADRATURA"  
 "P = 50 MW Q = - 20 MVAR"  
 "21-54:07.46 3-17-1990"  
 "V GEN" "POTENCIA" "REACTIVO" "I FIELD" "V FIELD" "VELOC." "I ARMADU" "TIEMPO"  
 "KV" "MW" "MVAR" "AMP DC" "V DC" "RPM" "AMP" "SEG"  
 15.2893 51.7570 -19.6960 457.0313 76.6602 3604.9805 1920.5769 0.0000  
 15.2893 51.5033 -19.7980 455.0781 76.6602 3604.9805 1915.4890 0.0167  
 15.2893 51.5033 -19.7980 457.0313 76.6602 3604.9805 1915.4890 0.0333  
 15.2893 51.5033 -19.7980 455.0781 76.6602 3604.9805 1910.4011 0.0500  
 15.2893 51.5033 -19.7980 455.0781 76.6602 3604.9805 1910.4011 0.0667  
 15.0696 0.0000 2.9517 457.0313 76.6602 3753.8818 -22.9974 49.9824  
 15.0696 0.0000 2.9517 457.0313 76.6602 3746.0449 -22.9974 49.9991

Se puede observar, también, que se registran datos alfanuméricos y numéricos con diferente formato. Otras veces los datos registrados, que en este caso corresponden al archivo DOCE.PRN, pueden tener la forma siguiente:

Numero de Disarbio: 2

Motivo del Disparo: Cambio de Estado en Int. - Estado 1 - Manual/Remoto

Causa de Disparo: (0=Estado 1=Derivada 2=Límite) 0

-1.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.00	23.00	1535.00	-410.00	428.00	784.00	468.00	6.00	5.00	3.00	3.00	2.00	4.00	4.00	4.00	3.00
-1.34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12.00	-5.00	1562.00	-396.00	431.00	782.00	459.00	6.00	5.00	3.00	3.00	1.00	4.00	5.00	4.00	3.00
-1.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.00	18.00	1539.00	-410.00	428.00	785.00	460.00	6.00	4.00	3.00	3.00	2.00	4.00	4.00	4.00	3.00
-1.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	10.00	1551.00	-406.00	427.00	784.00	461.00	6.00	5.00	3.00	3.00	3.00	4.00	5.00	4.00	3.00
-1.31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-6.00	1.00	1554.00	-402.00	432.00	780.00	456.00	6.00	4.00	3.00	3.00	2.00	3.00	5.00	4.00	3.00

Al analizar los datos mostrados podemos concluir que los archivos presentan al inicio datos alfanuméricos y, posteriormente, datos numéricos, con diferente signo y formato. Considerando esas características se crearon rutinas en FORTRAN para la lectura, representación y procesamiento de la información. Esto permite usar paquetes evidentemente más poderosos para el análisis cuantitativo de los datos registrados, v.gr. MATLAB.

La aplicación de las rutinas de lectura y creación de archivos permite representar la información en forma gráfica para su estudio cualitativo y cuantitativo.

El registro de los valores instantáneos de algunas variables permite determinar el valor pico, el valor medio, el valor eficaz y la frecuencia de la señal. Como se cuenta con el registro de la señal de corriente de fase también es posible calcular el ángulo de defasamiento, o factor de potencia entre el voltaje de fase y la corriente fase.

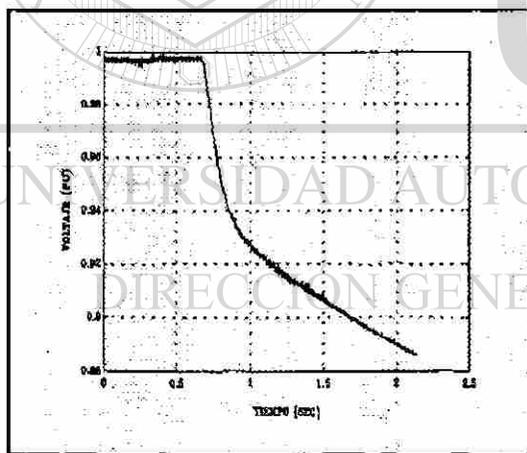


Fig. 3.10 Voltaje eficaz (eje d).

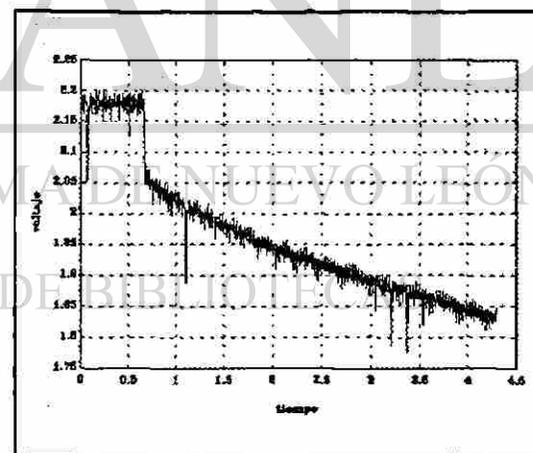


Fig. 3.28 Aplicación de la rutina rms.

La Figura 3.10 muestra gráficamente los valores eficaces del voltaje terminal registrado para la prueba de eje directo, en la gráfica se aprecia cierto retardo que no

permite aplicar las técnicas de ajuste desarrolladas y que se describen en el capítulo cuatro. El problema se resuelve aplicando una rutina para el cálculo de los valores eficaces. Los resultados obtenidos se aprecian en la gráfica de la Figura 3.28.

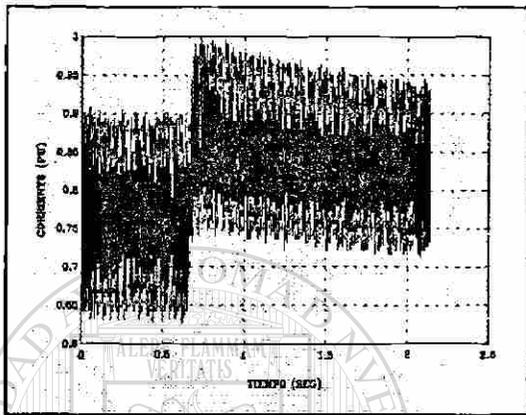


Fig. 3.12 Corriente de campo con ruido.

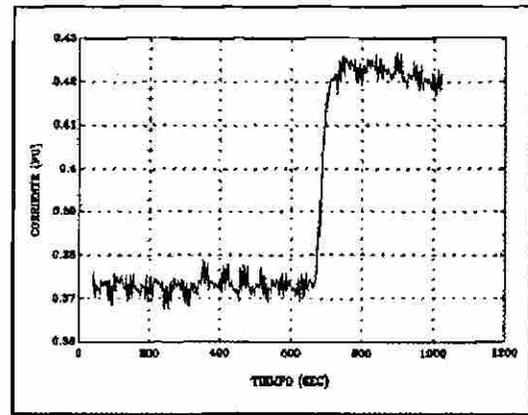


Fig. 3.29 Filtrado de la corriente de campo.

Otro aspecto importante es el registro de la corriente de campo ya que, como se explicó anteriormente, en el momento del disturbio las corrientes del rotor reaccionan para compensar la pérdida de flujo. La Figura 3.12 muestra gráficamente los valores medidos directamente de los transductores. En la Figura 3.29 se muestra el resultado de aplicar la rutina de filtrado digital a las mediciones de la Figura 3.12. La señal que se obtiene es útil para estimar, de otra forma, las constantes de tiempo de circuito abierto.

También es preciso mencionar que la constante de inercia del generador síncrono puede determinarse aprovechando la variación de la frecuencia en la prueba de eje en cuadratura. Para proceder a la aplicación de la corrección por frecuencia, primero, es necesario aplicar la rutina de frecuencia a los valores instantáneos del voltaje en terminales que se muestran gráficamente en la Figura 3.13. El resultado de aplicar la rutina de frecuencia se aprecia en la gráfica de la Figura 3.30.

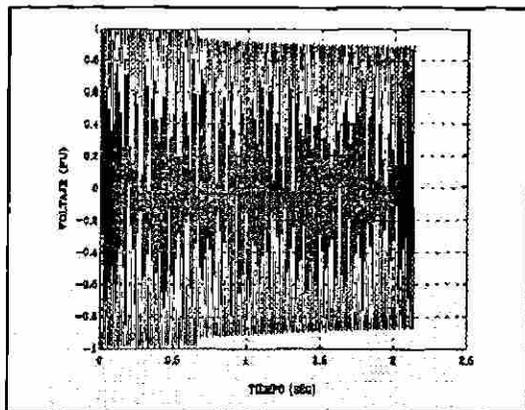


Fig. 3.13 Voltaje instantáneo  $V_{ab}$ .

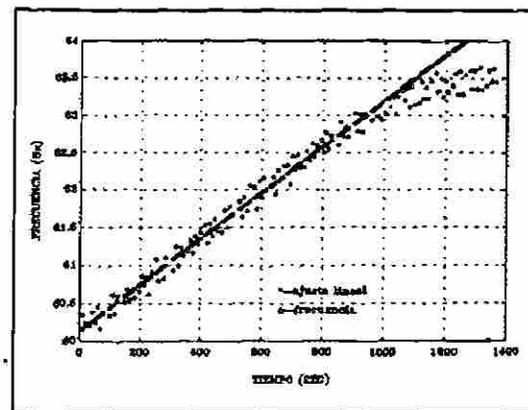


Fig. 3.30 Curva de frecuencia y curva ajustada.

En ocasiones, es necesario tomar una parte del registro total que contenga la región de interés para proceder a su análisis. Esto permite obtener las curvas representadas en las gráficas de las Figuras 3.31 y 3.32.

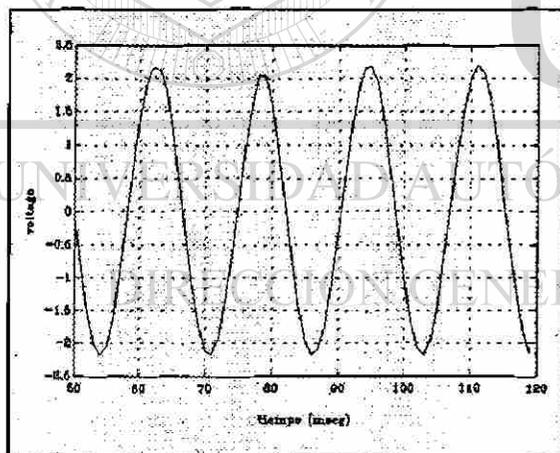


Fig. 3.31 Región del voltaje instantáneo.

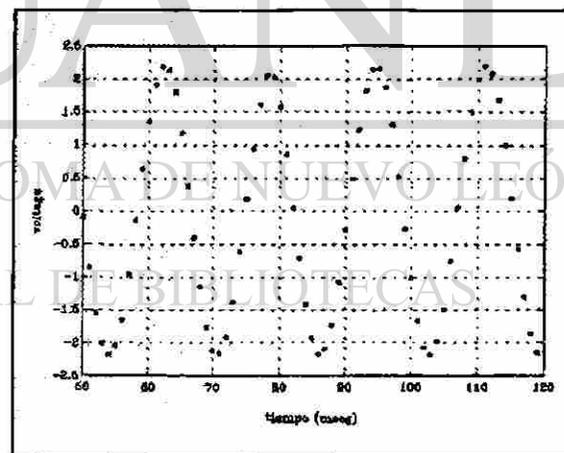


Fig. 3.32 Valores instantáneos muestreados.

### 3.8. OBSERVACIONES.

A raíz de los resultados reportados en la presente capítulo es necesario considerar lo siguiente:

- Los registros de las pruebas de rechazo de carga en campo indican presencia de ruido y distorsión que es necesario suprimir. Los valores instantáneos registrados permite obtener mejores valores.
  - El correcto registro de condiciones iniciales y finales de las variables es muy importante porque reduce la incertidumbre en la determinación de los parámetros.
  - La obtención de las curvas de decremento de voltaje a partir de los valores instantáneos requiere de un elaborado procesamiento de información para proceder a la determinación de los parámetros. Esto aumenta el tiempo para su obtención pero permite obtener valores más precisos.
- 
- Los valores registrados, por la naturaleza de la prueba, requieren de un proceso de ajuste y de la aplicación de términos de corrección.
  - Los transductores digitales desarrollados representan una herramienta útil y confiable para la determinación de los parámetros.

# CAPITULO 4

## METODOLOGIAS PARA ESTIMAR PARAMETROS DE GENERADORES SINCRONOS

La obtención de parámetros del generador síncrono por el método de rechazo de carga, descrito en el capítulo anterior, requiere de el procesamiento y manejo apropiado de la información a través de la aplicación de programas digitales. Es preciso mencionar que los registros de variables obtenidos en pruebas contienen gran cantidad de ruido que es necesario suprimir aplicando filtrado digital y técnicas de suavización. A todo esto hay que agregar que los transductores analógicos usados comúnmente en las mediciones tienen retardos de tiempo que imposibilitan en mucho el cálculo de parámetros de fenómenos subtransitorios. Para resolver este problema se desarrollaron herramientas para el procesamiento de las señales instantáneas de voltaje y corriente. A los valores eficaces así obtenidos se les aplica la metodología para la determinación de los parámetros por medios completamente digitales.

---

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al aplicar diversos procedimientos desarrollados para el filtrado y la suavización de los datos experimentales obtenidos en pruebas de rechazo de carga. Se describen las características fundamentales de los métodos utilizados para la determinación de los parámetros del modelo que describe el comportamiento del voltaje en terminales del generador. Dicho modelo se expresa como la suma de dos términos exponenciales con diferente constante de tiempo.

#### 4.1 INTRODUCCION.

En la operación de los sistemas de potencia, el control y la seguridad son objetivos principales. Para el logro de estos objetivos es necesario hacer estudios en los que se requiere la aplicación de modelos y de su implementación en programas digitales con propósitos de simulación. La confiabilidad del modelo matemático depende de los procedimientos teóricos y experimentales establecidos para la verificación del modelo.

El **modelo matemático** de un sistema dinámico es un conjunto de ecuaciones que puede usarse para determinar la evolución del estado del sistema a través del tiempo bajo la acción de las variables de control, dado el estado del sistema en una condición inicial. El estado del sistema está descrito por un conjunto de variables conocidas como **variables de estado**.

Las ecuaciones que comprenden el modelo matemático del proceso se conocen como **ecuaciones de comportamiento**. Las ecuaciones de comportamiento pueden ser un conjunto de ecuaciones diferenciales y/o un conjunto de ecuaciones algebraicas.

El problema de estimación que se analiza en este capítulo es el comportamiento del voltaje en terminales ante un rechazo de carga y que se expresa como:

$$V(t) = V(\infty) + A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} + B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.1)$$

La expresión (4.1) describe el comportamiento del voltaje para el eje directo. Todos los desarrollos del presente capítulo consideran la ecuación 4.1. Específicamente, se trata de determinar las constantes de tiempo ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ) y los coeficientes ( $V(\infty)$ ,  $A_d$  y  $B_d$ ).

## 4.2 DETERMINACION DE LA CURVA DE DECREMENTO DE VOLTAJE.

Las mediciones registradas durante una prueba de rechazo de carga pueden ser valores instantáneos y valores eficaces. En ambos casos se presentan problemas de ruido, aunque en los valores instantáneos el nivel de ruido es reducido. El beneficio de contar con valores instantáneos es que permite detectar la parte rápida del transitorio, esto no sucede con los valores eficaces debido al tiempo de respuesta de los transductores.

Los datos obtenidos en pruebas experimentales representan un volumen considerable de información que por su importancia requiere un procesamiento apropiado.

El análisis realizado con valores eficaces de variables creó la necesidad de utilizar los valores instantáneos ya que el tiempo de respuesta de los transductores y el ruido, no permiten identificar la región subtransitoria. La Figura 4.1 muestra las mediciones instantáneas del voltaje entre las fases a y b. Es preciso notar que estas mediciones exhiben, todavía, un retardo de tiempo y cierto nivel de ruido.

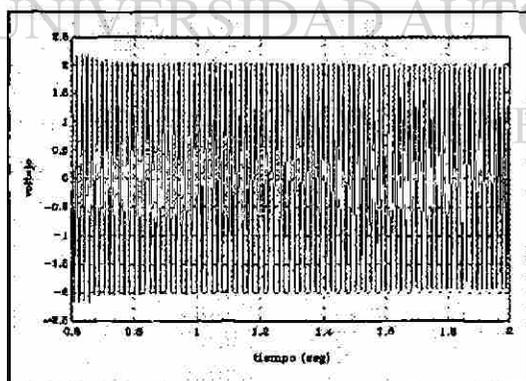


Fig. 4.1 Voltaje instantáneo en terminales.

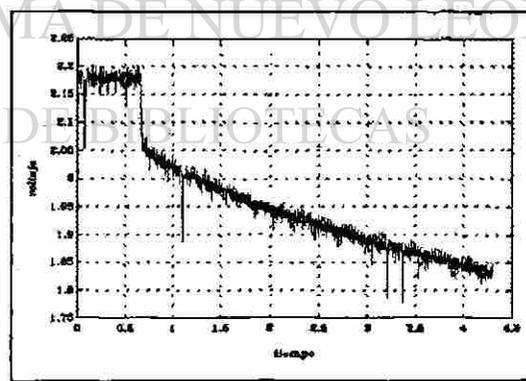


Fig. 4.2 Valor eficaz del voltaje instantáneo.

La Figura 4.2 muestra gráficamente los valores eficaces calculados a partir de los valores instantáneos.

Los resultados que se observan indican presencia de ruido y discontinuidades. Para filtrar el ruido se requiere de un proceso de suavización o de un filtro digital. La Figura 4.3 muestra la aplicación del algoritmo de Savitzky-Golay [25] a los datos representados en la gráfica de la Figura 4.2.

