

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**“GENERADOR DE INDUCCIÓN CON DOBLE BOBINADO EN EL ESTATOR  
AUTOEXCITADO CON CAPACITORES SHUNT Y AUTOREGULADO CON  
CAPACITORES SERIE”**

TESIS

PARA OPTAR AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
MENCIÓN: SISTEMAS DE POTENCIA

**ELABORADO POR**

ROBERTO RUBEN RAMIREZ ARCELLES

**ASESOR**

M. Sc. JOSÉ KOC RUEDA

LIMA, PERÚ  
2013

DEDICATORIA

**A mi esposa y mis hijos.**

Agradezco a los profesores que tuve en la Universidad y a los colegas con los cuales comparti el ejercicio profesional, que forjaron en mi los principios y la ética profesional, así como la constante inquietud de buscar la explicación y sustento técnico en todas las actividades de la ingeniería eléctrica.

El autor

## INDICE DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCION</b>	1
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>ESTRUCTURAS DE GENERACION CON GENERADORES DE INDUCCION</b>	3
1.1 Clasificación de los generadores de inducción.....	3
1.1.1 Estructuras de generación de velocidad constante y frecuencia constante.....	4
1.1.2 Estructuras de generación de velocidad variable y frecuencia constante.....	5
1.1.2.1 Entregando potencia activa a una red de frecuencia constante.....	5
1.1.2.2 Entregando potencia activa a una carga aislada a frecuencia controlada.....	8
1.1.3 Estructuras de generación de velocidad variable y frecuencia variable.....	9
1.2 Formulación del problema.....	10
1.3 Objetivos de la tesis.....	15
1.4 Organización de la tesis.....	16
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>MODELO MATEMATICO DEL GENERADOR DE INDUCCION CON DOBLE BOBINADO EN EL ESTATOR</b>	18
2.1 Generador de inducción trifásico con doble bobinado en el estator.....	18
2.1.1 Elementos de la matriz $[Z_{11}]$ .....	20
2.1.2 Elementos de la matriz $[Z_{21}]$ .....	21
2.1.3 Elementos de la matriz $[Z_{12}]$ .....	22
2.1.4 Elementos de la matriz $[Z_{22}]$ .....	22
2.2 Transformación de tres ejes a dos ejes y su aplicación.....	23
2.2.1 Transformación de tres ejes a dos ejes.....	24
2.2.2 Estructura de la transformación de fases .....	27
2.2.3 Aplicación de la Transformación de Fases.....	28
2.3 Transformación de dos ejes en movimiento a dos ejes fijos al estator.....	30
2.3.1 Transformación de dos ejes rotantes a dos ejes fijos.....	30

2.3.2	Estructura de la Transformación de Conmutador.....	31
2.3.3	Aplicación de la Transformación de Conmutador.....	31
2.4	Modelo propuesto para el generador de inducción con doble bobinado en el estator.....	34
2.4.1	Modelo d-q del Generador de Inducción con Doble Bobinado en el Estator (GIDBE) reflejado al bobinado de excitación.....	34
2.4.2	Incorporación de los capacitores excitación, capacitores serie y la resistencia de carga.....	36
2.4.3	Modelo propuesto para el GIDBE con capacitores en serie con la carga.....	37
2.5	Conclusiones.....	40
<b>CAPITULO 3</b>		
<b>AUTOEXCITACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN</b>		
3.1	Modelo del generador de inducción convencional.....	41
3.2	Conceptualización del proceso transitorio de autoexcitación.....	43
3.2.1	Transitorio de autoexcitación en un circuito R-L-C.....	43
3.2.2	Ecuaciones del proceso de autoexcitación del generador de inducción convencional lineal.....	47
3.2.3	Autoexcitación del generador de inducción convencional lineal.....	49
3.3	Autoexcitación del generador de inducción convencional considerando la saturación .....	52
3.3.1	La inductancia magnetizante.....	52
3.3.2	Incorporación de la saturación.....	53
3.3.3	Estrategia de simulación .....	53
3.3.4	Análisis de resultados .....	55
3.4	Efecto de la velocidad del rotor y del valor del banco de capacitores de excitación .....	56
3.4.1	Relación Capacitor-velocidad en vacío.....	56

3.4.2	Efecto del valor del capacitor de excitación.....	56
3.4.3	Efecto del valor de la velocidad del rotor.....	59
3.5	Conclusiones.....	61
<b>CAPITULO 4</b>		
<b>TRANSITORIOS EN EL GENERADOR DE INDUCCIÓN CON DOBLE BOBINADO</b>		
<b>EN EL ESTATOR AUTOEXCITADO Y AUTOREGULADO</b>		
4.1	Modelo del GIADBE con capacitor en serie con la carga.....	62
4.2	Estrategia de solución de las ecuaciones algebraico-diferenciales.....	63
4.3	Autoexcitación del GIADBE con carga resistiva.....	65
4.3.1	Resistencia de carga crítica.....	66
4.3.2	Resistencias de carga menores a la crítica.....	66
4.3.3	Resistencias de carga mayores a la crítica.....	67
4.4	Cambios bruscos de carga en el GIADBE.....	68
4.4.1	Cambios bruscos de carga menores a la carga.....	68
4.4.2	Cambios bruscos de carga mayores a la carga crítica.....	69
4.5	Cortocircuito en la carga del GIADBE.....	70
4.6	Efecto de la adición de un capacitor en serie con la carga en el GIADBE.....	72
4.6.1	Efecto del valor de la resistencia de carga.....	72
4.7	Cambios bruscos de carga en el GIADBECSE.....	73
4.8	Cortocircuito en la carga del GIADBECSE.....	75
4.9	Cortocircuito en el capacitor serie .....	77
4.10	Conclusiones.....	79

## **CAPITULO 5:**

<b>OPERACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO</b>	<b>81</b>
5.1 Ecuaciones de estado estacionario del GIADBECSE .....	81
5.2 Estrategia de solución de las ecuaciones de estado estacionario del GIADBECSE.....	84
5.2.1 Método numérico de solución.....	84
5.2.2 Diagrama de flujo para la solución.. .....	86
5.3 Operación en estado estacionario del GIADBE.....	86
5.3.1 Selección del capacitor del bobinado de excitación (Csh) en el GIADBE.....	86
5.3.2 Característica externa del GIADBE.....	87
5.3.3 Característica Resistencia-Flujo.....	90
5.3.4 Característica Resistencia-Potencia.....	90
5.3.5 Característica Frecuencia –Carga.....	92
5.3.6 Estimación de la potencia nominal del GIADBE impulsado a 2700 rpm.....	93
5.4 Operación en estado estacionario del GIADBECSE.....	94
5.4.1 Característica externa del GIADBCSE.....	94
5.4.2 Selección del capacitor serie.....	95
5.4.3 Características de operación del GIADBCSE.....	96
5.4.4 Características Resistencia-Potencia y Resistencia-Flujo Magnetizante.....	97
5.5 Conclusiones.....	98