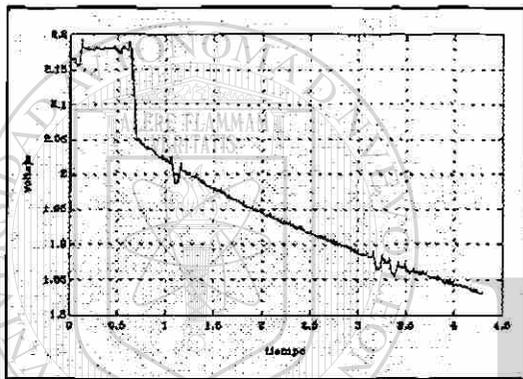


Fig. 4.3 Suavización de los valores eficaces.

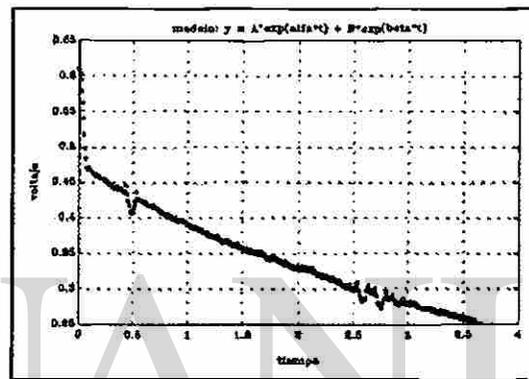


Fig. 4.4 Región de interés en el disturbio.

La señal necesaria para aplicar las técnicas de estimación requiere de la detección del tiempo de inicio del disturbio y de un corrimiento al origen. Los resultados obtenidos haciendo estas consideraciones y restando el valor en estado permanente a la señal, se muestran en la gráfica de la Figura 4.4.

En esta curva se pueden observar claramente las dos regiones que caracterizan la curva de decremento de voltaje: la región transitoria o lenta y la región subtransitoria o rápida.

Los registros del voltaje en terminales para las pruebas de eje directo y en cuadratura muestran un comportamiento que se puede expresar como la suma de dos

componentes exponenciales con diferentes constantes de tiempo. Los términos de voltaje se separan como:

$$V(t) = V(\infty) + V^I(t) + V^{II}(t) \quad (4.2)$$

donde

$$V^I(t) = A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (4.3)$$

es la componente transitoria y

$$V^{II}(t) = B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.4)$$

es la componente subtransitoria.

### 4.3 TÉCNICAS DE ESTIMACION.

La obtención de la curva de decremento de voltaje permite la aplicación de diversas técnicas de estimación para la determinación de los coeficientes y constantes de tiempo de (4.1). Las metodologías que se analizan son las siguientes:

- a) Método gráfico
- b) Método analítico
- c) Mínimos cuadrados con modelo lineal
- d) Redes neuronales tipo gradiente
- e) Técnicas de Fourier
- f) Técnicas de optimización

El objetivo del análisis es determinar la técnica que mejor se adapta al problema

de estimación propuesto.

### 4.3.1 METODO GRAFICO.

Este método es una herramienta manual y para cálculos preliminares. El procedimiento consiste en separar el registro gráfico de la curva de voltaje en zonas de acuerdo a (4.1). La Figura 4.5 muestra gráficamente el registro del voltaje en terminales usado para aplicar el método gráfico.

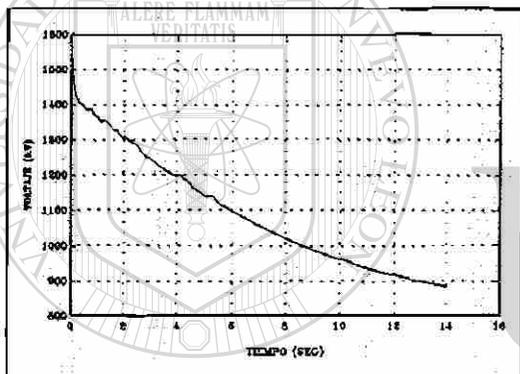


Fig. 4.5 Curva de decrecimiento de voltaje.

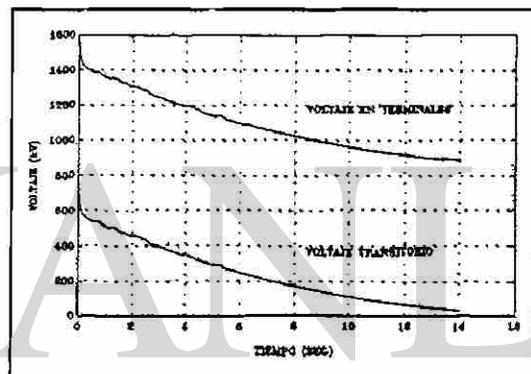


Fig. 4.6 Resultado de restar  $V(\infty)$  a  $V(0)$ .

El comportamiento del voltaje en terminales que se aprecia en la Figura 4.5 permite su formulación matemática como:

$$V(t) = V(\infty) + A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} + B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.1)$$

Es posible expresar a las componentes exponenciales de (4.1) como:

$$v(t) = A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} + B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.1a)$$

Para tiempos mucho mayores que la constante de tiempo subtransitoria,  $t \gg \tau_2$ , la componente subtransitoria es prácticamente cero. Esto permite expresar (4.1a) como:

$$v(t) \approx A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (4.1b)$$

Haciendo el cambio de variables  $V=A_d$  y  $\alpha=-1/\tau_1$  en (4.1b) se obtiene:

$$v(t) = V e^{\alpha t} \quad (4.1c)$$

Aplicando el logaritmo en ambos miembros de (4.1c) el resultado es:

$$\ln v(t) = \ln V + \alpha t \quad (4.1d)$$

La expresión (4.1d) representa la ecuación de una recta que corta el eje de las ordenadas en el punto  $\ln(A_d)$ . La pendiente de la recta es igual al inverso de la constante de tiempo transitoria ( $\tau_1$ ).

En resumen, el procedimiento para aplicar el método gráfico es:

- a) El coeficiente  $C$  mostrado en (3.20) se obtiene restando al valor del voltaje inicial el valor del voltaje final:

$$C = V(0^-) - V(\infty) \quad (4.5)$$

La Figura 4.6 muestra los resultados obtenidos al aplicar el inciso a).

- b) El coeficiente transitorio  $A_d$  se obtiene del trazo semilogarítmico de la componente transitoria sin considerar el efecto subtransitorio.

La Figura 4.7 muestra los resultados obtenidos al aplicar el inciso b).

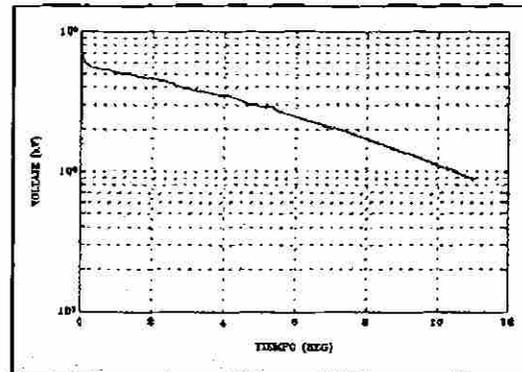


Fig. 4.7 Trazo semilogarítmico del voltaje transitorio.

La gráfica semilogarítmica de este voltaje es una recta que cruza el eje de las ordenadas en el punto  $\ln(A_d)$ . La constante de tiempo transitoria es igual al inverso de la pendiente de la recta trazada.

- c) El coeficiente  $B_d$  se obtiene del trazo semilogarítmico de la componente subtransitoria del voltaje. El voltaje subtransitorio se obtiene restando al voltaje obtenido en el inciso b la componente transitoria. El corte de esta recta en el eje de las ordenadas es igual al logaritmo del coeficiente subtransitorio  $B_d$  y la pendiente de esta recta es el inverso de la constante de tiempo subtransitoria. Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran los resultados obtenidos al aplicar el inciso c.

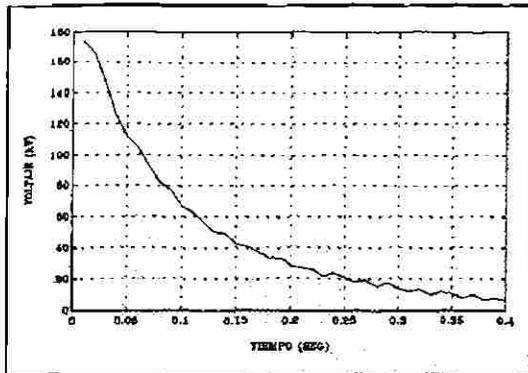


Fig. 4.8 Componente subtransitoria del voltaje.

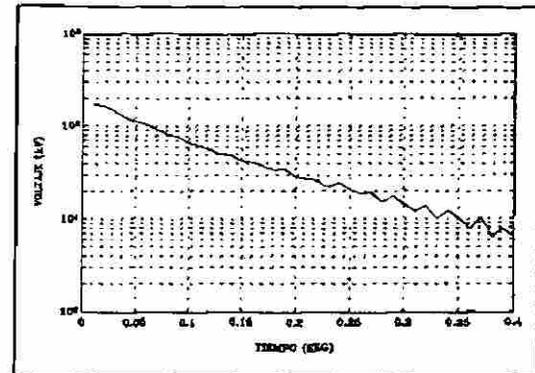


Fig. 4.9 Trazo semilogarítmico del voltaje subtransitorio.

### 4.3.2 METODO ANALITICO.

Este procedimiento es más formal que el anterior pero está limitado a las pruebas de eje directo ya que en esta prueba el comportamiento del voltaje en terminales se puede descomponer, con cierta definición, en región transitoria y región subtransitoria.

Los registros mostrados gráficamente en las Figuras 4.5 y 4.6 permiten delimitar las componentes transitorias y subtransitorias del voltaje en terminales que se necesitan para aplicar el método analítico. Esto no sucede con las pruebas de eje en cuadratura porque las constantes de tiempo transitoria y subtransitoria son muy parecidas, este caso se resuelve aplicando técnicas iterativas.

El procedimiento para aplicar el método analítico es el siguiente:

- a) Al voltaje terminal se le resta el voltaje final resultando la suma del voltaje transitorio y subtransitorio, de (4.2):

$$V^I(t) + V^{II}(t) = V(t) - V(\infty) \quad (4.6)$$

Los voltajes transitorios y subtransitorios se obtienen de acuerdo a (4.3) y (4.4).

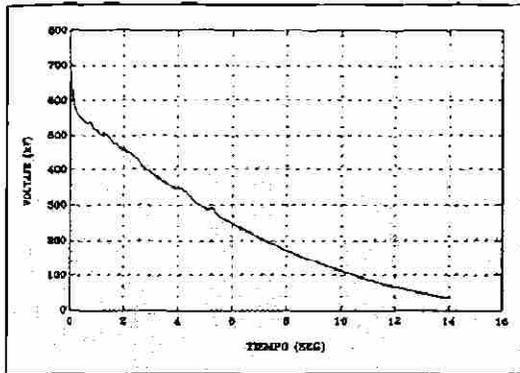


Fig. 4.10 Componente transitoria.

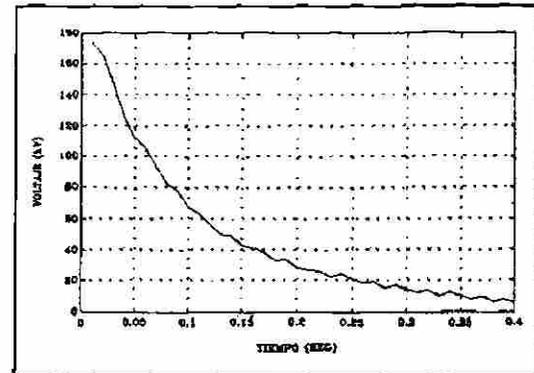


Fig. 4.11 Componente subtransitoria.

- b) Se eligen puntos dentro de la región transitoria mostrada en la figura 4.10 y se calcula la constante de tiempo de acuerdo con:

$$\tau_1 = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{V'(t_1)}{V'(t_2)}} \quad (4.7)$$

donde  $t_1$  y  $t_2$  son los tiempos correspondientes a los puntos en el rango transitorio.

Tomando diferentes puntos dentro del rango transitorio, la constante de tiempo se obtiene como el valor promedio de las constantes de tiempo calculadas.

- c) El coeficiente en estado transitorio  $A_d$  se determina como:

$$A_d = \frac{V'(t_1)}{e^{-\frac{(t_1 - t_0)}{\tau_1}}} \quad (4.8)$$

donde  $t_1$ , es un tiempo dentro del rango transitorio y  $t_0$  es el tiempo en el

que ocurre el rechazo de carga. El coeficiente  $A_d$  se obtiene como el valor promedio de varios puntos comprendidos dentro del rango transitorio.

- d) La constante de tiempo rápida se obtiene aplicando un procedimiento similar al descrito para la constante de tiempo transitoria. Se toman puntos dentro de la región subtransitoria mostrada en la Figura 4.11.

El voltaje subtransitorio se obtiene al restarle al voltaje terminal la suma del voltaje final más la componente transitoria:

$$V(t)'' = V(t) - V(\infty) - V'(t) \quad (4.9)$$

La constante de tiempo corta se calcula mediante la expresión

$$\tau_2 = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{V''(t_1)}{V''(t_2)}} \quad (4.10)$$

- e) El coeficiente subtransitorio se obtiene de la siguiente expresión

$$B_d = \frac{V''(t_1)}{e^{-\frac{(t_1 - t_0)}{\tau_2}}} \quad (4.11)$$

Las constantes y coeficientes transitorios y subtransitorios calculados permite, a su vez, determinar el valor de los parámetros eléctricos del generador síncrono como se verá posteriormente.

### 4.3.3 MINIMOS CUADRADOS CON MODELO LINEAL.

La aplicación de esta técnica es más elaborada que el método analítico y requiere igualmente contar con registros de voltaje como los indicados en la Figura 4.5. En este caso se aplica el método de ajuste de curvas basado en mínimos cuadrados a las funciones no lineales que describen el comportamiento del voltaje en las regiones transitoria y subtransitoria. Para aplicar la técnica de mínimos cuadrados en la estimación de los parámetros de la curva de decremento de voltaje se considera que las componentes transitorias y subtransitorias del voltaje en terminales se puede expresar como:

$$V(t) = V(\infty) + V^I(t) + V^{II}(t) \quad (4.2)$$

donde

$$V^I(t) = A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (4.3)$$

y

$$V^{II}(t) = B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.4)$$

Las expresiones anteriores tienen la forma:

$$v(t) = V e^{\alpha t} \quad (4.12)$$

Aprovechando la naturaleza exponencial del problema se hacen dos transformaciones, una por cada región, y se aplica el procedimiento para un modelo lineal. Aplicando el logaritmo en ambos miembros de (4.12)

$$\ln v(t) = \ln V + \alpha t \quad (4.13)$$

Para ajustar una línea recta al conjunto de datos es necesario determinar el valor de los parámetros  $\alpha$  y  $\ln(V)$  de (4.13) minimizando la suma de los cuadrados de las distancias entre los puntos de la recta y los datos.

Para evitar sumar valores positivos y negativos, la diferencia se eleva al cuadrado, obteniendo;

$$E = \sum_{k=1}^n d_k^2 = \sum_{k=1}^n (\ln v_k - \alpha t_k - \ln V)^2 \quad (4.14)$$

Para minimizar el error se hace la derivada parcial de  $E$  con respecto a los coeficientes,  $\alpha$  y  $\ln V$ , y se iguala a cero:

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = -2 \sum_{k=1}^n t_k (\ln v_k - \alpha t_k - \ln V) = 0 \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \ln V} = -2 \sum_{k=1}^n (\ln v_k - \alpha t_k - \ln V) \quad (4.16)$$

Agrupando términos y despejando, se resuelve el sistema de ecuaciones para cada parámetro:

$$\alpha \sum_{k=1}^n t_k^2 + \ln V \sum_{k=1}^n t_k = \sum_{k=1}^n t_k \ln v_k \quad (4.17)$$

$$\alpha \sum_{k=1}^n t_k + n \ln V = \sum_{k=1}^n \ln v_k \quad (4.18)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^n t_k \sum_{k=1}^n \ln v_k - n \sum_{k=1}^n t_k \ln v_k}{\left[ \sum_{k=1}^n t_k \right]^2 - n \sum_{k=1}^n t_k^2} \quad (4.19)$$

$$\ln V = \frac{\sum_{k=1}^n t_k \sum_{k=1}^n t_k \ln v_k - \sum_{k=1}^n t_k^2 \sum_{k=1}^n \ln v_k}{\left[ \sum_{k=1}^n t_k \right]^2 - n \sum_{k=1}^n t_k^2} \quad (4.20)$$

La Figura 4.12 muestra gráficamente los resultados obtenidos al aplicar esta metodología.

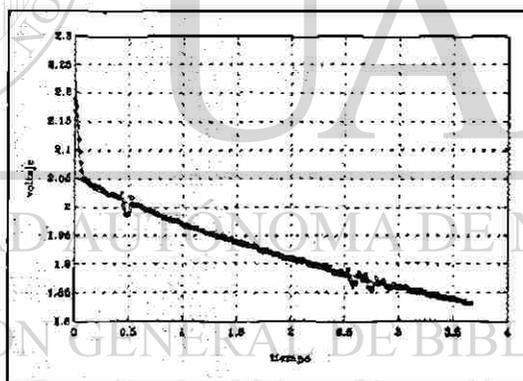


Fig. 4.12 Modelo ajustado y curva real.