<b>CONTRIBUCIONES, CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS</b>	100
Contribuciones.....	100
Conclusiones generales.....	100
Conclusiones técnicas.....	101
Recomendaciones de futuros trabajos.....	102
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	103
<b>ANEXOS</b>	106

## INDICE DE FIGURAS

### CAPITULO 1

Figura 1.1 Generador de inducción de rotor de jaula conectado directamente a la red de alterna.....	4
Figura 1.2 Generador de Inducción con rotor de jaula y bobinados de dos velocidades, conectado directamente a la red de alterna.....	5
Figura 1.3 Generador de inducción de rotor de jaula impulsado a velocidad variable.....	6
Figura 1.4 Generador de inducción de rotor de jaula impulsado a velocidad variable.....	6
Figura 1.5 Generador de inducción de rotor bobinado impulsado a velocidad variable con resistencia variable en el rotor .....	7
Figura 1.6 Generador de inducción de rotor bobinado impulsado a velocidad variable con resistencia variable en el rotor.....	7
Figura 1.7 Generador de inducción con doble alimentación a velocidad variable.....	8
Figura 1.8 Generador de inducción con doble a limentación, impulsado a velocidad variable alimentado una carga aislada .....	9
Figura1.9 Generador de inducción de jaula de ardilla alimentando una carga aislada.....	10
Figura 1.10 Generador de inducción de jaula de ardilla con doble bobinado en el estator alimentando una carga aislada.....	13
Figura 1.11 Generador de inducción de jaula de ardilla con doble bobinado en el estator alimentando una carga aislada.....	14

### CAPITULO 2

Figura 2.1 Generador de Inducción Trifásico con Doble Bobinado en el Estator.....	19
Figura 2.2 Transformación de tres ejes a dos ejes.....	24
Figura 2.3 Generador de Inducción Bifásico con Doble Bobinado en el Estator Equivalente.....	29
Figura 2.4 Transformación de ejes rotantes a ejes fijos.....	30
Figura 2.5 Modelo d-q del GIDBE.....	32
Figura 2.6 Modelo d-q del GIDBE reflejado al devanado de excitación.....	35

Figura 2.7 Conexión por fase de los capacitores shunt, serie y la resistencia de carga....	36
Figura 2.8 Modelo d-q del GIDBCSE reflejado al bobinado de excitación incluyendo los capacitores y la resistencia de carga.....	31
Figura 2.9 Modelo del GIDBECSE en un sistema de referencia d-q fijo al estator.....	39

### **CAPITULO 3**

Figura 3.1 Representación del GI convencional en un sistema de referencia d-q fijo al estator .....	41
Figura3.2 Modelo del GIA convencional en un sistema de referencia d-q fijo al estator.....	43
Figura 3.3 Circuito RLC.....	44
Figura 3.4 Respuesta transitoria del circuito RLC.....	46
Figura 3.5 Detalle en el primer instante con resistencia negativa.....	47
Figura 3.6 Diagrama de bloques de la autoexcitación del GI convencional sin saturación	49
Figura 3.7 Corriente en el bobinado de excitación (autoexcitación del GI convencional sin saturación).....	51
Figura 3.8 Tensión en el bobinado de excitación (autoexcitación del GI convencional sin saturación).....	51
Figura 3.9 Variación de la inductancia magnetizante con la corriente magnetizante.....	52
Figura 3.10 Variación de la inductancia magnetizante con la corriente magnetizante-ajuste de función empírica.....	53
Figura 3.11 Diagrama de bloques para el modelamiento de la saturación.....	54
Figura 3.12 Corriente en el bobinado de excitación-efecto de la saturación.....	55
Figura 3.13 Tensión en el bobinado de excitación-efecto de la saturación.....	55
Figura 3.14 Relación Capacitor-Velocidad en autoexcitación en vacío.....	57
Figura 3.15 Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 28 uF.....	57
Figura 3.16 Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 26 uF.....	58
Figura 3.17 Tiempo de autoexcitación en vacío .....	58
Figura 3.18 Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 24 uF.....	59

Figura 3.19 Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 2600 rpm.....	60
Figura 3.20 Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 2500 rpm.....	60
Figura 3.21 Tensión en el bobinado de excitación- autoexcitación con 2450 rpm.....	61
<b>CAPITULO 4</b>	
Figura 4.1 Representación del GIADBECSE en un sistema de referencia d-q fijo al estator.....	63
Figura 4.2 Diagrama de bloques de la autoexcitación del GIADBECSE con carga resistiva.....	65
Figura 4.3 Autoexcitación del GIDBE con la carga resistiva critica.....	66
Figura 4.4 Autoexcitación del GIADBE con resistencia de carga menor a la crítica.....	67
Figura 4.5 Autoexcitación del GIADBE con 50 ohm.....	68
Figura 4.6 Autoexcitación del GIADBE con 70 ohm.....	68
Figura 4.7 Comportamiento transitorio de las tensiones (cambio de carga).....	69
Figura 4.8 Comportamiento transitorio de las corrientes (cambio de carga).....	69
Figura 4.9 Comportamiento transitorio de las tensiones (desexcitación).....	70
Figura 4.10 Comportamiento transitorio de las corrientes-desexcitación.....	70
Figura 4.11 Comportamiento transitorio de las corrientes-cortocircuito en la carga.....	71
Figura 4.12 Comportamiento transitorio de las corrientes- cortocircuito en la carga.....	71
Figura 4.13 Comportamiento de las tensiones-auto excitación con carga del GIADBECSE.....	72
Figura 4.14 Comportamiento de las tensiones-auto excitación con carga del GIADBECSE.....	73
Figura 4.15 Comportamiento de las tensiones-autoexcitación con carga del GIADBECSE.....	73
Figura 4.16 Comportamiento de las tensiones en los bobinados -cambio de carga GIADBECSE.....	74

Figura 4.17 Comportamiento de las corrientes de los bobinados-cambio de carga GIADBECSE.....	74
Figura 4.18 Comportamiento de las tensiones en la carga y capacitor serie-cambio de carga GIADBECSE.....	75
Figura 4.19 Comportamiento de las tensiones en los bobinados-GIADEBCSE-Cortocircuito en la carga.....	76
Figura 4.20 Comportamiento de las corrientes en los bobinados-GIADEBCSE-Cortocircuito en la carga.....	76
Figura 4.21 Comportamiento de las tensiones en la carga y capacitor serie-GIADEBCSE-Cortocircuito en la carga.....	77
Figura 4.22 Comportamiento de las tensiones en los bobinados-GIADBECSE-Cortocircuito del capacitor serie.....	78
Figura 4.23 Comportamiento de las corrientes en los bobinados GIADBECSE-Cortocircuito del capacitor serie.....	78
Figura 4.24 Comportamiento de las tensiones en la carga y capacitor- GIADBECSE-Cortocircuito del capacitor serie.....	79
<b>CAPITULO 5</b>	
Figura 5.1 Circuito equivalente de estado estacionario del GIADBECSE.....	82
Figura 5.2 Diagrama de Flujo para la solución de las ecuaciones de estado Estacionario.....	86
Figura 5.3 Efecto del capacitor $C_{sh}$ sobre la tensión en vacío del GIADBE.....	87
Figura 5.4 Característica P-V del GIADBE impulsado a 2700 rpm.....	88
Figura 5.5 Característica P-V del bobinado de excitación del GIADBE.....	89
Figura 5.6 Característica P-V del bobinado de carga del GIADBE.....	89
Figura 5.7 Característica Resistencia-Flujo Magnetizante del GIADBE.....	90
Figura 5.8 Característica Resistencia-Potencia del GIADBE.....	91
Figura 5.9 Característica Potencia-tensión del GIADBE.....	91
Figura 5.10 Característica Frecuencia-Carga del GIADBE.....	93
Figura 5.11 Características P-V del GIADBE impulsado a 2700 rpm con diferentes valores de $C_{sh}$ .....	93

Figura 5.12 Efecto del capacitor serie sobre la característica P-V .....	94
Figura 5.13 Regulación de tensión en función del capacitor serie .....	95
Figura 5.14 Características de operación de GIDBECSE.....	97
Figura 5.15 Características Resistencia-Potencia/Flujo Magnetizante del GIADBECSE impulsado a 2700 rpm .....	98

## SIMBOLOGÍA

$N_1, N_2$ y $N_3$	:	Número efectivo de vueltas por fase de los bobinados trifásicos de excitación, del rotor y de carga.
A, B y C	:	Bobinado trifásico estatórico de excitación
U, V y W	:	Bobinado trifásico estatórico de carga.
$[V], [Z]$ y $[I]$	:	Vector de tensión, matriz de impedancias y vector de corrientes del generador de inducción trifásico con doble bobinado en el estator.
$[V_1], [I_1], [V_2], [I_2]$	:	Vectores de tensiones y corrientes del estator y rotor.
$v_A, v_B, v_C, v_U, v_V, v_W$	:	Tensiones instantáneas por fase en los bobinados de excitación y de carga del estator
$i_A, i_B, i_C, i_U, i_V, i_W$	:	Corrientes instantáneas por fase en los bobinados de excitación y de carga del estator.
$v_r, v_s, v_t, i_r, i_s, i_t$	:	Tensiones y corrientes instantáneas por fase en el bobinado del rotor.
$[Z_{11}], [Z_{12}], [Z_{21}]$ y $[Z_{22}]$	:	Matrices de impedancias del estator, mutuas estator-rotor, mutuas rotor-estator e impedancias del rotor.
$[\theta]$	:	Posición angular del rotor.
$R_1, l_1, R_3, l_3$	:	Resistencias e inductancias propias de cada fase de los bobinados de excitación y carga del estator.
$l_{1\sigma}, l_{3\sigma}, l_{1m}, l_{3m}$	:	Inductancias de dispersión e inductancias magnetizantes por fase de los bobinados de excitación y carga del estator.
$\lambda_m$	:	Conductancia magnetizante.

$M_{AB}, M_{BC}, M_{CA}, M_{BA}, M_{CB}, M_{AC}$	:	Inductancias mutuas entre las fases del bobinado de excitación del estator.
$M_{UV}, M_{VW}, M_{WU}, M_{VU}, M_{WV}, M_{WU}$	:	Inductancias mutuas entre las fases del bobinado de carga del estator.
$M_{UA}, M_{VB}, M_{WC}, M_{UB}, M_{UC}, M_{VA}, M_{VC}, M_{WA}, M_{WB}$	:	Inductancias mutuas entre las fases de los bobinados de excitación y carga del estator.
$M_{rA}, M_{sB}, M_{tC}, M_{rB}, M_{sC}, M_{tA}, M_{rB}, M_{sC}, M_{tA}$	:	Inductancias mutuas entre las fases de los bobinados de excitación del estator y rotor.
$M_{rU}, M_{sV}, M_{tW}, M_{rV}, M_{sU}, M_{tU}, M_{rW}, M_{sW}, M_{tV}$	:	Inductancias mutuas entre las fases de los bobinados de carga del estator y rotor.
$M_{rs}, M_{st}, M_{tr}$	:	Inductancias mutuas entre las fases del bobinado del rotor.
$l_2, l_{2\sigma}$ y $l_{2m}$	:	Inductancia propia, de dispersión y inductancia magnetizante de cada fase del rotor.
$f_a^s, f_b^s$ y $f_c^s$	:	Variables instantáneas de un sistema trifásico fijo.
$f_\alpha^s$ y $f_\beta^s$	:	Variables instantáneas de un sistema bifásico fijo.
$f_o^s$	:	Variable o componente de secuencia cero del sistema trifásico
$v_o^s, i_o^s$	:	Tensión y corriente homopolares.
$[V'], [Z'], [I']$	:	Vector de tensión, matriz de impedancias y vector de corrientes del GIBDBE equivalente.