#### 4.3.4 REDES NEURONALES TIPO GRADIENTE.

En este método se aplican redes neuronales con retroalimentación de información para resolver el problema de estimación de parámetros de la curva de decremento de voltaje [7, 45]. Se aprovechan las características adaptivas de las neuronas artificiales y se resuelve un conjunto de ecuaciones diferenciales, minimizando la función de energía que garantiza la convergencia.

Para estimar los coeficientes y constantes de tiempo de la señal ruidosa del voltaje terminal se considera un modelo que incluye dos exponenciales decrecientes expresado por:

$$V(t) - V(\infty) = V'(t) + V''(t) \quad (4.1)$$

donde

$$V'(t) = A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (4.2)$$

y

$$V''(t) = B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.3)$$

Haciendo el cambio de variables siguiente:

$$\alpha_1 = -\frac{1}{\tau_1} \quad \alpha_2 = -\frac{1}{\tau_2}$$

El decremento de voltaje se puede expresar también como:

$$V(w, t) = A_d e^{\alpha_1 t} + B_d e^{\alpha_2 t} \quad (4.21)$$

donde  $w = [A_d \alpha_1 B_d \alpha_2]^t$ .

La señal  $v(t)$  es la medición con ruido de  $V(t)$ :

$$v(t) = V(w, t) + e(t) \quad (4.22)$$

donde  $e(t)$  es el error desconocido que incluye ruido aleatorio y distorsión causada por los instrumentos de medición. La señal disponible  $v(t)$  consta de  $N$  muestras tomadas en intervalos discretos:

$$v_m = v(m\tau) := v(t)|_{t = m\tau} \quad (4.23)$$

De esta forma:

$$v(m\tau) = A_d e^{\alpha_1 m\tau} + B_d e^{\alpha_2 m\tau} + e(m\tau) \quad (4.24)$$

donde  $\tau$  es el intervalo de muestreo,  $t_o := n\tau$  es el tiempo inicial de medición y  $T+t_o := (n+N-1)\tau$  es el último punto de la medición. De esta forma el error  $e_m := e(m\tau)$  en el momento de muestreo  $t = m\tau$  ( $t_o \leq t \leq t_o + T$ ) es:

$$e_m(w) = v_m - V_m \quad (4.25)$$

donde  $v_m$  representa las muestras observadas y  $V_m$  representa los valores a estimar.

El propósito del algoritmo es obtener la mejor estimación de  $w$  a partir de las mediciones registradas y actualizar el valor  $w$  si se tienen nuevas mediciones.

En términos de redes neuronales artificiales se requiere proponer una función de energía. Matemáticamente el problema consiste en determinar el vector de parámetros  $w$  que minimice la función escalar de energía:

$$E(w) = \left[ \sum_{m=n}^{n+M-1} |e_m|^p \right]^{1/p} = \|e(w)\|_p \quad (4.26)$$

donde  $p \geq 1$ ,  $n \geq 0$ , y

$$e(w) = [e_n \ e_{n+1} \ \cdots \ e_{n+N-1}]^t \quad (4.27)$$

La elección de la norma depende de la distribución del ruido  $e_m$  en las mediciones. Aplicando mínimos cuadrados, la función de energía a minimizar es:

$$E_2(w) = \frac{1}{2} \sum_{m=n}^{n+M-1} e_m^2(w) \quad (4.28)$$

Si se considera que la distribución de los errores no es gaussiana, la función de energía que se propone es:

$$E(w) = \sum_{m=n}^{n+N-1} \sigma(e_m(w)) \quad (4.29)$$

donde  $\sigma$  es una función de activación. Para minimizar la función de energía  $E(w)$  se aplica la técnica de descenso rápido. Al aplicar esta técnica el sistema dinámico que se obtiene es:

$$\frac{dw_j}{dt} = -\mu_j \frac{\partial E(w)}{\partial w_j} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (4.30)$$

con las condiciones iniciales  $w_j(0) = w_j^{(0)}$  y  $\mu_j > 0$ . Aplicando la regla de la cadena:

$$\frac{dw_j}{dt} = -\mu_j \sum_{m=n}^{n+N-1} \frac{\partial E(w)}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial e_m} \frac{\partial e_m}{\partial w_j} \quad (4.31)$$

$$\frac{dw_j}{dt} = -\mu_j \sum_{m=n}^{n+N-1} \Psi(e_m) \frac{\partial e_m}{\partial w_j} \quad (4.32)$$

donde

$$\psi(e_m) = \frac{\partial \sigma_L}{\partial e_m} = \beta \tanh\left(\frac{e_m}{\beta}\right) \quad (4.33)$$

De esta manera podemos derivar el conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dA_d}{dt} = \mu_1 \sum_{m=n}^{n+N-1} \psi(e_m) e^{\alpha_1 m \tau} \quad (4.34)$$

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = \mu_2 \sum_{m=n}^{n+N-1} \psi(e_m) A_d m \tau e^{\alpha_1 m \tau} \quad (4.35)$$

$$\frac{dB_d}{dt} = \mu_3 \sum_{m=n}^{n+N-1} \psi(e_m) e^{\alpha_2 m \tau} \quad (4.36)$$

$$\frac{d\alpha_2}{dt} = \mu_4 \sum_{m=n}^{n+N-1} \psi(e_m) B_d m \tau e^{\alpha_2 m \tau} \quad (4.37)$$

donde

$$\psi(e_m) := \epsilon_m, \mu_i = \frac{1}{\tau_i} > 0 \quad (4.38)$$

$\tau_i$  son las constantes de tiempo de los integradores.

Después de haber establecido la ecuación de estado se recurre a la aplicación de rutinas de integración para la solución de las ecuaciones diferenciales en forma numérica. La Figura 4.13 muestra la arquitectura de la red neuronal para resolver el problema de estimación.

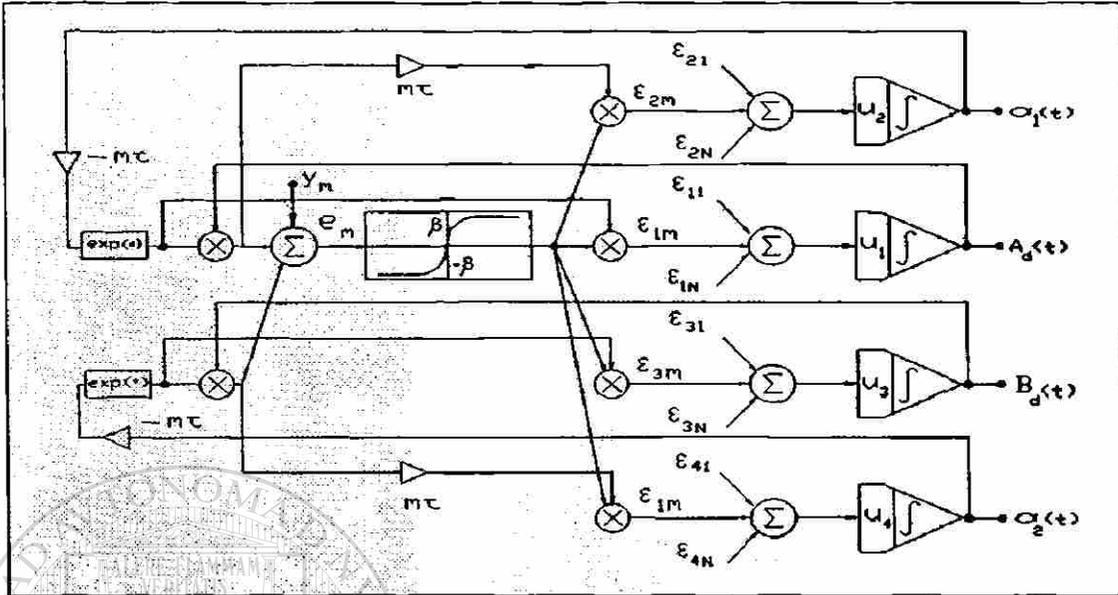


Fig. 4.13 Arquitectura de la red neuronal para la estimación de parámetros.

La Figura 4.14 muestra las mediciones del voltaje en terminales. En la misma gráfica de la Figura 4.15 se muestran gráficamente los resultados obtenidos al hacer el ajuste con la técnica de redes tipo gradiente.

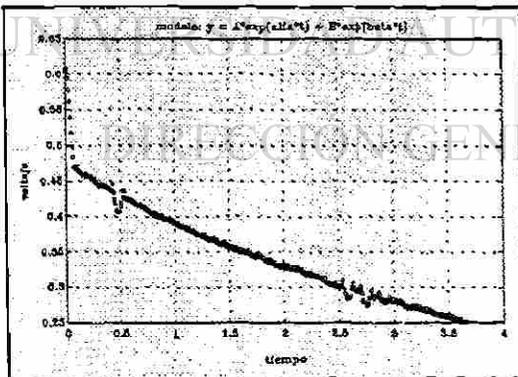


Fig. 4.14 Valor eficaz del voltaje instantáneo.

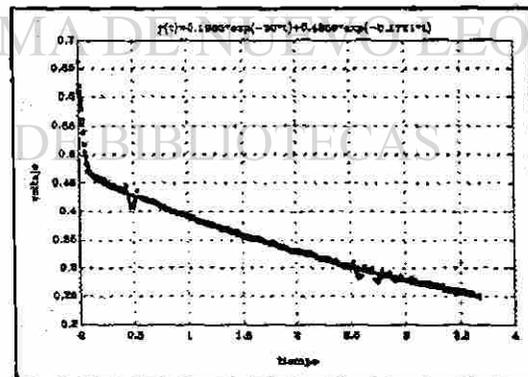


Fig. 4.15 Resultados del ajuste.

### 4.3.5 TECNICAS DE FOURIER.

Esta técnica es matemáticamente elegante y formal y tiene la propiedad de que las características particulares de la curva de decremento de voltaje permite su aplicación ya que el comportamiento del voltaje en terminales se expresa como la suma de dos exponenciales decrecientes:

$$V(t) = V(\infty) + V'(t) + V''(t) \quad (4.1)$$

donde

$$V'(t) = A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (4.2)$$

$$V''(t) = B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.3)$$

Haciendo el cambio de variables siguiente:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\tau_1} \quad \alpha_2 = \frac{1}{\tau_2}$$

El decremento de voltaje se puede expresar también como:

$$V(t) = \sum_{i=1}^n V_i e^{-\alpha_i t} \quad (4.39)$$

El problema clave en el procesamiento de este tipo de señales es separar las amplitudes y las constantes de tiempo de acuerdo al modelo del sistema [23, 26]. Para resolver este problema se aplica el principio de convolución y la transformada inversa de Fourier a la señal transformada en dos variantes: la forma diferencial y la forma de producto.

En ambos casos se hace la transformación del eje del tiempo haciendo  $t = e^x$ :

$$V(e^x) = \sum_{i=1}^n V_i \exp(-\alpha_i e^x) \quad (4.40)$$

Haciendo  $\alpha = e^{-p}$ :

$$V(e^x) = \sum_{i=1}^n V_i \exp(-e^{-p_i} e^x) \quad (4.41)$$

Esta igualdad no se altera si:

$$V(e^x) = \sum_{i=1}^n V_i \exp(-e^{-p_i} e^x) \frac{e^{-p_i}}{\alpha_i} \quad (4.42)$$

Al multiplicar ambos miembros de la ecuación anterior por  $e^x$  se tiene:

$$e^x V(e^x) = \sum_{i=1}^n V_i \exp(-e^{-p_i} e^x) \frac{e^{-p_i}}{\alpha_i} e^x \quad (4.43)$$

Otra forma de la expresión anterior es:

$$e^x V(e^x) = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{\alpha_i} \exp(-e^{x-p_i}) e^{x-p_i} \quad (4.44)$$

De esta manera:

$$e^x V(e^x) = e^x \exp(-e^x) * \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{\alpha_i} \delta(x - p_i) \quad (4.45)$$

Por lo tanto:

$$F^{-1} \left[ \frac{F \left[ e^x V(e^x) \right]}{F \left[ e^x \exp(-e^x) \right]} \right] = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{\alpha_i} \delta(x - p_i) \quad (4.46)$$

Después de hacer las transformaciones anteriores la señal compuesta de múltiples exponenciales decrecientes puede verse como un espectro cuyos picos indican la magnitud de los coeficientes y las constantes de tiempo del modelo original.

Si consideramos la forma diferencial de la misma señal el beneficio que se obtiene es que los coeficientes del modelo propuesto se obtienen directamente. Esto es:

$$\frac{d}{dx} V(e^x) = \sum_{i=1}^n V_i \frac{d}{dx} \exp(-\alpha_i e^x) \quad (4.47)$$

Aplicando convolución:

$$\frac{d}{dx} V(e^x) = \sum_{i=1}^n V_i \exp(-e^{-p_i} e^x) (-e^{x-p_i}) \quad (4.48)$$

De esta manera:

$$\frac{d}{dx} V(e^x) = -e^x \exp(-e^x) * \sum_{i=1}^n V_i \delta(x - p_i) \quad (4.49)$$

Por tanto:

$$F^{-1} \left[ \frac{F \left[ e^x \frac{d}{dx} V(e^x) \right]}{F \left[ -e^x \exp(-e^x) \right]} \right] = \sum_{i=1}^n V_i \delta(x - p_i) \quad (4.50)$$

La gráfica de la Figura 4.16 muestra la transformación logarítmica del eje del tiempo, dicha señal se usa para la convolución en forma de producto. En la gráfica de

la Figura 4.17 se muestra la derivada de la curva transformada que se aplica en la forma diferencial de la convolución.

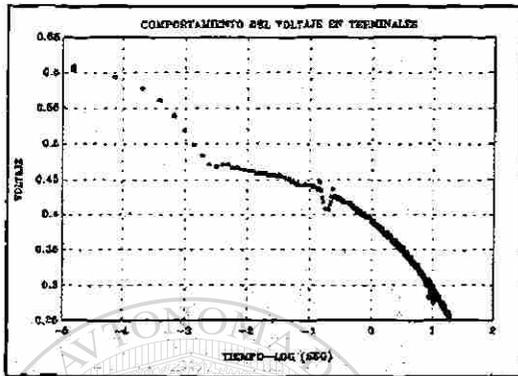


Fig. 4.16 Aplicación del logaritmo al tiempo.

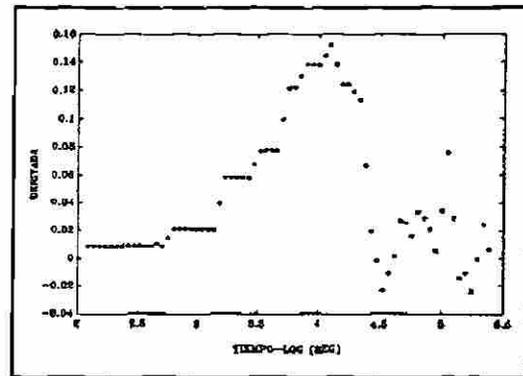


Fig. 4.17 Aspecto de la derivada.

### 4.3.6 TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN.

En el momento de plantear el procedimiento a seguir por el método analítico se estableció la necesidad de aplicar técnicas iterativas para determinar los parámetros de la curva de decremento de voltaje correspondiente al eje en cuadratura. La gráfica de la Figura 4.18 muestra claramente que no es posible descomponer la curva registrada en regiones transitoria y subtransitoria debido a que las constantes de tiempo de las componentes exponenciales son muy parecidas.

El problema consiste en aplicar técnicas de optimización hasta obtener el mejor ajuste desde el punto de vista de mínimos cuadrados. Los métodos que se aplican son:

- a) Método de Descenso Rápido
- b) Método de Newton
- c) Método de Nelder-Mead

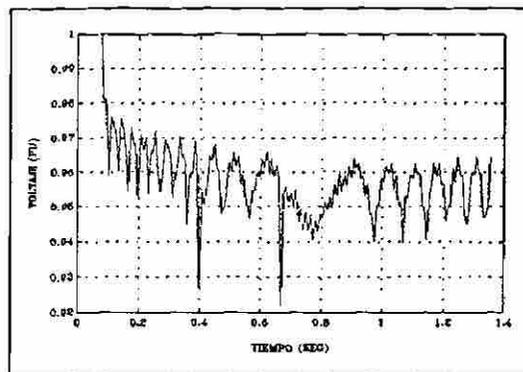


Fig. 4.18 Voltaje terminal para el eje  $q$ .

Dado que el comportamiento del voltaje en terminales es:

$$V(t) = V(\infty) + V'(t) + V''(t) \quad (4.1)$$

donde

$$V'(t) = A_d e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (4.2)$$

y

$$V''(t) = B_d e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4.3)$$

Haciendo el cambio de variables siguiente:

$$\alpha_1 = -\frac{1}{\tau_1} \quad \alpha_2 = -\frac{1}{\tau_2}$$

El decremento de voltaje se puede expresar como:

$$V(t) = A_d e^{\alpha_1 t} + B_d e^{\alpha_2 t}$$

El problema de optimización a resolver se puede establecer como un proceso

iterativo de búsqueda de variables de decisión que producen las mejores realizaciones de una función objetivo.

La función objetivo que se propone se define como:

$$\text{minimizar: } E(x) = \sum_{m=1}^N \frac{1}{2} (y_m - A_d e^{\alpha_1 t_m} - B_d e^{\alpha_2 t_m})^2 \quad (4.51)$$

donde

$$x = [A_d \ \alpha_1 \ B_d \ \alpha_2]^t \quad (4.52)$$

es el vector de parámetros a estimar y  $y_m$  es la medición registrada en el instante  $t=t_m$ .

El proceso iterativo consiste en actualizar el vector de parámetros como:

$$x^{t+1} = x^t + \mu d_{ir} \quad (4.53)$$

donde  $d_{ir}$  representa la dirección de búsqueda y  $\mu$  es una constante que controla la convergencia.

La dirección de búsqueda del método de descenso rápido es:

$$d_{ir} = - \nabla E \quad (4.54)$$

donde

$$\nabla E(x) = \left[ \frac{\partial E}{\partial A_d} \ \frac{\partial E}{\partial \alpha_1} \ \frac{\partial E}{\partial B_d} \ \frac{\partial E}{\partial \alpha_2} \right]^t \quad (4.55)$$

es el gradiente de la función objetivo.

La dirección de búsqueda en el método de Newton es:

$$d_{ir} = - H^{-1} \nabla E \quad (4.56)$$

donde  $H$  es la matriz hessiana de la función objetivo.

El método de Nelder-Mead minimiza una función de  $n$  variables independientes usando  $(n+1)$  vértices de un poliedro flexible. Cada vértice se define por un vector. El vértice con el que se obtiene el mayor valor de la función objetivo se proyecta a través del centro de gravedad de los vértices restantes. La minimización de la función objetivo se logra sustituyendo en forma sucesiva el punto con mayor valor de la función por mejores puntos hasta encontrar el óptimo [8, 11].

#### 4.4 RESULTADOS.

Para calcular los parámetros eléctricos del generador síncrono es necesario conocer sus valores nominales para determinar las cantidades base. En la Tabla 4.1 se muestran los datos de placa del generador.

TABLA 4.1

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

VARIABLE	VALOR	UNIDAD
Potencia nominal	340	MVA
Voltaje nominal entre fases	20000	VOLTS
Corriente nominal	9849	A
Voltaje de excitación	500	VOLTS
Velocidad nominal	3600	RPM

En la Tablas 4.2 y 4.3 se listan los resultados obtenidos en el procesamiento de las curvas de decremento de voltaje para las pruebas de eje directo y en cuadratura. Los valores de voltaje son valores escalados. Las constantes de tiempo están en segundos.

TABLA 4.2  
RESULTADOS PARA EL EJE DIRECTO

Técnica aplicada	$A_d$	$B_d$	$\tau_1$	$\tau_2$	$E_i^2$
Método Gráfico	0.4566	0.1994	6.0679	0.04036	4.47e-3
Método Analítico	0.4738	0.2478	5.6302	0.04791	4.46e-3
Descenso Acelerado	0.4626	0.2401	5.9382	0.03050	4.46e-3
Linealización	0.4648	0.2401	5.1861	0.03146	4.49e-3
Deconvolución	0.4650	0.1500	5.5500	0.03500	4.72e-3
Red neuronal	0.4659	0.1965	5.8105	0.03333	4.46e-3
Nelder-Mead	0.4691	0.1658	5.8684	0.04617	4.49e-3

TABLA 4.3  
RESULTADOS PARA EL EJE EN CUADRATURA

Técnica aplicada	$A_q$	$B_q$	$\tau_1$	$\tau_2$	$E_i^2$
Linealización	0.042	---	2.640	---	0.054
Red neuronal	0.022	0.007	1.052	0.03333	0.052
Nelder-Mead	0.019	0.005	---	---	0.050

TABLA 4.4  
RESUMEN DE RESULTADOS PARA LOS EJES D Y Q

PARAMETRO	EJE DIRECTO	EJE EN CUADRATURA
$A_{(d \text{ ó } q)}$	0.459	0.01968
$\alpha_1$	-0.211	-2.8310
$B_{(d \text{ ó } q)}$	0.051	0.00560
$\alpha_2$	-76.560	-2.8930
$V_i(0^+)$	2.1013	0.04646
$V_i(0^-)$	2.1785	2.2400
$V_i(\infty)$	1.5911	2.1320

Con los datos de las Tablas 4.1 y 4.4 se determinan los parámetros para los ejes  $d$  y  $q$ . En la Tabla 4.5 se muestran los resultados para el eje directo y en la Tabla 4.6 los resultados para el eje en cuadratura.

TABLA 4.5  
PARAMETROS DE EJE DIRECTO

PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR
Reactancia Síncrona	$X_d$	1.2295
Reactancia Transitoria	$X_d'$	0.2298
Reactancia Subtransitoria	$X_d''$	0.1472
Constante de Tiempo Transitoria	$T_{d0}'$	6.2000
Constante de Tiempo Subtransitoria	$T_{d0}''$	0.015

TABLA 4.6  
PARAMETROS DE EJE EN CUADRATURA

PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR
Reactancia Síncrona	$X_q$	1.254
Reactancia Transitoria	$X_q'$	0.165
Reactancia Subtransitoria	$X_q''$	0.185
Constante de Tiempo Transitoria	$T_{q0}'$	0.357

#### 4.5 ANALISIS COMPARATIVO.

Es importante mencionar que la aplicación adecuada de las técnicas de estimación es afectada por las características de los datos: su contenido de ruido, nivel de distorsión, escalamiento, número, etc. Al realizar un procesamiento previo a la aplicación de los métodos de ajuste se está alterando la calidad de la información original.

Un problema importante es la dificultad para la obtención de los valores eficaces a partir de valores instantáneos, donde se puede apreciar aún cierto retardo. De hecho, es difícil delimitar la región subtransitoria. En el recuadro de la Figura 4.19 se muestra dicha región.

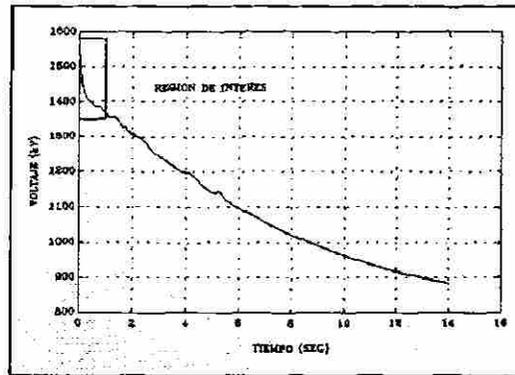


Fig. 4.19 Recuadro de la región subtransitoria.

El método gráfico es recomendable para cálculos preliminares en las pruebas de eje directo, porque las curvas de decremento de voltaje en terminales permite distinguir las regiones transitoria y subtransitoria. Esto no sucede con los registros para el eje en cuadratura ya que las constantes de tiempo son muy parecidas.

El método analítico requiere que los datos sean suficientes en número y con valores normalizados. La idea es tomar valores relativamente alejados uno de otro y proceder a la aplicación del método.

La técnica que involucra redes neuronales tipo gradiente es semejante a las técnicas de optimización, ya que requiere de un proceso iterativo en el que se minimiza una función de energía resolviendo un conjunto de ecuaciones diferenciales.

La estimación con mínimos cuadrados ajustando a un modelo lineal solo se recomienda para el eje directo ya que el eje de cuadratura tiene un comportamiento en el que es difícil discriminar las regiones de actuación de cada constante de tiempo. Este procedimiento es sencillo y se adapta bastante bien al modelo ya que el ajuste es directo y no consume el tiempo de procesamiento inherente en los métodos de minimización del error cuadrático medio.

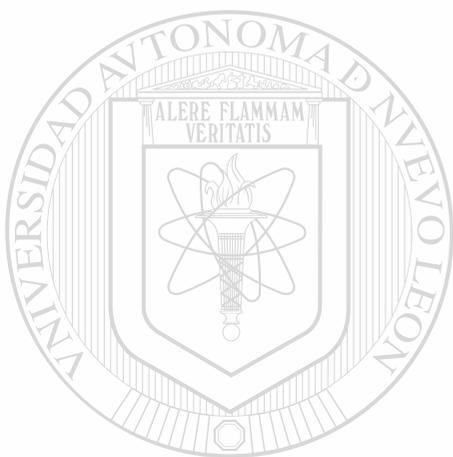
La aplicación de las técnicas de Fourier requiere de un mayor procesamiento de la información. Esto consiste en transformar el eje del tiempo, hacer un escalamiento para no trabajar con cantidades negativas (cantidades entre cero y uno tienen logaritmo menor que cero) y uniformizar el muestreo a la nueva variable. Por las características de la prueba, el método se aplica sólo a las pruebas de eje directo. El procedimiento requiere de la inspección visual de la información y de su filtrado o suavización. Finalmente, se hacen las transformaciones de Fourier directa e inversa. Este método es formal pero impráctico, requiere procesamiento excesivo.

Los métodos que garantizan una solución adecuada a este problema de estimación son las técnicas de optimización sin restricciones. La técnica utilizada es la de los poliedros flexibles de Nelder-Mead, que no es eficiente desde el punto de vista computacional porque requiere de repetidas evaluaciones de la función objetivo, que en nuestro caso es la suma de los errores al cuadrado, el tiempo que tarda en resolver la aplicación es del orden de segundos o menos.

Finalmente, la descripción de las metodologías para determinar los parámetros de las curvas de decremento de voltaje permite su aplicación a sistemas de otras áreas del conocimiento que tienen el mismo modelo para su comportamiento. Esta aplicación no es directa porque en algunos casos la precisión de los resultados no es la que se requiere. De hecho, los métodos expuestos son solo una parte. La evaluación de otras técnicas puede compararse o hacerse con otro enfoque.

La aplicación de las diferentes técnicas analizadas permite discriminar la metodología a elegir considerando el mejor ajuste. Otros detalles que se consideran son la familiaridad con los procedimientos y la dificultad en el procesamiento de la información, ya que algunos métodos lo requieren en forma considerable. En las tablas anteriores se puede observar que los parámetros de la región transitoria no presentan dificultad en su determinación. En la región subtransitoria es necesario hacer el ajuste

poco después de iniciado el transitorio para no incluir los valores con retardo. Para el procesamiento se consideran valores no mayores que la unidad para evitar sobre flujo al evaluar el modelo. Se observa que el error cuadrático medio acumulado es parecido. En algunos métodos se presenta, en forma cualitativa, un error notorio en los primeros instantes del evento entre los valores reales y los valores estimados.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## CAPITULO 5

### CASO DE ESTUDIO

El propósito de este capítulo es la determinación de los parámetros eléctricos considerando las curvas de decremento de voltaje, para los ejes directo y en cuadratura, obtenidas mediante pruebas de rechazo de carga en sitio a una máquina síncrona real. El objetivo, también, es aplicar las herramientas digitales desarrolladas y las metodologías de estimación estudiadas en el capítulo 4.

#### 5.1 CARACTERISTICAS DEL GENERADOR.

En la Tabla 5.1 se muestran los datos de placa característicos del generador síncrono bajo estudio.

TABLA 5.1  
DATOS DE LA MAQUINA

VARIABLE	VALOR	UNIDAD
Potencia nominal	185	MVA
Voltaje nominal entre fases	15000	VOLTS
Corriente nominal	7120	A
Voltaje de excitación	270	VOLTS
Velocidad nominal	3600	RPM
Corriente de excitación	485	A

## 5.2 VALORES BASE.

Las cantidades base, considerando una potencia de 100 MVA, son:

$$I_b = \frac{\text{Potencia nominal}}{\text{Voltaje nominal}} = \frac{S}{\sqrt{3} V} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{(3)} 15 \text{ kV}} = 3849 \text{ A}$$

Los valores en por unidad de la corriente en el estator y el voltaje en terminales del estator se calculan como:

$$I_{pu} = \frac{\text{Corriente medida}}{\text{Corriente base}}$$

$$V_{pu} = \frac{\text{Voltaje medido}}{\text{Voltaje base}}$$

## 5.3 PRUEBAS DE RECHAZO DE CARGA.

Las pruebas de rechazo de carga realizadas se indican en la Tabla 5.2.

TABLA 5.2

### PRUEBAS DE RECHAZO DE CARGA

Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVAR)	Prueba
0	- 50	Eje D
50	- 27	Eje Q
50	- 20	Eje Q
40	+ 10	Verificación

### 5.3.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS DE RECHAZO.

A continuación se muestran parte de los resultados experimentales que se registraron en una computadora personal al realizar las pruebas de rechazo de carga descritas en la Tabla 5.2. Las Figuras 5.1 a 5.28 muestran gráficamente el comportamiento en el tiempo de las variables de interés para cada una de las pruebas.

"PRUEBA EJE DIRECTO"

"P = 0 Q = - 50 MVAR"

"V GEN" "POTENCIA" "REACTIVO" "I FIELD" "V FIELD" "VELOC." "I ARMADU" "TIEMPO"

"KV" "MW" "MVAR" "AMP DC" "V DC" "RPM" "AMP" "SEG"

14.4104	3.2982	-46.8324	240.2344	40.0391	3604.9805	1864.6101	0.0000
14.4104	3.2982	-46.8324	242.1875	40.5273	3604.9805	1859.5222	0.0167
14.4104	3.2982	-46.8324	240.2344	40.0391	3604.9805	1859.5222	0.0333
14.4012	3.2982	-46.8324	240.2344	40.5273	3604.9805	1864.6101	0.0500
14.4104	3.2982	-46.8324	240.2344	40.5273	3604.9805	1859.5222	0.0667

"PRUEBA DE EJE EN CUADRATURA"

"P = 50 MW Q = - 27 MVAR"

"V GEN" "POTENCIA" "REACTIVO" "I FIELD" "V FIELD" "VELOC." "I ARMADU" "TIEMPO"

"KV" "MW" "MVAR" "AMP DC" "V DC" "RPM" "AMP" "SEG"

14.7491	53.5330	-25.0009	419.9219	70.3125	3597.1436	2144.4441	0.0000
14.7491	53.2793	-25.0009	419.9219	70.3125	3604.9805	2144.4441	0.0167
14.7400	53.2793	-25.0009	417.9688	70.3125	3604.9805	2144.4441	0.0333
14.7400	53.2793	-25.0009	417.9688	70.3125	3604.9805	2139.2562	0.0500
14.7491	53.0256	-25.1029	417.9688	70.3125	3604.9805	2134.2683	0.0667

"PRUEBA DE EJE EN CUADRATURA"

"P = 50 MW Q = - 20 MVAR"

"V GEN" "POTENCIA" "REACTIVO" "I FIELD" "V FIELD" "VELOC." "I ARMADU" "TIEMPO"

"KV" "MW" "MVAR" "AMP DC" "V DC" "RPM" "AMP" "SEG"

15.2893	51.7570	-19.6960	457.0313	76.6602	3604.9805	1920.5769	0.0000
15.2893	51.5033	-19.7980	455.0781	76.6602	3604.9805	1915.4890	0.0167
15.2893	51.5033	-19.7980	457.0313	76.6602	3604.9805	1915.4890	0.0333
15.2893	51.5033	-19.7980	455.0781	76.6602	3604.9805	1910.4011	0.0500
15.2893	51.5033	-19.7980	455.0781	76.6602	3604.9805	1910.4011	0.0667

"PRUEBA DE VERIFICACION DE PARAMETROS"

"P = 40 MW Q = + 10 MVAR"

"V GEN" "POTENCIA" "REACTIVO" "I FIELD" "V FIELD" "VELOC." "I ARMADU" "TIEMPO"

"KV" "MW" "MVAR" "AMP DC" "V DC" "RPM" "AMP" "SEG"

15.5548	41.8623	10.1949	562.5000	94.2383	3597.1436	1432.1394	0.0000
15.5548	41.6086	10.1949	562.5000	94.7266	3597.1436	1432.1394	0.0167
15.5548	41.6086	10.1949	562.5000	94.7266	3597.1436	1427.0515	0.0333
15.5548	41.6086	10.1949	564.4531	94.2383	3597.1436	1427.0515	0.0500
15.5548	41.6086	10.1949	564.4531	94.7266	3597.1436	1421.9636	0.0667

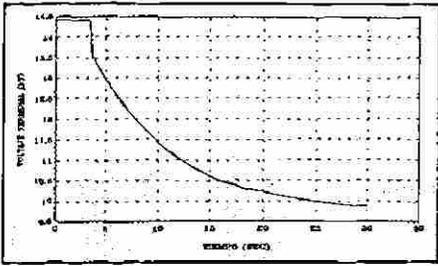


Fig. 5.1 Voltaje terminal ( $P=0, Q=-50$ ).

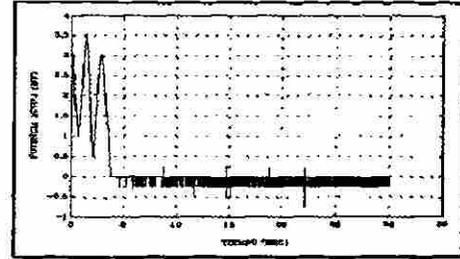


Fig. 5.2 Potencia activa ( $P=0, Q=-50$ ).

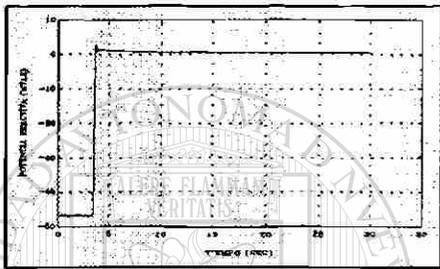


Fig. 5.3 Potencia reactiva ( $P=0, Q=-50$ ).

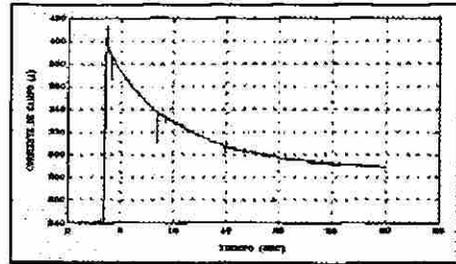


Fig. 5.4 Corriente de campo ( $P=0, Q=-50$ ).

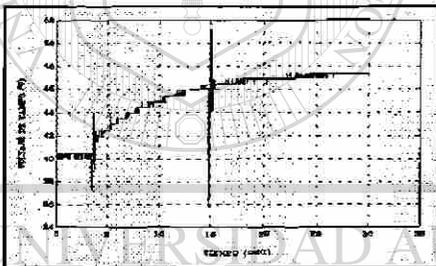


Fig. 5.5 Voltaje de campo ( $P=0, Q=-50$ ).