$[C_F]$	:	Transformación de fases para una maquina de inducción con doble bobinado en el estator.
$[C_{32}]$	:	Transformación de fases para una maquina convencional.
GIBDBE	:	Generador de inducción bifásico con doble bobinado en el estator.
$[V']^t = [v_{\alpha 1} \quad v_{\beta 1} \quad v_{\alpha 3} \quad v_{\beta 3} \quad v_{\alpha 2} \quad v_{\beta 2}]$	:	Tensiones instantáneas por fase en los bobinados de excitación y de carga del estator bifásicos equivalentes.
$[I']^t = [i_{\alpha 1} \quad i_{\beta 1} \quad i_{\alpha 3} \quad i_{\beta 3} \quad i_{\alpha 2} \quad i_{\beta 2}]$	:	Corrientes instantáneas por fase en los bobinados de excitación y de carga del estator bifásicos equivalentes.
$M_{13}, M_{12}, M_{23}$	:	Inductancias mutuas en el GIBDBE.
$\alpha^r$ y $\beta^r$	:	Sistema bifásico de ejes ortogonales rotantes.
$f_\alpha^r$ y $f_\beta^r$	:	Variables instantáneas de un sistema bifásico rotante.
$[V'']^t, [Z'']^t, [I'']^t$	:	Vector de tensión, matriz de impedancias y vector de corrientes del Modelo d-q equivalente.
$[V'']^t = [v_{d1}^s \quad v_{q1}^s \quad v_{d3}^s \quad v_{q3}^s \quad 0 \quad 0]$	:	Tensiones instantáneas en los bobinados de excitación, carga y rotor en el Modelo d-q equivalente.
$[I'']^t = [i_{d1}^s \quad i_{q1}^s \quad i_{d3}^s \quad i_{q3}^s \quad i_{d2}^r \quad i_{q2}^r]$	:	Corrientes instantáneas en los bobinados de excitación, carga y rotor en el Modelo d-q equivalente.
$[C_C]$	:	Transformación de conmutador para una maquina de inducción con doble bobinado en el estator.
$[C_2]$	:	Transformación de conmutador para una maquina de inducción convencional.
$R_3$ y $L_3$	:	Resistencia e inductancia propia por fase del bobinado de carga reflejadas al bobinado de excitación.

$R'_2$ y $L'_2$	:	Resistencia e inductancia propia por fase del bobinado del rotor reflejadas al bobinado de excitación.
$M'_{13}, M'_{23}, M'_{12} = M$	:	Inductancias mutuas reflejadas al bobinado de excitación.
$V_{cd}$ y $V_{cq}$	:	Carga inicial de los capacitores en bobinado de excitación.
$V_{c0}$	:	Carga inicial del capacitor del circuito RLC.
$I_m$	:	Valor eficaz de la corriente de magnetización
$M$	:	Inductancia magnetizante por fase.
$L_{1\sigma}, L_{3\sigma}, L_{2\sigma}$	:	Inductancias de dispersión por fase de los bobinados de excitación, carga y del rotor.
$\omega_r$	:	Velocidad del rotor en rad/s
$\frac{1}{M} = a_0 + a_1\psi_m + a_2\psi_m^2$	:	Función empírica de la inversa de la inductancia en función del flujo concatenado.
p	:	Operador d/dt.
s	:	Deslizamiento de la máquina de inducción.
$\vec{V}_1, \vec{V}_3$	:	Valor eficaz por fase de las tensiones en los bobinados de excitación y de carga, referidos al bobinado de excitación.
$\vec{I}_1, \vec{I}_3, \vec{I}_2$	:	Valor eficaz por fase de las corrientes en los bobinados de excitación y de carga del estator y el bobinado del rotor.
$w$	:	Frecuencia angular eléctrica de la tensión generada.

$\vec{E}_m$	:	Fuerza electromotriz magnetizante.
$\vec{I}_m$	:	Corriente magnetizante.
$\Delta \bar{X}$	:	Vector de incrementos.
$\bar{X}^{(0)}$	:	Vector de valores iniciales.
$\bar{X}^{(k)}, \bar{X}^{(k+1)}$	:	Vector de soluciones en la iteración k y k+1.
$[J]$		Matriz Jacobiana.
$A_{ij}$	:	Elementos de la matriz Jacobiana

## RESUMEN

El generador de inducción es ampliamente conocido por su operación en paralelo con un sistema eléctrico de potencia que le provee la potencia reactiva para la creación del campo magnético, tal como se ha reportado en numerosos artículos técnicos publicados sobre el tema. Sin embargo, el concepto de autoexcitación de la máquina de inducción apareció por primera vez en 1935, cuando se mostró que la máquina de inducción puede funcionar como generador en modo aislado, si es impulsada a una velocidad determinada y se le conecta un capacitor en conexión *shunt* para el suministro a la máquina de la potencia reactiva requerida para generar la tensión esperada [14]. A lo largo de los años se ha investigado el principio de funcionamiento, el diseño y aspectos de control del Generador de Inducción Autoexcitado (GIA).

Los análisis en estado estacionario para determinar los requerimientos de capacitores *shunt* para los GIA y su influencia sobre la máxima potencia disponible han sido tratados en detalle en numerosas publicaciones. Todos estos trabajos han puesto en evidencia que la principal desventaja del GIA es su pobre regulación de tensión. Como solución, se han presentado diversos esquemas de regulación de tensión con configuraciones de control complejas y con problemas operacionales como armónicos y transitorios de conmutación que vician las grandes ventajas de las máquinas de inducción como fuentes de generación autónomas. En este contexto, la incorporación de capacitores en conexión serie para proveer potencia reactiva adicional, cuando el GIA opera con carga, ha resultado una de las más atractivas opciones para mejorar la regulación del GIA, ya que por el carácter autorregulante de la compensación serie se logra evitar la necesidad de un regulador de tensión.

De otro lado, existen trabajos referidos al análisis transitorio de autoexcitación y desexcitación del GIA, en los cuales la saturación fue incorporada utilizando la inductancia magnetizante expresada en función de la corriente magnetizante; en otros trabajos, se ha propuesto un polinomio que describe la variación de la inversa de la inductancia magnetizante con el flujo concatenado magnetizante.

En [31] se desarrolló y verificó experimentalmente un modelo para el análisis de la operación en estado estacionario de un Generador de Inducción Autoexcitado con dos

bobinados independientes en el estator (GIADBE), el bobinado de mayor tensión, para conectar los capacitores *shunt* de excitación y el otro bobinado para alimentar una carga puramente resistiva. Este modelo que consideró las corrientes como variables, fue desarrollado para su aplicación en el diseño de generadores de inducción con doble bobinado en el estator destinados a plantas eólicas, las que tenían previsto entregar potencia a un banco de baterías de 12 o 24 voltios. En estos casos resultaba adecuado utilizar un bobinado independiente de mayor tensión para la conexión de los capacitores de excitación. El GIADBE, al igual que el GIA, presenta la desventaja de la pobre regulación de tensión y la desexcitación con potencias mayores a la potencia máxima.

En la presente tesis se ha desarrollado el modelo dinámico del Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el Estator (GIADBE), en el cual, uno de los devanados del estator es utilizado para conectar los capacitores *shunt* para la autoexcitación y en el otro devanado se conecta la carga en serie con capacitores para compensar el efecto desmagnetizante de la carga.

El modelo dinámico del GIADBE ha sido desarrollado utilizando un sistema de referencia d-q fijo al estator y los flujos concatenados como variables. De esta manera la saturación del circuito magnético del generador ha sido representada mediante un polinomio que describe la variación de la inversa de la inductancia magnetizante con el flujo concatenado magnetizante de la máquina.

A partir de este modelo dinámico, se ha obtenido las ecuaciones para el análisis del proceso de autoexcitación en vacío del GIADBE con un capacitor *shunt* en el devanado de excitación, así como la autoexcitación con una carga determinada y un capacitor en serie. Por lo tanto, con estos modelos se muestra el proceso transitorio de autoexcitación del GIADBE impulsado a velocidad constante, en vacío y con una carga determinada, asimismo se han definido las posibles condiciones críticas para la autoexcitación.

Utilizando el modelo dinámico se han simulado algunos transitorios de interés en el GIADBE con capacitores *shunt* en el devanado de excitación y capacitores en serie con la carga. También se ha simulado cambios bruscos de carga, cortocircuitos en la carga y cortocircuito en el capacitor serie. Mediante estas simulaciones se ha mostrado las ventajas de la incorporación del capacitor en serie con la carga.

Las ecuaciones algebraicas que representan la operación en estado estacionario han sido obtenidas a partir del modelo dinámico del GIADBE, que considera capacitores *shunt* en el devanado de excitación y capacitores en serie con la carga. Se ha calculado las características de operación del GIADBE, impulsado a velocidad constante y alimentando

cargas resistivas. Los resultados han mostrado el efecto autorregulador del capacitor serie.

Finalmente se puede resumir que los capacitores serie se pueden utilizar para mejorar la regulación de tensión e incrementar la capacidad de carga del GIA, logrando evitar la necesidad de un regulador de tensión por el carácter autorregulante de la compensación serie, mostrando un camino para futuros trabajos en el tema.

## ABSTRACT

The induction generator is widely known for its operation in parallel with an electric power system that provides reactive power to create the magnetic field, as has been reported in numerous technical papers published on the subject. However, the concept of the induction machine self-excitation appeared first in 1935, when it was showed that the induction machine can operate autonomously as a generator, if it is driven at a determined speed and it is connected a shunt capacitor for supply the machine the reactive power required to generate some expected voltage. Over the years it has investigated the operation principle, design and control aspects of the self-excited induction generator (SIG).

From the eighties, due to the emphasis placed on the use of renewable energy resources, it has become important to develop independent generation sources as a SIG using shunt capacitor and driven by wind turbines, small hydraulic turbines and combustion engines using biogas. In this regard due to their low cost, it does not require an independent source of power for excitation, its robustness and brushless rotor construction, ease of maintenance, self-protection under fault conditions, the conventional SIG has been an important alternative in the isolated generation sources instead of a synchronous generator (alternator conventional).

The steady-state analysis to determine the shunt capacitor requirements for the SIA and its influence on the maximum power available have been discussed in detail in numerous publications showing various solution techniques. All these works have shown that the main disadvantage of the SIG is its poor voltage regulation. For this reason it has investigated solutions to improve it and improve its feasibility of implementation as an independent generation source. Among them there have been various voltage regulation schemes with complex control configurations and with operational problems such as harmonics and switching transients which vitiate the great advantages of induction machines as an autonomous generation source.

In this context, the addition of capacitors in series connection to provide additional reactive power when the SIG is operating under load, has been one of the most attractive options to improve its regulation, due to the self-regulating character of the series

compensation is avoided the need for a voltage regulator. Several studies have shown that with a proper selection of shunt and series capacitors, the voltage regulation and the current capacity of the SIA are improved substantially.

On the other hand, there are papers referring to the SIG transient analysis of the self-excitation and de-excitation, in which saturation was incorporated using the magnetizing inductance and other cases, have proposed a polynomial function which describes the variation of the inverse of the magnetizing inductance with the magnetizing flux linkage.

In [31] it was developed and verified experimentally a model for the analysis of steady-state operation of a Self-excited Induction Generator with Double Stator Windings (SIGDSW), the higher voltage winding for connecting of the excitation shunt capacitors and the other one for feeding a purely resistive load. The model of this non-conventional Self-excited Induction Generator was developed for use in the design of an induction generator with two independent stator windings for wind farms, which were scheduled to deliver power to a battery bank 12 or 24 volts. In these cases it was appropriate to use a separate higher voltage winding for connection of the shunt capacitor. The SIGDSW as well as the conventional SIG, has the disadvantage of poor regulation of voltage and de-excitation with power greater than maximum power.

In this thesis it has developed the dynamic model of Self-excited Induction Generator with Double Stator Winding (SIGDSW), where, one of the stator windings is used to connect the shunt capacitors for the self-excitation, and in the other winding is connected the load with series capacitors to compensate the demagnetizing effect of the load.

The SIGDSW dynamic model has been developed using a d-q reference system fixed to the stator and flux linkages as variables. Thus the saturation of the magnetic circuit of the generator has been represented by a polynomial which describes the variation of the inverse of the magnetizing inductance magnetizing with the machine flux linkage.

From this dynamic model, it has obtained the equations for the analysis of self-excitation process without load of the SIGDSW, with shunt capacitor in the field winding, as well as the self-excitation with a given load and a capacitor in series. Therefore, with these models it has shown the self-excitation transient process of the SIGDSW driven at constant speed, without load and with known load, also it has been defined potential critical conditions for the self-excitation.

Using the dynamic model have also been simulated some interesting transient in the SIGDSW, with shunt capacitor in the field winding and capacitors in series with the load, such as sudden load changes, short-circuits in the load and in the series capacitor.

Through these simulations it has shown the advantages of incorporating the capacitor in series with the load.