Fig. 5.6 Velocidad ( $P=0, Q=-50$ ).

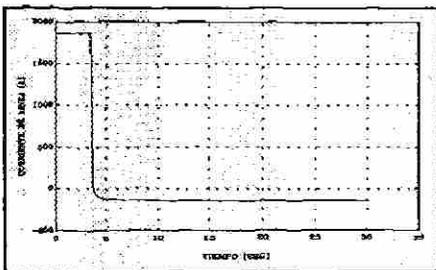


Fig. 5.7 Corriente de línea ( $P=0, Q=-50$ ).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

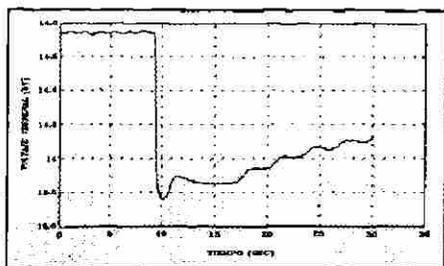


Fig. 5.8 Voltaje terminal ( $P=50, Q=-27$ ).

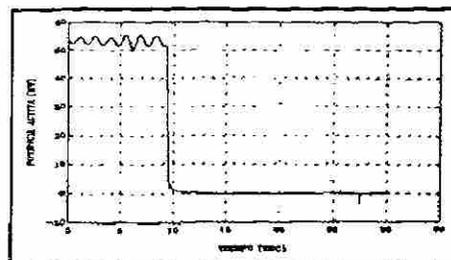


Fig. 5.9 Potencia activa ( $P=50, Q=-27$ ).

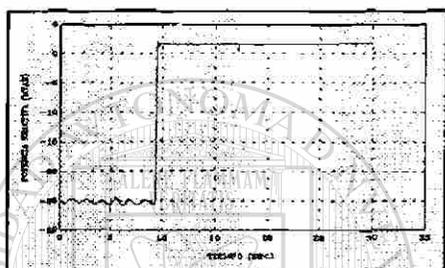


Fig. 5.10 Potencia reactiva ( $P=50, Q=-27$ ).

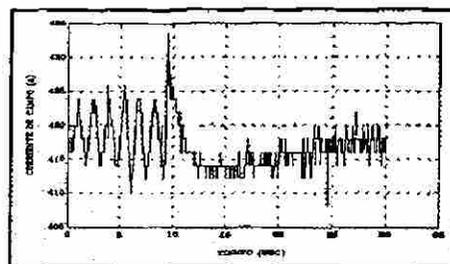


Fig. 5.11 Corriente de campo ( $P=50, Q=-27$ ).

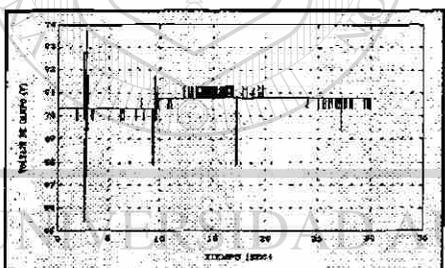


Fig. 5.12 Voltaje de campo ( $P=50, Q=-27$ ).

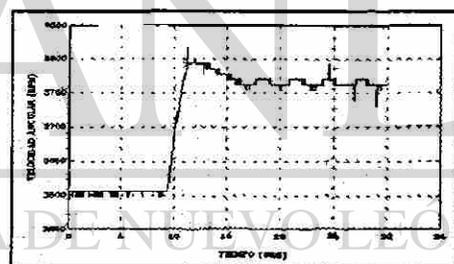


Fig. 5.13 Velocidad ( $P=50, Q=-27$ ).

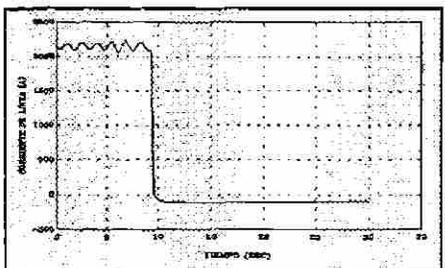


Fig. 5.14 Corriente de línea ( $P=50, Q=-27$ ).

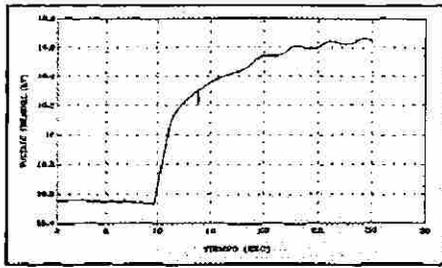


Fig. 5.15 Voltaje terminal ( $P=40, Q=+10$ ).

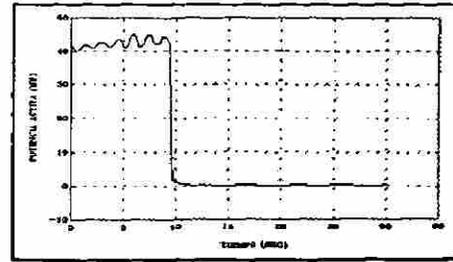


Fig. 5.14 Potencia activa ( $P=40, Q=+10$ ).

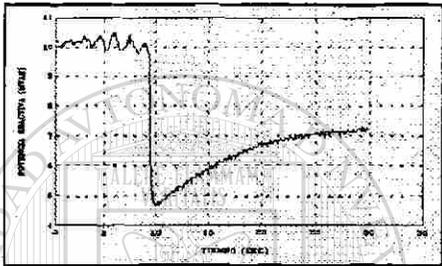


Fig. 5.17 Potencia reactiva ( $P=40, Q=+10$ ).

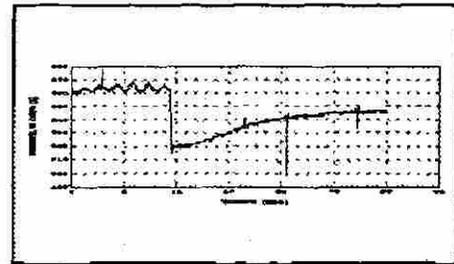


Fig. 5.18 Corriente de campo ( $P=40, Q=+10$ ).

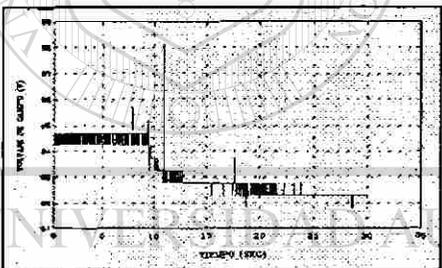


Fig. 5.19 Voltaje de campo ( $P=40, Q=+10$ ).

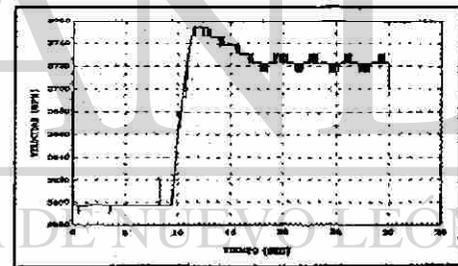


Fig. 5.20 Velocidad ( $P=40, Q=+10$ ).

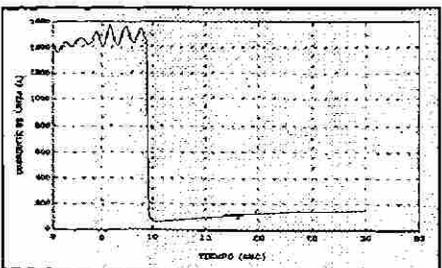


Fig. 5.21 Corriente de línea ( $P=40, Q=+10$ ).

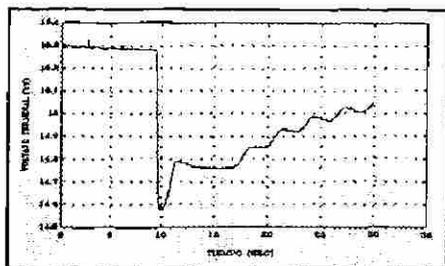


Fig. 5.22 Voltaje terminal ( $P=50, Q=-20$ ).

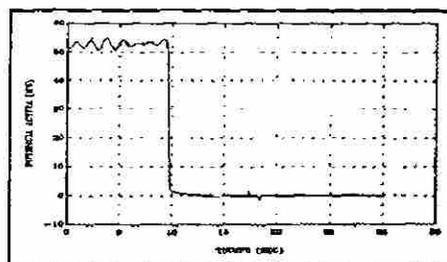


Fig. 5.23 Potencia activa ( $P=50, Q=-20$ ).



Fig. 5.24 Potencia reactiva ( $P=50, Q=-20$ ).

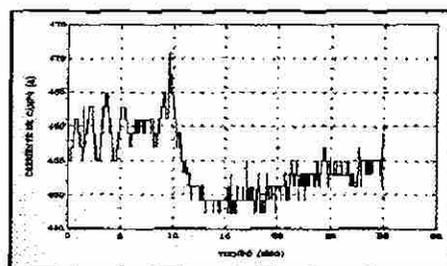


Fig. 5.25 Corriente de campo ( $P=50, Q=-20$ ).

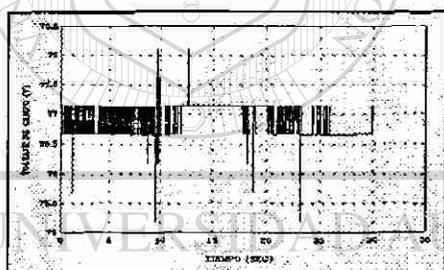


Fig. 5.26 Voltaje de campo ( $P=50, Q=-20$ ).

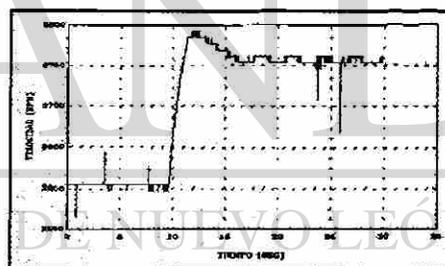


Fig. 5.27 Velocidad ( $P=50, Q=-20$ ).

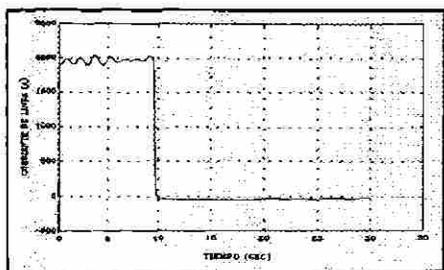


Fig. 5.28 Corriente de línea ( $P=50, Q=-20$ ).

#### 5.4 CURVA DE SATURACION EN VACIO.

Para propósitos de corrección del voltaje en terminales por variación en la corriente de campo y para modelar el efecto de la saturación es importante considerar la curva de saturación en vacío. La Figura 5.29 muestra gráficamente la curva característica de la máquina bajo estudio.

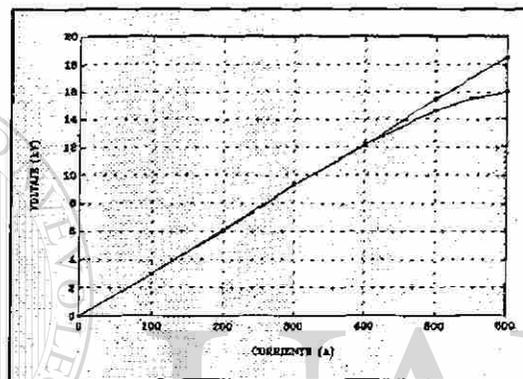


Fig. 5.29 Curva de saturación del generador.

#### 5.5 PARAMETROS DE EJE DIRECTO.

Para la determinación de los parámetros del eje directo se utilizan los resultados de la prueba para el eje  $d$ , según la Tabla 5.2, con las condiciones  $P=0$  MW y  $Q=-50$  MVAR. En las Figuras 5.1 a 5.7 se muestra gráficamente el comportamiento de las variables de interés.

##### 5.5.1 CORRIENTE DE LINEA.

La determinación de la corriente inicial en el estator se hace en base a la Figura 5.7, esta variable es importante porque el cambio brusco en magnitud, debido al rechazo

de carga, permite conocer el tiempo de inicio del disturbio. El valor inicial de la corriente se toma como el promedio de  $N$  valores medidos antes del disturbio:

$$I_d(0^-) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_d(n\tau) = 1860 \text{ A}$$

donde  $\tau$  es el intervalo de medición.

Para determinar el inicio del disturbio se calcula su derivada respecto al tiempo como:

$$\frac{d}{dt} I_d(t) \approx \frac{I_d[(m+1)\tau] - I_d[(m-1)\tau]}{2\tau} \quad m = 2, \dots, M-1$$

donde  $M$  es la última medición del evento total.

Las Figuras 5.30 y 5.31 muestran la corriente en el estator y su derivada, respectivamente.

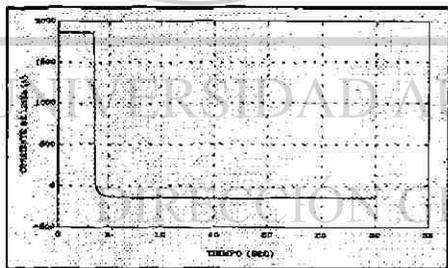


Fig. 5.30 Corriente de armadura.

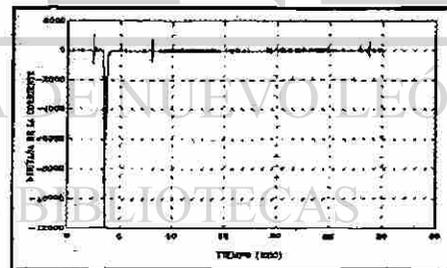


Fig. 5.31 Derivada de la corriente de armadura.

## 5.5.2 VOLTAJE EN TERMINALES.

El registro del voltaje en terminales es importante ya que el valor de las reactancias está en función de los decrementos de voltaje. La Figura 5.1 muestra la

gráfica del voltaje registrado.

El valor inicial del voltaje terminal se toma como el promedio de N valores medidos antes del disturbio:

$$V_t(0^-) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_t(n\tau) = 14410 \text{ V}$$

donde  $\tau$  es el intervalo de medición y N es la última medición antes del disturbio.

El voltaje final, también importante, se obtiene como el promedio de M valores tomados de la región en estado permanente, como:

$$V_t(\infty) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M V_t(m\tau) = 9741 \text{ V}$$

### 5.5.3 APLICACION DE TERMINOS DE CORRECCION AL VOLTAJE TERMINAL.

La corrección al voltaje terminal se hace en base a la variación de la corriente de campo en su valor final respecto a su valor inicial, ya que un cambio en la magnitud de la corriente se traduce en una variación del flujo magnético que a su vez provoca un cambio en el voltaje inducido en el estator. La Figura 5.4 muestra gráficamente el comportamiento de la corriente de campo. El cambio en el valor de la corriente de campo se calcula como la diferencia entre los promedios de M valores registrados antes del disturbio y de N valores tomados después del disturbio:

$$\Delta I_f = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_f(n\tau) \right] - \left[ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I_f(m\tau) \right] = 51.21 \text{ A}$$

El cambio en el voltaje terminal debido al cambio en la corriente de campo se determina utilizando la región lineal de la curva característica de la máquina que se mostró en la sección 5.4.

El cambio asociado en el voltaje terminal es:

$$\Delta V_t = 1596 \text{ V}$$

La corrección del voltaje terminal en estado permanente es:

$$V_t(\infty) = 9741 - 1596 = 8145 \text{ V}$$

Es preciso mencionar que en la prueba de rechazo de carga para determinar los parámetros del eje directo la velocidad angular no varía sensiblemente por lo que no es necesario aplicar corrección al voltaje terminal por cambio en la velocidad.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

#### 5.5.4 CONSTANTES DE TIEMPO TRANSITORIA Y SUBTRANSITORIA.

El registro del voltaje terminal es usado para calcular las constantes de tiempo expresadas en (4.1). La Figura 5.32 muestra gráficamente los valores registrados y los resultados del modelo ajustado. La Figura 5.33 muestra gráficamente el comportamiento del error entre el valor medido y el valor estimado por el modelo, aquí se puede observar en forma cualitativa la dificultad para determinar los parámetros de la región subtransitoria.

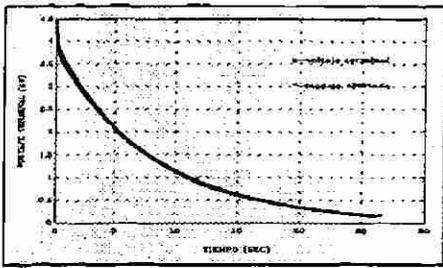


Fig. 5.32 Voltaje terminal y valores estimados.

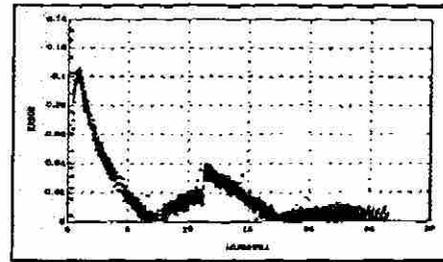


Fig. 5.33 Error del valor estimado.

Los resultados obtenidos son:

$$\tau_1 = 8.264 \text{ seg}$$

$$\tau_2 = 0.160 \text{ seg}$$

Otra forma de calcular las constantes de tiempo es usando el registro de la corriente de campo. La Figura 5.34 muestra la curva de corriente de campo registrada y los valores estimados.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

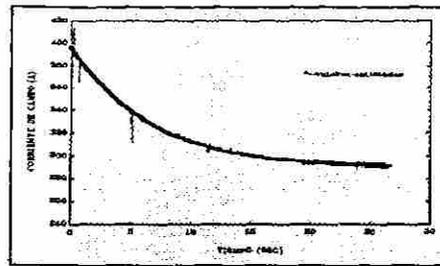


Fig. 5.34 Estimación de la corriente de campo.