From the general model of the SIGDSW, with shunt capacitors in the field winding and capacitors in series with the load, it has obtained the algebraic equations representing the steady-state operation and calculated operating characteristics, driven at constant speed and feeding resistive loads. The results showed the self-regulatory effect of the series capacitor.

Finally it can summarize that the series capacitors can be used to improve voltage regulation and increase the overload capacity of the SIG, which manages to avoid the need for a voltage regulator for self-regulating nature of the compensation series, showing a path for future works on the subject.

## INTRODUCCION

En este trabajo se propone un modelo para el generador de inducción con doble bobinado en el estator, que además de los capacitores *shunt* para la autoexcitación, posee capacitores en serie con la carga. Los capacitores en serie se utilizan para mejorar la regulación de tensión e incrementar la potencia de salida del generador de inducción.

En principio se describe el modelo de la máquina inducción con doble bobinado en el estator en coordenadas *abc* y en coordenadas *qd0*. Para ello se desarrollan las transformaciones de fases apropiadas, para reemplazar los bobinados trifásicos del estator y rotor mediante bobinados bifásicos equivalentes. También se desarrolla la transformación para reemplazar el bobinado bifásico del rotor que gira a una determinada velocidad, por uno bifásico que está fijo al estator. Luego en el modelo d-q obtenido los bobinados equivalentes se reflejan al devanado de excitación y se insertan los elementos pasivos: capacitores *shunt* y serie y la resistencia de carga.

Se muestra el proceso transitorio de autoexcitación del generador de inducción (GI), resaltando el papel que juega la saturación del circuito de la máquina en la estabilización de este proceso, el valor del capacitor *shunt* y la velocidad. Se ha modelado la saturación mediante una relación empírica entre la inversa de la inductancia magnetizante y el flujo concatenado magnetizante de la máquina. Los resultados indican que para condiciones dadas de velocidad existe un valor mínimo de capacitor de excitación con el cual no es posible la autoexcitación del GI convencional. Asimismo, que con un determinado capacitor de excitación, existe un valor mínimo de velocidad con el cual se impulsa el GI y no es posible la autoexcitación.

Luego se muestra el proceso de autoexcitación del generador de inducción con doble bobinado en el estator (GIADBE), que posee un banco de capacitores en el bobinado de excitación, está impulsado a una determinada velocidad y posee una carga resistiva en el bobinado de excitación. Se demuestra que es posible lograr la autoexcitación del GIADBE con magnitudes de resistencias de carga determinadas y que existe un valor denominado resistencia crítica, con la cual aun se logra la autoexcitación. También se evalúa el comportamiento transitorio del GIADBE ante cambios bruscos de carga y cuando se produce un cortocircuito trifásico en la carga, se demuestra que con esta falla se desexcita instantáneamente. Sin embargo, cuando se añaden capacitores en

serie con la carga, se logra la autoexcitación inclusive con resistencias de carga menores al valor crítico y se elimina la inflexibilidad del GIADBE que lograba la autoexcitación con resistencias de carga menores a la resistencia crítica. Se verifica el comportamiento del generador de inducción autoexcitado, con capacitores en el bobinado de excitación y con capacitores en serie con la carga (GIADBECSE) ante cambios bruscos de carga y ante cortocircuitos en la carga y en el capacitor serie.

Se analiza la operación en estado estacionario del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator, que posee capacitores en el bobinado de excitación y capacitores en serie con la carga en el bobinado de carga (GIADBECSE) y que está impulsado a una velocidad constante y que alimenta a una carga resistiva. Se presenta una metodología para seleccionar el capacitor *shunt* para la autoexcitación y el capacitor en serie con la carga para propiciar la autorregulación.

Para las simulaciones de la operación en estado estacionario se ha elaborado un programa en Matlab utilizando el método de Newton-Raphson como técnica numérica de solución.

Finalmente se resumen contribuciones y conclusiones, y se se delinea futuros trabajos que se desprenden del desarrollo alcanzado.

## **CAPITULO 1**

### **ESTRUCTURAS DE GENERACIÓN CON GENERADORES DE INDUCCIÓN**

#### **1.1 Clasificación de los generadores de inducción**

La máquina de inducción consta de un estator, en el que se aloja el devanado trifásico que se conecta al sistema eléctrico de frecuencia industrial (Red), y un rotor en cortocircuito en el que todos los fenómenos aparecen por inducción electromagnética.

El rotor de la máquina de inducción puede tener dos formas constructivas diferentes: el rotor de jaula, inaccesible y por lo tanto de características fijas, y el de rotor bobinado accesible a través de los correspondientes anillos rozantes.

Cuando una máquina de inducción es impulsada por medio de un motor externo a una velocidad mayor que la velocidad síncrona (deslizamiento negativo), la dirección del torque electromagnético se invierte, la potencia electromagnética sale por sus bornes y la máquina trabaja como generador de inducción. En esta condición de operación, en el diagrama de círculo de la máquina de inducción en la región de deslizamiento negativo, se nota que la máquina toma una corriente que se retrasa de la tensión en más de 90 grados [1], [2] y [3]. Esto significa que la potencia activa fluye hacia fuera de la máquina y que la potencia reactiva debe ingresar a la máquina, para magnetizarla y propiciar la conversión de energía.

Entonces, a diferencia de la máquina síncrona, la máquina de inducción no dispone de un devanado de excitación ubicado en el rotor, ni del sistema de control de la corriente de excitación. Por esta razón, para crear su campo magnético, la máquina de inducción debe absorber toda la potencia reactiva necesaria de la red [4] o de la red y un banco de capacitores conectados a sus bornes para la compensación de la potencia reactiva [5].

Por lo tanto para mantener la tensión en terminales del generador de inducción, la potencia reactiva para magnetizar el núcleo se debe proporcionar por algunos medios, en ese sentido, el generador de inducción puede trabajar en dos modos: Conectado al Sistema de Potencia y en un Sistema Aislado. En el Modo Conectado al Sistema de Potencia el generador de inducción extrae la potencia reactiva de la red y en el Modo Aislado la potencia reactiva debe ser suministrada íntegramente por un banco de capacitores dimensionado adecuadamente.

Los motores primos que se utilizan para impulsar a la máquina de inducción como generador pueden ser de velocidad constante o de velocidad variable, asimismo, la ubicación del grupo motor primo-generador puede estar cerca a la red o en lugares aislados. Por ello, según [6] las estructuras de generación se pueden clasificar en:

- De velocidad constante y frecuencia constante.
- De velocidad variable y frecuencia constante.
- De velocidad variable y frecuencia variable.

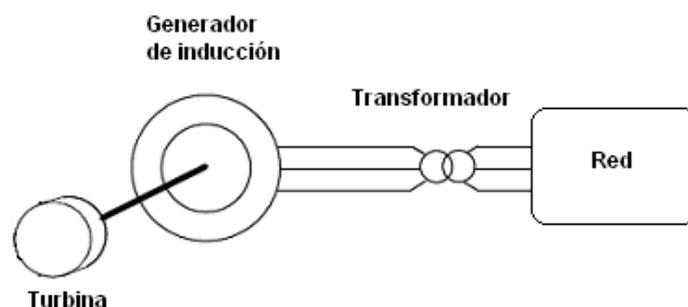
### 1.1.1 Estructuras de generación de velocidad constante y frecuencia constante

En estas estructuras de generación los terminales del estator de la máquina de inducción se conectan a la red de frecuencia constante, razón por la cual debe funcionar impulsado a velocidades por encima de la velocidad síncrona, que provocan deslizamientos del orden de 1% a 5%.

#### Generador de inducción con rotor de jaula y un único devanado en el estator

Es la forma constructiva más sencilla de la generador de inducción, ya que es una máquina trifásica de rotor de jaula de ardilla con un único devanado trifásico en el estator, que tiene un número de polos que normalmente puede ser igual a 4 o 6, considerado apropiado para evitar valores elevados de corriente y asegurar un funcionamiento estable.

En la Figura 1.1 se muestra esta estructura, que es sencilla y económica para una instalación eólica o en una pequeña central hidroeléctrica. El generador de inducción con rotor de jaula esta accionado por la turbina y conectado a la red eléctrica mediante un transformador de potencia.



**Figura 1.1** Generador de inducción de rotor de jaula conectado Directamente a la red de alterna.

**Fuente:** [7]

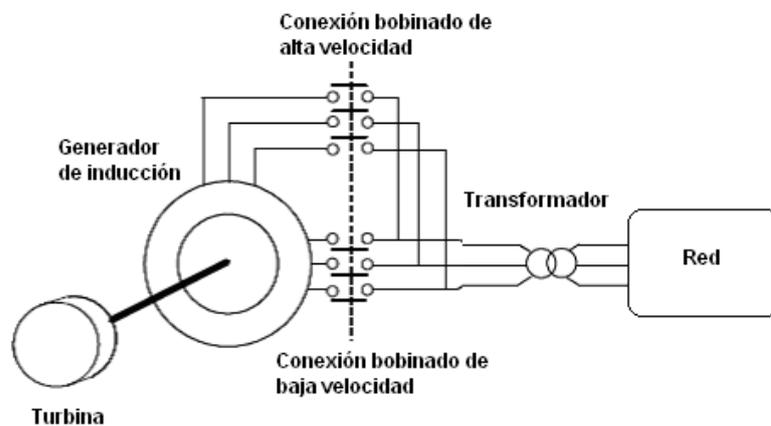
Como se ha indicado el rotor de la turbina debe girar a una velocidad aproximadamente constante, lo que en el caso eólico significa disminuir la energía extraída del viento. En función del lugar del recurso eólico, la velocidad media del viento suele variar en un rango

que puede ser de 6 a 10 m/s, sin embargo las turbinas eólicas están diseñadas para obtener máxima potencia con velocidades comprendidas, en general, entre 11 y 17 m/s [7]. Es decir, una turbina que funcione a velocidad prácticamente constante estaría trabajando en las condiciones óptimas de diseño solamente en contadas ocasiones. Además, no es posible ajustar la velocidad del eje de la turbina para compensar las variaciones de par, por lo que la potencia transmitida a la red será fluctuante.

### **Generador de Inducción con rotor de jaula y bobinados estáticos de dos velocidades**

En este caso se pretende aprovechar la simplicidad de la estructura anterior, pero incluyendo la posibilidad de extraer más energía de los vientos con baja velocidad. Para ello el estator se construye con dos devanados trifásicos independientes: uno con conductores de gran sección y bajo número de polos para aprovechar los vientos de alta energía y velocidad, y un segundo devanado, con conductores de menor sección, con el que se pretende aprovechar también los vientos de baja energía y velocidad.

En la Figura 1.2 se muestra la estructura correspondiente a esta configuración, en la cual, a 60 Hz, las máquinas podrían ser de 4/6 polos, con velocidades de 1800/1200 rpm ó de 6/8 polos (1200/900 rpm).



**Figura 1.2** Generador de Inducción con rotor de jaula y bobinados de dos velocidades, conectado directamente a la red de alterna.

**Fuente:** [7]

Esta es una estructura económica y a mitad de camino entre el caso anterior y los sistemas a velocidad variable, sin embargo, la potencia entregada a la red sigue siendo fluctuante.

## **1.1.2 Estructuras de generación de velocidad variable y frecuencia constante**

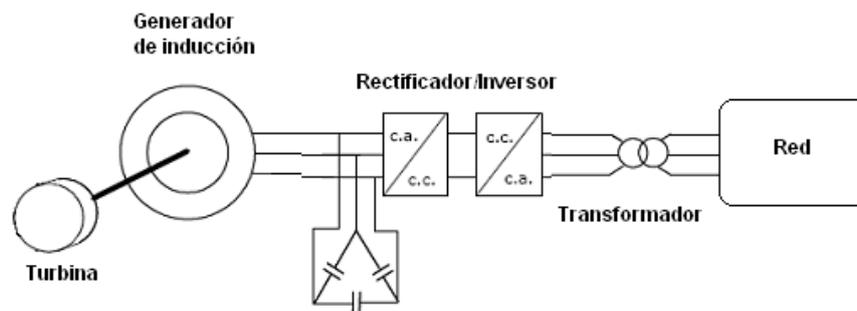
### **1.1.2.1 Entregando potencia activa a una red de frecuencia constante**

A continuación se muestra estructuras de generación de velocidad variable muy populares para entregar potencia activa a una Red de frecuencia constante.