El procedimiento para calcular la constante de tiempo considera que:

$$I_f(t_1) = A e^{\alpha_1 t_1}$$

$$I_f(t_2) = A e^{\alpha_1 t_2}$$

Aplicando el logaritmo natural a las expresiones anteriores, se obtiene:

$$\ln[I_f(t_1)] = \ln[A] + \alpha_1 t_1$$

$$\ln[I_f(t_2)] = \ln[A] + \alpha_1 t_2$$

En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln[A] \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln[I_f(t_1)] \\ \ln[I_f(t_2)] \end{bmatrix}$$

El procedimiento anterior es similar al método analítico expuesto dentro de las técnicas de estimación del capítulo 4.

Los resultados obtenidos son:

$$\tau_1 = 7.775 \text{ seg}$$

### 5.5.5 MODELO DE SEGUNDO ORDEN PARA EL EJE DIRECTO.

En la Tabla 5.3 se muestra la aplicación de mínimos cuadrados a un modelo lineal para determinar los parámetros de la curva de decremento de voltaje para la prueba de eje directo.

TABLA 5.3  
RESULTADOS DEL MODELO DE SEGUNDO ORDEN

PARAMETRO	VALOR
$A_d$	3.81 kV
$\alpha_1$	-0.12 1/s
$B_d$	0.75 kV
$\alpha_2$	-6.22 1/s
$V_t(0^+)$	14.10 kV
$V_t(0^-)$	14.42 kV
$V_t(\infty)$	8.30 kV

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



### 5.5.6 CALCULO DE PARAMETROS PARA EL EJE DIRECTO.

Reactancia síncrona

$$X_d = \frac{\left[ \frac{V_t(0^-) - V_t(\infty)}{V_b} \right]}{\left[ \frac{I_d(0^-)}{I_b} \right]} pu$$

Reactancia transitoria

$$X_d' = \frac{\left[ \frac{V_t(0^-) - V_t(\infty) - A_d}{V_b} \right]}{\left[ \frac{I_d(0^-)}{I_b} \right]} \text{ pu}$$

Reactancia subtransitoria

$$X_d'' = \frac{\left[ \frac{V_t(0^-) - V_t(0^+)}{V_b} \right]}{\left[ \frac{I_d(0^-)}{I_b} \right]} \text{ pu}$$

En la Tabla 5.4 se resumen los resultados obtenidos para el eje directo.

TABLA 5.4  
PARAMETROS DE EJE DIRECTO

PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR
Reactancia Síncrona (pu)	$X_d$	0.8657
Reactancia Transitoria (pu)	$X_d'$	0.3400
Reactancia Subtransitoria (pu)	$X_d''$	0.0413
Constante de Tiempo Transitoria (seg)	$T_{d'}$	8.280
Constante de Tiempo Subtransitoria (seg)	$T_{d''}$	0.160

## 5.6 PARAMETROS DE EJE EN CUADRATURA.

Para la determinación de los parámetros del eje en cuadratura se utilizan los resultados de la prueba para el eje  $q$ , según la Tabla 5.2, con las condiciones  $P=50$  MW y  $Q=-27$  MVAR. En las Figuras 5.8 a 5.14 se muestra gráficamente el comportamiento de las variables de interés.

### 5.6.1 CORRIENTE DE LINEA.

De la misma manera como se calculó  $I_d$  en la sección 5.5.1, la determinación de la corriente inicial en el estator se hace en base a la Figura 5.14, esta variable es importante porque el cambio brusco en magnitud, debido al rechazo de carga, permite conocer el tiempo de inicio del disturbio. También es necesaria su determinación porque las reactancias están expresadas como la razón de los decrementos del voltaje en terminales y la corriente inicial. El valor calculado de la corriente inicial es:

$$I_q(0^-) = 1964 \text{ A}$$

Para determinar el inicio del disturbio se calcula, también, la derivada de la corriente de línea. Las Figuras 5.14 y 5.35 muestran la corriente en el estator y su derivada, respectivamente.

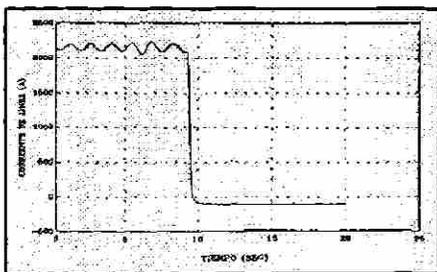


Fig. 5.14 Corriente de armadura.

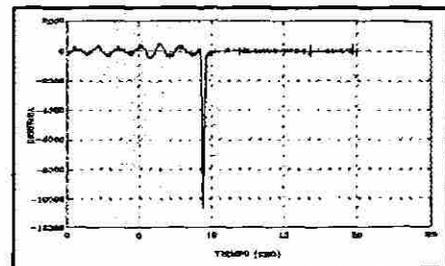


Fig. 5.35 Derivada de la corriente de armadura.

### 5.6.2 VOLTAJE EN TERMINALES.

El registro del voltaje en terminales es importante ya que el valor de las reactancias está en función de los decrementos de voltaje. La Figura 5.36 muestra la gráfica del voltaje registrado.

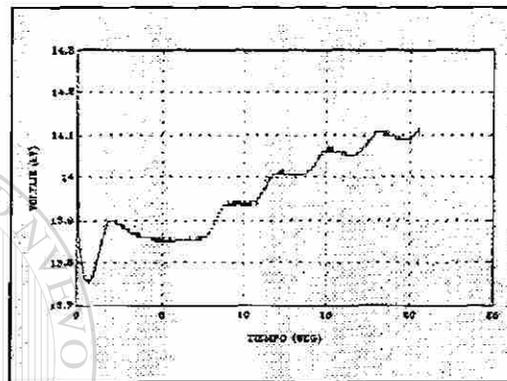


Fig. 5.36 Voltaje en terminales.

El procedimiento para calcular el voltaje inicial en terminales es similar al mostrado en la sección 5.5.2. El valor calculado del voltaje inicial en terminales es:

$$V_t(0^-) = 14774 \text{ V}$$

### 5.6.3 APLICACION DE TERMINOS DE CORRECCION AL VOLTAJE TERMINAL.

La corrección al voltaje terminal se hace en base a la variación de la velocidad inicial a su valor inicial, ya que un cambio en la magnitud de la velocidad se traduce en un incremento en el voltaje inducido en el estator. La Figura 5.37 muestra gráficamente el comportamiento de la velocidad. Para determinar el cambio en el voltaje terminal debido al cambio en la velocidad se utiliza la expresión siguiente:

$$V_{tc} = V_{tr} \frac{f_o}{f_r}$$

donde  $V_{tr}$  es el voltaje registrado,  $V_{tc}$  es el voltaje corregido,  $f_o$  es la frecuencia nominal, y  $f_r$  es la frecuencia registrada.

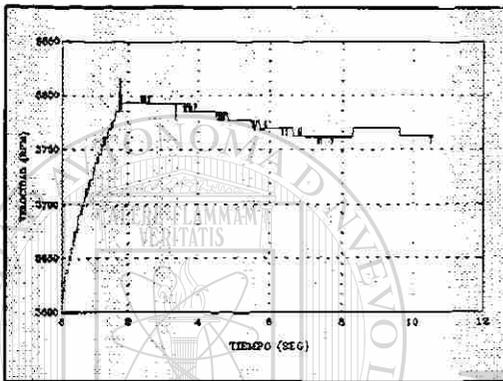


Fig. 5.37 Comportamiento de la velocidad.

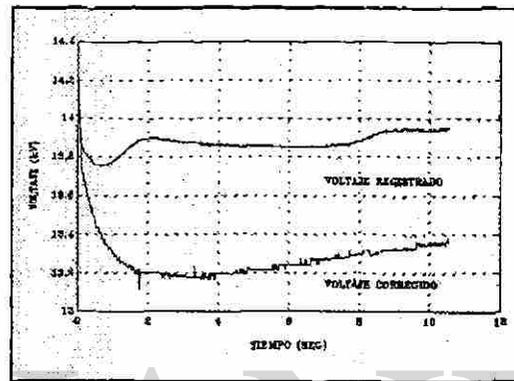


Fig. 5.38 Corrección del voltaje por velocidad.

El voltaje final, también importante, se obtiene como el promedio de  $M$  valores tomados de la región en estado permanente, como:

$$V_t(\infty) = 13170 \text{ V}$$

Los resultados mostrados en las Figuras 5.11 y 5.12 indican que no es necesario hacer la corrección al voltaje terminal por variación en la corriente de campo. De hecho la variación observada, menor al 3 por ciento, no requiere de corrección.

#### 5.6.4 CONSTANTES DE TIEMPO TRANSITORIA Y SUBTRANSITORIA.

El registro del voltaje terminal es usado para calcular las constantes de tiempo expresadas en (4.1). La Figura 5.39 muestra gráficamente los valores registrados y los

valores estimados.

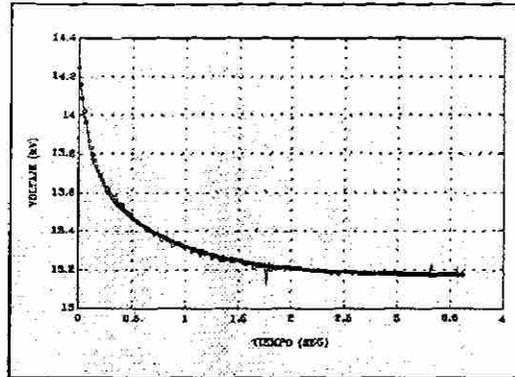


Fig. 5.39 Valores registrados y valores estimados.

Las constantes de tiempo se obtienen aplicando la técnica de estimación a un modelo lineal. La región subtransitoria presenta dificultad para su estudio. Los valores calculados son:

$$\tau_1 = 0.7341 \text{ seg}$$

$$\tau_2 = 0.102 \text{ seg}$$

### 5.6.5 MODELO DE SEGUNDO ORDEN PARA EL EJE EN CUADRATURA

En la Tabla 5.5 se muestra la aplicación de mínimos cuadrados a un modelo lineal para determinar los parámetros de la curva de decremento de voltaje para la prueba de eje directo.

TABLA 5.5  
RESULTADOS DEL MODELO DE SEGUNDO ORDEN

PARAMETRO	VALOR
$A_q$	0.58 kV
$\alpha_1$	-1.36 1/s
$B_q$	0.49 kV
$\alpha_2$	-9.78 1/s
$V_i(0^+)$	14.23 kV
$V_i(0^-)$	14.77 kV
$V_i(\infty)$	13.17 kV

### 5.6.6 CALCULO DE PARAMETROS PARA EL EJE EN CUADRATURA.

Reactancia síncrona

$$X_q = \sqrt{\frac{\left[\frac{V_i(0^-)}{V_b}\right]^2 - \left[\frac{V_i(\infty)}{V_b}\right]^2}{\left[\frac{I_q(0^-)}{I_b}\right]}} \text{ pu}$$

Reactancia transitoria

$$X_q' = \frac{\sqrt{\left[\frac{V_t(0^-)}{V_b}\right]^2 - \left[\frac{V_t(\infty)}{V_b}\right]^2} - \sqrt{\left[\frac{V_t(\infty) + A_q}{V_b}\right]^2 - \left[\frac{v_t(\infty)}{V_b}\right]^2}}{\left[\frac{I_q(0^-)}{I_b}\right]} \text{ pu}$$

Reactancia subtransitoria

$$X_q'' = \frac{\sqrt{\left[\frac{V_t(0^-)}{V_b}\right]^2 - \left[\frac{V_t(\infty)}{V_b}\right]^2} - \sqrt{\left[\frac{V_t(0^+)}{V_b}\right]^2 - \left[\frac{v_t(\infty)}{V_b}\right]^2}}{\left[\frac{I_q(0^-)}{I_b}\right]} \text{ pu}$$

En la Tabla 5.6 se resumen los resultados para el eje en cuadratura.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA 5.6  
PARAMETROS DE EJE EN CUADRATURA

PARAMETRO	SIMBOLO	VALOR
Reactancia Sincrona (pu)	$X_q$	0.82
Reactancia Transitoria (pu)	$X_q'$	0.23
Reactancia Subtransitoria (pu)	$X_q''$	0.01
Constante de Tiempo Transitoria (seg)	$T_{q'}$	0.752

## 5.7 CONSTANTE DE INERCIA.

La variación de la velocidad en esta prueba permite determinar la constante de inercia. Se asume que en los primeros instantes después del rechazo de carga el cambio en la velocidad está relacionado con la inercia. La razón de cambio de la velocidad en el registro de la velocidad contra el tiempo, es la pendiente de la recta calculada en la parte lineal. La Figura 5.39 se muestra gráficamente el comportamiento de la velocidad en los primeros instantes y la ecuación lineal estimada.

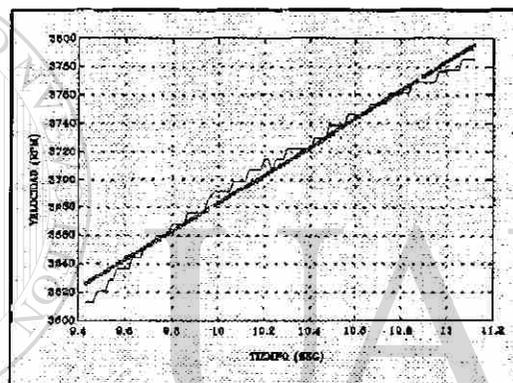


Fig. 5.39 Variación de la velocidad.

El resultado que se obtiene al sustituir en la expresión siguiente es:

$$H = \frac{[P_m - P_e] f_o}{2 \frac{df}{dt}} = \frac{(0.53) 60.06}{2 (2.67)} = 5.947 \text{ seg}$$

## 5.8 PRUEBA DE VERIFICACION.

El objetivo de la prueba de verificación es la validación de los parámetros calculados en las pruebas mencionadas en las secciones 5.5 y 5.6. Esta prueba es necesaria para el proceso de ajuste de los parámetros obtenidos ya que, por las características de las pruebas, los resultados obtenidos tienen imprecisiones debidas a los retardos en la región subtransitoria, a la distorsión en las mediciones, a las no linealidades, al contenido de ruido de los registros y, entre otras causas, al error de la medición. En la prueba de verificación las condiciones de operación que se usan no corresponden a algún eje específicamente, sino que tiene componentes en ambos ejes. Los resultados que se usan corresponden a la prueba, según la Tabla 5.2, con las condiciones  $P=40$  y  $Q=10$ . Las Figuras 5.15 a 5.21 muestran gráficamente el comportamiento de las variables de interés.

Una característica importante de la prueba es que en esta condición de operación la máquina está sobreexcitada ya que aporta reactivos al sistema. En este punto es necesario además de hacer el ajuste y la verificación contemplar el efecto de la saturación. Para validar los resultados se debe simular los rechazos de carga con los parámetros estimados e introducir términos de ajuste.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 INTRODUCCION.

Durante el desarrollo del presente trabajo de investigación se ha analizado con cierto detalle las características y la problemática que encierra la prueba de rechazo de carga para la determinación de parámetros de generadores síncronos. Se ha puesto especial énfasis en el aspecto teórico de la prueba y en las metodologías para la estimación, así como en el procedimiento para la determinación de parámetros sin descuidar la parte de instrumentación y procesamiento de la información.

#### 6.2 CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación permiten concluir lo siguiente:

##### Modelo del generador

- El modelo de segundo orden puede representar efectos subtransitorios. Sin embargo, el éxito en la determinación depende de la instrumentación utilizada.
- Un modelo de mayor orden conlleva a un problema de estimación más complejo.

### Método de prueba

- La prueba de rechazo de carga permite obtener el valor de los parámetros eléctricos del generador sin poner en riesgo la integridad del generador y del personal. Además la prueba de rechazo de carga es sencilla y fácil de implementar.

### Pruebas de eje directo

- La condición de potencia activa igual a cero es difícil de lograr debido al tiempo de respuesta del control del sistema mecánico.
- La aceleración de la máquina después del rechazo no afecta de manera significativa el voltaje en terminales.
- Las regiones transitoria y subtransitoria están bien definidas.

---

### Pruebas de eje en cuadratura

- Para determinar el punto de operación es necesario realizar varios rechazos de carga hasta lograr que la variación de la corriente de campo sea cero.
- En esta prueba es necesario hacer la corrección al voltaje terminal debido a la aceleración de la máquina.
- Las regiones transitorias y subtransitorias tienen constantes de tiempo parecidas y por lo tanto existe dificultad para su determinación.

## Instrumentación

- El registro del voltaje terminal, la corriente de campo, el voltaje de campo y la velocidad son indispensables para el método de rechazo de carga. Es importante registrar las condiciones en estado permanente antes y después del disturbio.
- El uso de transductores con retardos de tiempo considerables dificulta o impide el estudio de la región subtransitoria.
- Es necesaria la calibración del equipo de medición para mejorar la confiabilidad de los resultados.

### Filtrado

- Las mediciones registradas muestran ruido y distorsión que es necesario suprimir o atenuar aplicando filtrado digital, técnicas de suavización o ajuste de curvas.

- En las pruebas realizadas se observó que la presencia de ruido es considerable en los registros de la corriente de campo y el voltaje de campo.

- El ruido en los registros de los valores instantáneos de las variables eléctricas del estator no es de consideración.

### Metodologías

- El método gráfico y el método analítico son recomendables para cálculos preliminares. Su aplicación se recomienda para la prueba de eje directo.
- El modelo lineal con mínimos cuadrados sólo se recomienda para la prueba de eje directo. El método es sencillo, rápido y proporciona ajustes razonables.
- Las técnicas de Fourier y las que se basan en redes neuronales no son recomendables ya que no se obtuvieron resultados aceptables y sus requerimientos computacionales son excesivos.
- Las técnicas de optimización, específicamente el método directo de Nelder-Mead, se adaptan bien al problema de estimación de parámetros del generador. Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas son buenos.

### 6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

**Procesamiento de señales.** El registro de los valores de las variables eléctricas de interés inmediatamente después del disturbio es afectado por el tiempo de respuesta de los transductores y el ruido. Esto hace que la región subtransitoria muestre retardo y distorsión que dificulta la determinación de los parámetros asociados. Para mejorar la estimación de parámetros de la región subtransitoria se recomienda evaluar nuevos transductores digitales así como filtros digitales eficientes para la obtención de registros adecuados.

**Saturación.** Es importante profundizar en el estudio de la saturación porque afecta el valor de los parámetros del generador. La investigación debe proporcionar una metodología para la corrección paramétrica y la inclusión de los efectos de la saturación en el comportamiento dinámico de la máquina.

**Detección del ángulo de carga.** Se sugiere desarrollar la instrumentación necesaria para detectar en forma automática las condiciones para la prueba de rechazo de carga en el eje en cuadratura.

**Estimación en línea.** Se recomienda investigar nuevos algoritmos y desarrollar la instrumentación necesaria para realizar la estimación de parámetros sin desconectar el generador síncrono del sistema.

**Parámetros del sistema gobernador de velocidad y del sistema de excitación.** Por las características de la prueba de rechazo de carga es posible hacer la determinación de los parámetros de los sistemas de excitación y de gobernación de velocidad. Es recomendable hacer estudios sobre estos sistemas considerando su implementación experimental y las técnicas de estimación desarrolladas.

#### 6.4 APORTACIONES.

Enseguida se enumeran las contribuciones de este trabajo de investigación y que a juicio del autor son las más importantes.

**Metodologías para la estimación.** Se presentó un análisis comparativo de diversas técnicas para la estimación de parámetros. La investigación analiza con detalle las características de las metodologías estudiadas, concluyendo sobre la factibilidad de su aplicación.

**Desarrollo de un simulador digital.** Se desarrollaron rutinas para el procesamiento de la información registrada en pruebas experimentales. El simulador desarrollado permite realizar el filtrado digital de señales, la estimación de parámetros, el ajuste de curvas, y el manejo de archivos. Los transductores digitales desarrollados permiten calcular valores eficaces y la frecuencia de las variables del estator.

# APENDICE A

## PROGRAMA DIGITAL PARA LA ESTIMACION DE PARAMETROS

### A.1 INTRODUCCION.

Las pruebas experimentales en cualquier rama de la ingeniería requiere del manejo apropiado de los datos de prueba. En algunos casos los datos registrados son pocos pero suficientes para tomar decisiones y obtener resultados. Para el caso de la prueba de rechazo de carga los registros obtenidos son tan grandes que no pueden ser leídos por algunos programas de edición digital ni procesados directamente por los paquetes computacionales existentes. Para resolver este problema se consideró razonable dividirlo en problemas pequeños cuya solución depende de una serie de rutinas implementadas en FORTRAN. Esta serie de programas están ubicados dentro de un programa general denominado PARGEN, cuyo objetivo es el manejo y procesamiento de los registros de prueba.

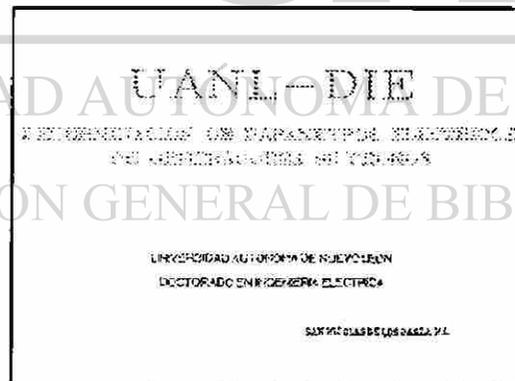


Fig. A.1 Pantalla de entrada el programa.

## A.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.

El programa funciona bajo ambiente DOS, requiere al menos 640 Kb de memoria RAM, monitor VGA, procesador 386 con coprocesador matemático. El programa ejecutable se denomina *pargen.exe*.

El programa está constituido por una serie de menús y submenús, en cada caso la entrada es por teclado. El programa siempre pide un archivo de trabajo cuyo contenido puede ser un vector o una matriz de datos. Los archivos deben estar acotados al principio y al final por los identificadores, *ini* y *fin*, respectivamente.

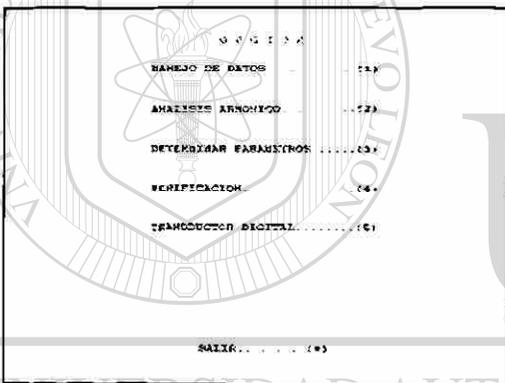


Fig. A.2 Menú principal del programa.

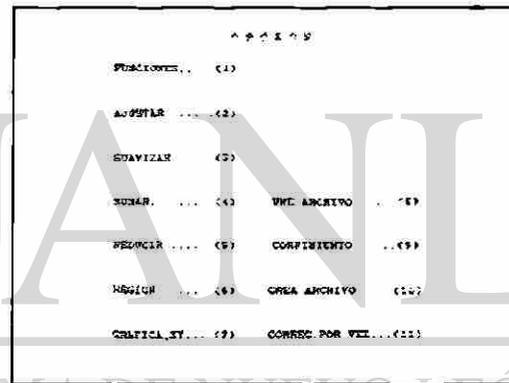


Fig. A.3 Menú de manejo de datos.

Las opciones que maneja son claras y específicas. En el caso de *manejo de datos* se pueden graficar e imprimir datos, crear archivos más pequeños, hacer ajuste polinomial, suavizar datos, etc.

En la opción de *transductores digitales* una tarea importante es la obtención de valores eficaces y la frecuencia.

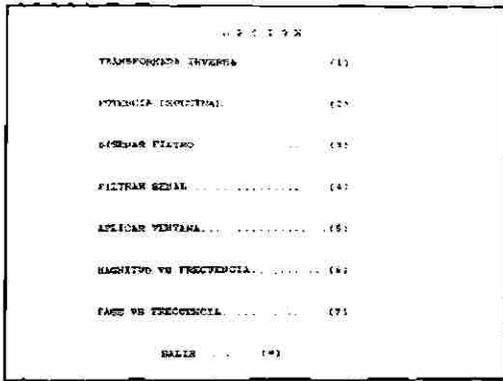


Fig. A.4 Menú para el análisis armónico de datos.

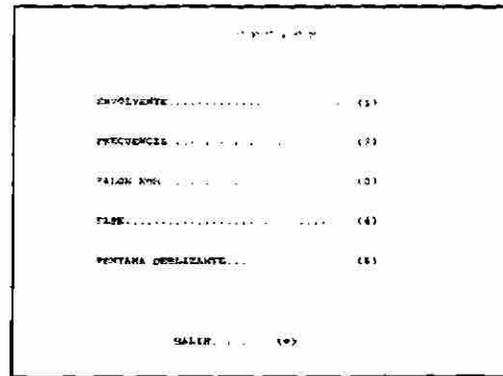


Fig. A.5 Menú de opciones en transductores digitales.

Para la opción de *análisis armónico* muchas de las tareas se contemplan para el estudio de los datos en el dominio de la frecuencia y filtrado de los mismos.

En la opción de *determinación de parámetros* el objetivo es obtener los parámetros del modelo de segundo orden que se aplica a las curvas de decremento de voltaje.

En algunos submenús existen opciones de interés como es el caso de *funciones*, donde se tienen las tareas *por unidad* y *derivada*.

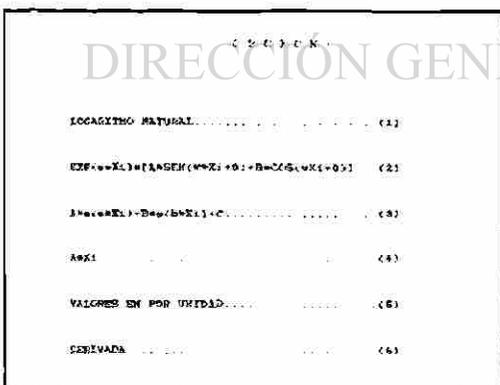


Fig. A.6 Algunas tareas útiles en la opción de funciones.

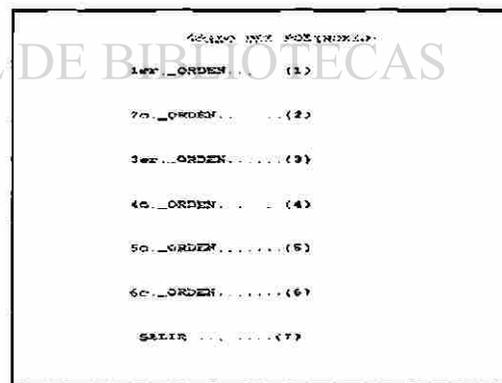


Fig. A.7 Menú de ajuste polinomial.

En la opción *ajuste polinomial* se pueden obtener ajustes polinomiales hasta de sexto grado. Lo mismo sucede con la *suavización*.

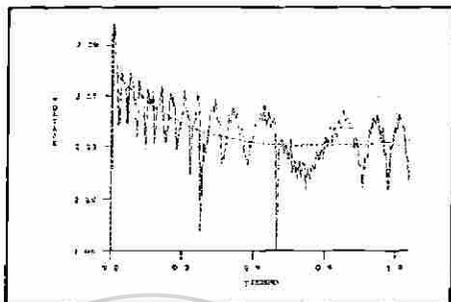


Fig. A.8 Aplicación del ajuste polinomial.

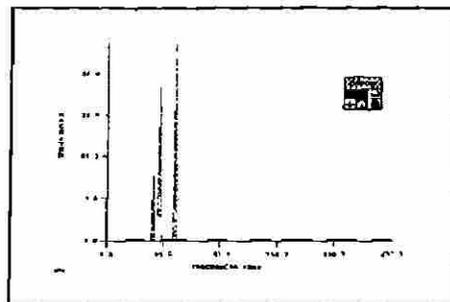
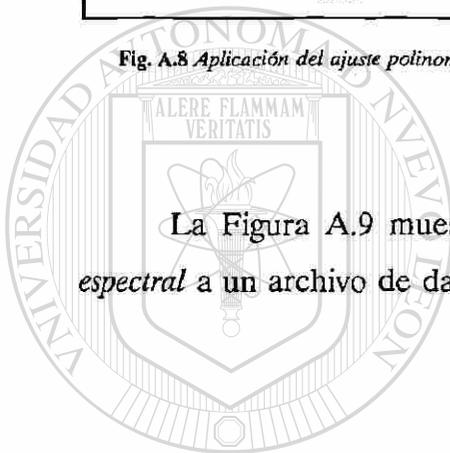


Fig. A.9 Determinación de la potencia espectral.

La Figura A.9 muestra los resultados obtenidos al aplicar la opción *potencia espectral* a un archivo de datos.



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## APENDICE B

### MODELO DE SHULTZ

El conjunto de ecuaciones 2.1 a 2.16 se usa para describir el comportamiento del generadores movidos por turbinas de gas, turbinas hidráulicas, turbinas de vapor, y generadores síncronos con rotor sólido o rotor laminado. Este modelo se usa ampliamente en la industria pero debe de hacerse unas modificaciones con el propósito de usar los datos disponibles y unir la máquina al sistema. Las relaciones mostradas en el diagrama de bloques de la figura 2.3 se detallan enseguida.

Las expresiones para los encadenamientos de flujo del eje directo son:

$$\Psi_d = -L_d I_d + L_{md} I_{kd} + L_{md} I_f$$

$$\Psi_{kd} = L_{md} I_f + (L_{kd} + L_{md}) I_{kd} - L_{md} I_d$$

$$\Psi_f = -L_{md} I_d + (L_f + L_{md}) I_f + L_{md} I_{kd}$$

Las expresiones para los encadenamientos de flujo del eje en cuadratura son:

$$\Psi_q = -L_q I_q + L_{mq} I_{kq} + L_{mq} I_g$$

$$\Psi_{kq} = L_{mq} I_g + L_{kq} I_{kq} - L_{mq} I_q$$

$$\Psi_g = -L_{mq} I_q + (L_{gl} + L_{mq}) I_g + L_{mq} I_{kq}$$

Si consideramos que:

$$L_{md}' = L_{md} - \frac{L_{md}^2}{L_f + L_{md}}$$

$$L_d'' = L_d' - \frac{L_{md}'^2}{L_{kd}'}$$

$$E_q' = \frac{\omega L_{md}}{L_f + L_{md}} \Psi_f$$

$$\Psi_d = E_q' \left(1 - \frac{L_{md}'}{L_{kd}'}\right) + \frac{L_{md}}{L_{kd}'} \Psi_{kd} - L_d'' I_d$$

$$\Psi_d = \frac{E_q' (L_d'' - L_l) + \Psi_{kd} (L_d' - L_d'')}{L_d' - L_l} - L_d'' I_d$$

De la misma manera:

$$L_{mq}' = L_{mq} - \frac{L_{mq}^2}{L_{kq}' + L_{mq}}$$

$$L_q'' = L_q' - \frac{L_{mq}'^2}{L_{kq}'}$$

$$\Psi_q = -E_d' \left(1 - \frac{L_{mq}'}{L_g'}\right) + \frac{L_{mq}}{L_g'} \Psi_{kq} - L_q'' I_q$$

$$\Psi_q = -\frac{E_d' (L_q'' - L_l) + \Psi_{kq} (L_q' - L_q'')}{L_q' - L_l} - L_q'' I_q$$

Resolviendo para las corrientes del devanado de campo y devanados amortiguadores en el eje q:

$$I_f = \frac{1}{L_{\beta} + L_{md}'} \left[ \Psi_f + \frac{L_{md}}{L_{kd}'} \Psi_{kd} + L_{md} \left(1 - \frac{L_{md}'}{L_{kd}'}\right) I_d \right]$$

$$I_{kd} = \frac{1}{L_{kd}'} \left[ -E_q' + \Psi_{kd} + L_{md}' I_d \right]$$

$$I_{kq} = \frac{1}{L_{\beta} + L_{mq}} \left[ \Psi_{kq} + \frac{L_{mq}}{L_g'} E_d' + \frac{L_{mq}}{L_g'} \Psi_g + L_{mq} \left(1 - \frac{L_{mq}'}{L_{kd}'}\right) I_q \right]$$

$$I_g = \frac{1}{L_{g}'} \left[ E_d' + \Psi_g + L_{mq}' I_q \right]$$

Despejando:

$$\frac{d}{dt} \Psi_{kd} = -R_{kd} I_{kd} = \frac{R_{kd}}{L_{kd}} \left[ E'_q - \Psi_{kd} - L'_{md} I_d \right]$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{kd} = \frac{1}{T_{do}''} \left[ E'_q - \Psi_{kd} - (L'_d - L_l) I_d \right]$$

De la misma manera:

$$\frac{d}{dt} \Psi_g = -R_g I_g = \frac{R_g}{L_g} \left[ -E'_d - \Psi_g - L'_{mq} \frac{d}{dt} \Psi_g \right] = \frac{1}{T_{qo}''} \left[ -E'_d - \Psi_g - (L'_q - L_l) I_q \right]$$

Despejando y multiplicando por la misma cantidad:

$$\frac{d}{dt} \Psi_{kq} = -R_{kq} I_{kq}$$

$$\frac{d}{dt} E'_d = \frac{1}{T_{qo}'} L_{mq} I_{kq}$$

$$L_{mq} I_{kq} = \frac{L_{mq}}{L_{kql} + L_{mq}} \left[ \Psi_{kq} + \frac{L_{mq}}{L'_g} E'_d + \frac{L_{mq}}{L'_g} \Psi_g + L_{mq} \left( 1 - \frac{L'_{mq}}{L'_{kd}} \right) I_q \right]$$

$$L_{mq} I_{kq} = \frac{L_{mq}^2}{L'_g (L_{kql} + L_{mq})} \left[ -E'_d - \Psi_g + (L'_g - L'_{mq}) I_q \right] + \frac{L_{mq}}{L_{kql} + L_{mq}} \Psi_{kq}$$

$$L_{mq} I_{kq} = \frac{L_{mq}^2 (L'_q - L''_q)}{L'_g{}^2 (L_{kql} + L_{mq})} \left[ -E'_d - \Psi_g + (L'_g - L'_{mq}) I_q \right] - E'_d$$

$$L_{mq} I_{kq} = \frac{(L'_q - L'_q)(L'_q - L''_q)}{(L'_q - L_l)^2} \left[ -E'_d - \Psi_g + \frac{(L'_q - L_l)(L''_q - L_l)}{L'_q - L'_q} I_q \right] - E'_d$$

De la misma manera para los enlaces del devanado de campo:

$$\frac{d}{dt} \Psi_f = V_f - r_f I_f$$

$$\frac{L_{md}}{L_\beta + L_{md}} \frac{d}{dt} \Psi_f = \frac{L_{md}}{L_{md} + L_{md}} [V_f - r_f I_f]$$

$$\frac{d}{dt} E_q' = \frac{1}{T_{do}'} \left[ \frac{L_{md}}{r_f} V_f - L_{md} I_f \right]$$

$$\frac{d}{dt} E_q' = \frac{1}{T_{do}'} [E - L_{md} I_f]$$

$$L_{md} I_d = \frac{L_{md}}{L_\beta + L_{md}} \left[ \Psi_{kd} + \frac{L_{md}}{L_{kd}'} E_q' + \frac{L_{md}}{L_{kd}'} \Psi_{kd} + L_{md} \left( 1 - \frac{L_{md}'}{L_{kd}'} \right) I_d \right]$$

$$L_{md} I_d = \frac{L_{md}^2}{L_\beta + L_{md}} \left[ \frac{1}{L_{md}} \Psi_{kd} + \frac{1}{L_{kd}'} E_q' + \frac{1}{L_{kd}'} \Psi_{kd} + \left( 1 - \frac{L_{md}'}{L_{kd}'} \right) I_d \right]$$

$$L_{md} I_d = \frac{L_{md}^2}{L_{kd}'(L_\beta + L_{md})} \left[ \frac{L_{kd}'}{L_{md}} \Psi_{kd} + \frac{L_{kd}'}{L_{kd}'} E_q' + \frac{L_{kd}'}{L_{kd}'} \Psi_{kd} + (L_{kd}' - L_{md}') I_d \right]$$

$$L_{md} I_f = \frac{(L_d - L_d')(L_d' - L_d'')}{(L_d' - L_i)} \left[ E_q' - \Psi_{kd} + \frac{(L_d' - L_i)(L_d'' - L_i)}{(L_d' - L_d'')} I_d \right] + E_q'$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Las anteriores ecuaciones permiten obtener las relaciones expresadas en el diagrama de bloques de la Figura 2.3.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## APENDICE C

### DERIVACION DE INDUCTANCIAS Y CONSTANTES DE TIEMPO

Los parámetros involucrados en la respuesta de la máquina en circuito abierto pueden obtenerse de las curvas de decremento del voltaje en terminales o de la corriente de campo. Considerando el circuito de la figura 2.2 del capítulo 2 [30], las relaciones operacionales para la prueba de circuito abierto son:

$$V_t(s) = \frac{N(s)}{D(s)} V_o$$

$$N(s) = As^2 - Bs - C$$

$$N_f(s) = \left[ \frac{A}{L_{md}} \right] s^2 + \left[ \frac{L_{md} C}{L_d r_f} \right] s$$

$$D(s) = s^2 + s D + C$$

donde

$$A = \frac{L_f}{L_d} + \frac{L_{md} L_{fl} L_{kdl}}{L_d L_{fl} L_{kdl} + L_d L_{md} L_{kdl} + L_d L_{md} L_{fl}}$$

$$B = \frac{\left[ \frac{L_{fl} + L_{md}}{r_f} + \frac{L_{kdl} + L_{md}}{r_{kd}} - \frac{L_{md}^2 (r_f + r_{kd})}{L_d r_f r_{kd}} \right] r_f r_{kd}}{L_{md} (L_{fl} + L_{kdl}) + L_{fl} L_{kdl}}$$

$$C = \frac{r_f r_{kd}}{L_{md} (L_{fl} + L_{kdl}) + L_{fl} L_{kdl}}$$

$$D = \left[ \frac{L_{fl} + L_{md}}{r_f} + \frac{L_{kdl} + L_{md}}{r_{kd}} \right] C$$

Ya que D(s) es un polinomio de segundo orden, su solución es:

$$s = -\frac{b}{2} \pm \frac{b}{2} \sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}}$$

Si se considera que:

$$\frac{4c}{b^2} < 1$$

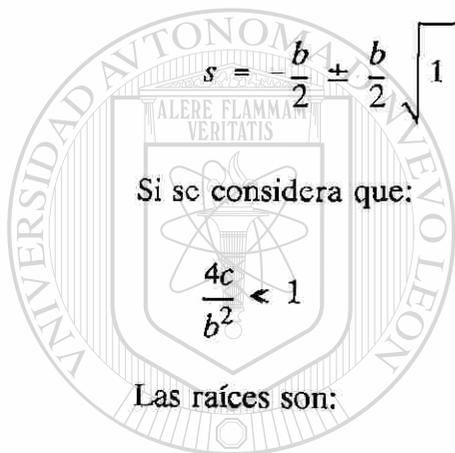
Las raíces son:

$$s_1 = -\frac{c}{b}$$

$$s_2 = -b$$

$$s_1 = - \left[ \frac{L_{fl} + L_{md}}{r_f} + \frac{L_{kdl} + L_{md}}{r_{kd}} \right]^{-1}$$

$$s_2 = - \left[ \frac{L_{md} (L_{kd} + L_{fl}) + L_{kdl} L_{fl}}{r_f r_{kd}} \frac{1}{\frac{L_{fl} + L_{md}}{r_f} + \frac{L_{kdl} + L_{md}}{r_{kd}}} \right]^{-1}$$



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Si consideramos que en el periodo transitorio  $r_{kd} = \infty$  y que durante el periodo subtransitorio  $r_f = 0$ :

$$s_1 = - \left[ \frac{L_{fl} + L_{md}}{r_f} \right]^{-1}$$

$$s_2 = - \left[ \frac{1}{r_{kd}} \left( L_{kdt} + \frac{L_{fl} L_{md}}{L_{md} + L_{fl}} \right) \right]^{-1}$$

Estas expresiones corresponden a las constantes de tiempo transitoria y subtransitoria de circuito abierto para el eje directo.

Aplicando las raíces calculadas anteriormente a la expresión del voltaje en terminales en el tiempo:

$$\frac{V_t}{V_o} = \left[ 1 - \frac{L'_d}{L_d} \right] e^{-\frac{t}{T'_{do}}} + \left[ \frac{L'_d}{L_d} - \frac{L''_d}{L_d} \right] e^{-\frac{t}{T''_{do}}}$$

donde

$$L'_d = \frac{L_d B}{C \frac{L_{fl} + L_{md}}{r_f}}$$

$$L''_d = A L_d$$

## APENDICE D

### SATURACION

Debido a que la saturación de los circuitos magnéticos afecta el comportamiento de la máquina síncrona se comentarán algunos métodos aproximados para incluir la saturación [48, 50].

**Método I.** Voltaje atrás de la reactancia de dispersión,  $X_d$ . Se supone que la saturación es función del flujo del entrehierro que resulta del efecto combinado de la corriente de campo y de armadura. Los pasos a seguir son:

Paso I Calcular el voltaje del entrehierro o voltaje atrás de la reactancia de dispersión  $E_f$ :

$$E_f = E_t + r I_t + j X_d I_t$$

Paso II Con la curva de circuito abierto y la línea de entrehierro calcular la diferencia de la corriente de campo para un mismo  $E_f$ .

Paso III Agregar el incremento  $E_f$  al voltaje calculado sin saturación para determinar el voltaje con saturación,  $E_{fsat}$ .

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Método II.** Voltaje atrás de la reactancia de Potier,  $X_p$ . Este es el voltaje necesario para producir el voltaje nominal en terminales a cero factor de potencia y corriente nominal del estator. Se aplica a la máquina síncrona en operación sobreexcitada. Se considera la saturación en los ejes directo y en cuadratura. La reactancia de Potier es mayor que la reactancia de dispersión. Cuando se utilice la curva de saturación sin carga se recomienda utilizar la reactancia de Potier en vez de la

reactancia de dispersión. Cuando se desconoce el valor de la reactancia de Potier se puede hacer  $X_p = X_d'$ . El proceso es similar al método I solo se cambia  $E_p$  por  $E_1$ :

$$E_p = E_t + r I_t + j X_p I_t$$

**Método III.** Voltaje proporcional al flujo de campo. Dado que:

$$e_q' = \frac{X_{md}}{X_{ff}} \psi$$

Se observa que el voltaje es proporcional al flujo de campo. Si la saturación se presenta en la trayectoria del flujo que enlaza al devanado de campo, el nivel de saturación será proporcional a la magnitud del flujo de campo y por lo tanto del voltaje. El procedimiento consiste en calcular el flujo encadenado y llevarlo a las características de circuito abierto y aplicar los pasos de los métodos anteriores.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## REFERENCIAS

### 1. Libros

- [1] Concordia, C., *Synchronous Machines Theory and Performance*, Wiley, 1951.
- [2] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, USA, 1994.
- [3] Anderson, P., Kundur, P., Van Ness, J., *Subsynchronous Resonance in Power Systems*, IEEE Press, USA, 1990.
- [4] Anderson, P., Fouad, A., *Power System Control And Stability*, IEEE Press, USA, 1993.
- [5] Etter, D., *Fortran 77 with Numerical Methods for Engineers and Scientists*, The Benjamin/Cummins Publishing Company, USA, 1992.
- [6] McCalla, T., *Introduction to Numerical Methods and Fortran Programming*, John Wiley & Sons, USA, 1967.
- 
- [7] Cichocki, A., Unbehauen, R., *Neural Networks for Optimization and Signal Processing*, John Wiley & Sons, USA, 1993.
- [8] Himmelblau, D., *Applied Nonlinear Programming*, McGraw-Hill, USA, 1972.
- [9] Yu, Y., *Electric Power System Dynamics*, Academic Press, USA, 1983.
- [10] Krause, P., *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, USA, 1987.
- [11] Press, W., Flannery, B., Teukolsky, S., Vetterling, W., *Numerical Recipes*,

Cambridge University Press, USA, 1990.

## 2. Artículos Técnicos

- [12] Marquardt, D. W., *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*, J. Soc. Indust. Appl. Math., Vol. 11, No. 2, June, 1963, pp 431-441.
- [13] Boje, E., Balda, J., Harley, R., Beck, R., *Time-Domain Identification of Synchronous Machine Parameters from Simple Standstill Tests*, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 5, No. 1, March 1990, pp 164-175.
- [14] Shackshaft, G., *Implementation of New Approach to Determination of Synchronous-Machine Parameters from Tests*, Proc. IEE, Vol. 124, No. 12, December, 1977, pp 1170-1178.
- [15] Namba, M., Nishiwaki, T., Yokogawa, S., Ohtsuka, K., Ueki, Y., *Identification of Parameters for Power Systems Stability Analysis Using Kalman Filter*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 7, July, 1981, pp 3304-3311.
- 
- [16] De Mello, F., Hannett, L., *Validation of Synchronous Machine Models and Derivation of Model Parameters from Tests*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, February, 1981, pp 662-672.
- [17] Kilgore, L. A., *Calculation of Synchronous Machine Constants, Reactances and Time Constants Affecting Transient Characteristics*, Trans. AIEE, Vol. 50, December, 1931, pp 1201-1214.
- [18] Umans, S. D., Mallick, J. A., Wilson, G. L., *Modeling of Solid Rotor Turbogenerators, Part I: Theory and Techniques*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 1, January/February, 1978, pp 269-277.

- [19] Umans, S. D., Mallick, J. A., Wilson, G. L., *Modeling of Solid Rotor Turbogenerators, Part II: Example of Model Derivation and Use in Digital Simulation*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 1, January/February, 1978, pp 269-277.
- [20] Dandeno, P. L., Kundur, P., Poray, A. T., Coultres, M. E. *Validation of Turbogenerator Stability Models by Comparisons with Power System Test*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, April, 1981, pp 1637-1643.
- [21] Wright, S. H., *Determination of Synchronous Machine Constants by Test, Reactances, Resistances and Time Constants*, Trans. AIEE, Vol. 50, December, 1931, pp 1331-1351.
- [22] Namba, H. Hosoda, J., Doi, S., Udo, M. *Development for Measurement of Operating Parameters of Synchronous Generator and Control Systems*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, February, 1981, 618-628.
- 
- [23] Swingler, D. N., *A Differential Technique for the Fourier Transform Processing of Multicomponent Exponential Functions*, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol. BME-24, No. 4, July, 1977, pp 408-410.
- [24] De Mello, F. P., Ribeiro, J. R., *Derivation of Synchronous Machine Parameters from Tests*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 4, July/August, 1977, pp 1211-1218.
- [25] Savitzky, A., Golay, M. E. J., *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures*, Analytical Chemistry, Vol. 36, No. 8, July, 1964, pp 1627-1639.

- [26] Schlesinger, J., *Fit to Experimental Data with Exponential Functions Using the Fast Fourier Transform*, Nuclear Instruments and Methods, Vol. 106, 1973, pp 503- 508.
- [27] Rafian, M., Laughton, M. A., *Determination of Synchronous-Machine Phase-Coordinate Parameters*, Proc. IEE, Vol. 124, No. 12, December, 1977, pp 1170-1178.
- [28] Hammons, T. J., Parsons, A.J., *Design of Microalternator for Power-System-Stability Investigations*, Proc. IEE, Vol. 118, No. 10, October, 1971, pp 1421-1441.
- [29] Park, R.H., *Two-Reaction Theory of Synchronous Machines: Generalized Method of Analysis-Part I*, Transactions AIEE, Vol. 121, No. 11, 1929, pp 716-730.
- [30] Dandeno, P. L., *Supplementary Definitions and Associated Test Methods for Obtaining Parameters for Synchronous Machine Stability Study Simulations*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, July/August, 1980, pp 1625-1633.
- [31] Yu, Y., Moussa, H. A. M., *Experimental Determination of Exact Equivalent Circuit Parameters of Synchronous Machines*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 90, November/December, 1971, pp 2555-2560.
- [32] Jackson, W. B., Winchester, R. L., *Direct- and Quadrature-Axis Equivalent Circuits for Solid-Rotor Turbine Generators*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 7, 1969, pp 1121-1136.

### 3. Memorias de Congresos

- [33] De Mello, F., *Power System Dynamics-Overview*, Symposium on Adequacy and Philosophy of Modeling: Dynamic System Performance, IEEE PES Winter

- Meeting, New York, USA, 1983.
- [34] Concordia, Ch., Schulz, R., *Appropriate Component Representation for the Simulation of Power Systems Dynamics*, Symposium on Adequacy and Philosophy of Modeling: Dynamic System Performance, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, 1983.
- [35] Shultz, R., *Synchronous Machine Modelling*, Symposium on Adequacy and Philosophy of Modeling: Dynamic System Performance, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, 1983.
- [36] Balda, J., Fairbairn, R., Harley, R., Rodgeron, J., Eitelberg, E., *Measurement of Synchronous Machine Parameters by a Modified Frequency Response Method, Part II: Measured Results*, IEEE PES Winter Meeting, Paper 87 WM 197-7, Luisiana, USA, February 1-6, 1987.
- [37] Cañedo, J., Aboytes, F., Ramírez, R., *Determinación Experimental de Parámetros de Máquinas Síncronas*, IEEE Reunión de Verano, RVP-89-SIS-01, Acapulco, Gro, México, Julio 16-21, 1989.
- [38] Cañedo, J., Aboytes, F., Ramírez, R., *Pruebas de Rechazo de Carga para la Obtención Experimental de Parámetros de Generadores Síncronos*, SIEEEM, Monterrey, N. L., México, Noviembre, 1989.
- [39] De Mello, F., Hannett, L., *Representation of Saturation in Synchronous Machines*, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, Paper 86 WM 057-4, 1986.
- [40] Dandeno, P., *Development of Generator Models for Stability Analysis Particularly for Turbogenerators Applications: An Historical Perspective*, Symposium on

Synchronous Machine Modeling for Power System Studies, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, 1983.

- [41] Salon, S., *Obtaining Synchronous Machine from Test*, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, Paper 86 WM 057-4, 1983.
- [42] Coultes, M., *Standstill Frequency Response Tests*, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, 1983.
- [43] Dougherty, J., Minnich, S., *Calculation of Generator Inductances by Finite-Element Methods*, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, 1983.
- [44] Coultes, M., Kundur, P., Rogers, G. *On-Line Frequency Response Tests and Identification of Generator Models*, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, 1983.
- [45] Solís, A., Chacón, O., *Aplicaciones de Redes Neuronales en Ingeniería Eléctrica*, IEEE Reunión de Verano, RVP-94-SIS-01, Acapulco, Gro, México, Julio 16-21, 1994.
- [46] Prentice, B.R., *Synchronous Machine Reactances*, Transactions AIEE, May 24, 1936.
- [47] Umans, Stephen D., *Development of Generator Models for Stability Analysis Particularly for Turbogenerators Applications: An Historical Perspective*, IEEE PES Winter Meeting, New York, USA, Paper 86 WM 057-4, 1983.
- [48] Shackshaft, G., *Generators Parameters for Stability Studies*, CIGRE Paper 32-15, April, 1976.

#### 4. Reportes de Investigación

- [49] Aboytes, F. et al., *Estabilidad Dinámica en Sistemas Eléctricos de Potencia*, Centro Nacional de Control de Energía, Departamento de Investigación y Desarrollo, C.F.E., Octubre de 1991, Monterrey, N. L., México.
- [50] Arroyo, G. et al., *Estabilidad Transitoria en Sistemas Eléctricos de Potencia*, Centro Nacional de Control de Energía, Departamento de Investigación y Desarrollo, C.F.E., Octubre de 1991, Monterrey, N. L., México.
- [51] Ramírez, R., Aboytes, F., *Análisis y Simulación del Comportamiento del Generador Síncrono*, Proyecto de Investigación DIE-89-02, Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Julio de 1988, Monterrey, N. L., México.
- [52] Electric Power Research Institute, *Modeling for Power Systems Simulation*, EPRI EL-3318, Vol. 1, December, 1983.
- [53] Electric Power Research Institute, *Determination of Synchronous Machine Stability Study Constants*, EPRI EL-1424, Vol. 2, December, 1980.
- [54] Electric Power Research Institute, *Determination of Synchronous Machine Stability Study Constants*, EPRI EL-1424, Vol. 4, December, 1980.