### Generador de Inducción con rotor de jaula de ardilla

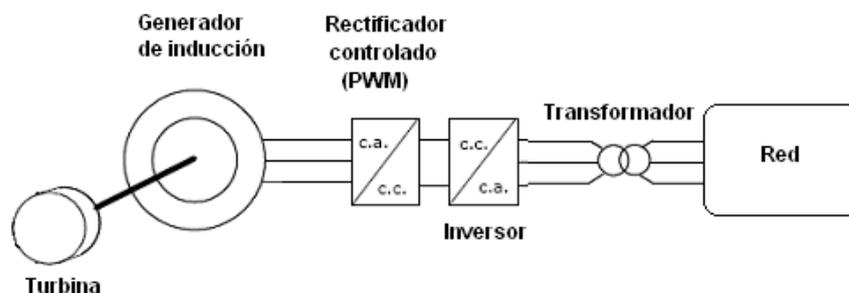
Las configuraciones de las Figuras 1.3 y 1.4 permiten el funcionamiento a cualquier velocidad. Se observa que la diferencia con las anteriores está en la conexión a la Red, que en este caso se realiza a través de un convertidor, lo que encarece sensiblemente el sistema.

Si la etapa rectificadora es no controlada (un simple puente de diodos) el generador no puede absorber energía reactiva de la red, y será necesario incorporar en bornes un banco de capacitores que se la suministre la potencia reactiva que no puede ser tomada de la Red. Los condensadores se suponen conectados en triángulo por razones económicas.



**Figura 1.3** Generador de inducción de rotor de jaula impulsado a velocidad variable  
Fuente: [7]

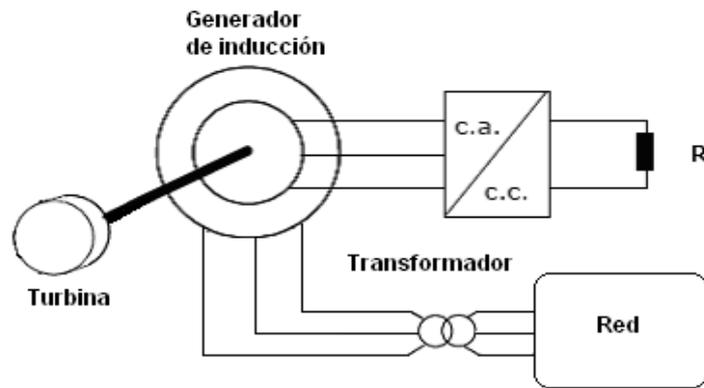
En la configuración de la Figura 1.4 se ha sustituido el puente de diodos por un rectificador controlado, que permite el flujo de energía en las dos direcciones, lo que permite eliminar el banco de capacitores, sin embargo el sistema se encarece aún más.



**Figura 1.4** Generador de inducción de rotor de jaula impulsado a velocidad variable  
Fuente: [7]

### Generador de Inducción de rotor bobinado

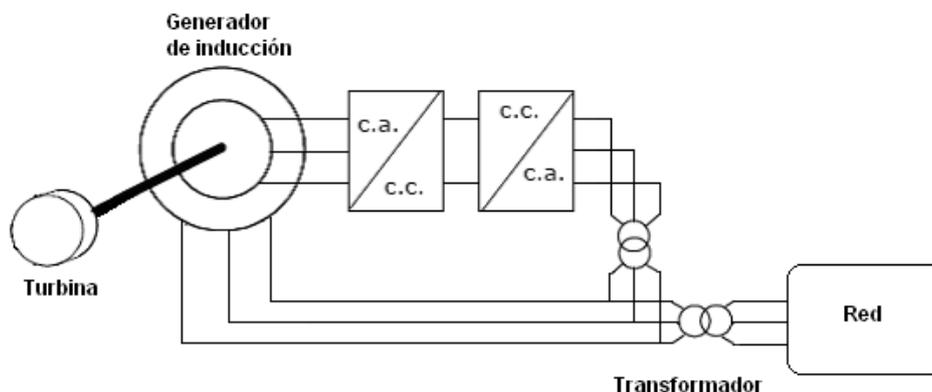
Para que sea mayor el rango de velocidades en el cual se presenta la variación lineal del torque electromagnético con el deslizamiento, se inserta una resistencia en serie con el rotor. Sin embargo, en este sistema al incrementarse la resistencia del rotor, se incrementan las pérdidas por efecto Joule en el rotor, con lo que el rendimiento del sistema disminuye. Aun cuando es grande el tamaño de estas resistencias la variación de velocidad que se consigue sigue siendo relativamente pequeña. En la Figura 1.5 se muestra esquemáticamente esta configuración.



**Figura 1.5** Generador de inducción de rotor bobinado impulsado a velocidad variable con resistencia variable en el rotor

**Fuente:** [7]

La configuración de la Figura 1.6 se basa en el mismo principio que la anterior, pero es energéticamente más eficiente puesto que en lugar de disipar energía en las resistencias, esta potencia se entrega a la red. El control de la potencia extraída del rotor, o lo que es lo mismo, el control de velocidad, se consigue simplemente por variación del ángulo de disparo de los tiristores.



**Figura 1.6** Generador de inducción de rotor bobinado impulsado a velocidad variable con disipación de energía en el rotor

**Fuente:** [7]

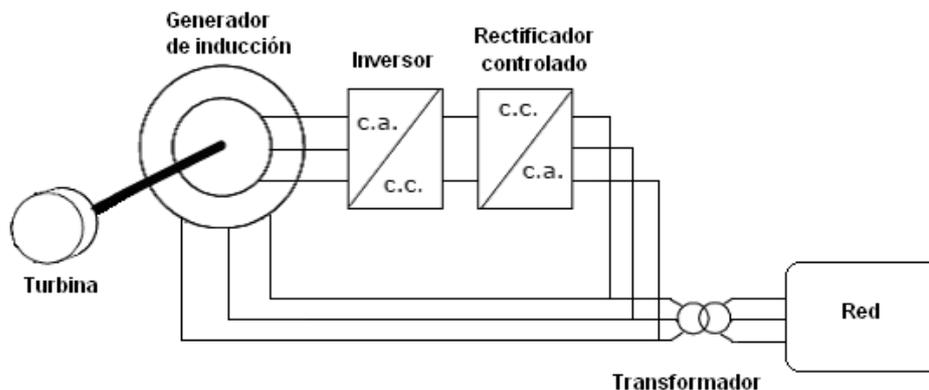
### Generador de inducción con doble alimentación

El esquema de la instalación es el que se muestra en la Figura 1.7. En este caso, la tensión de salida del estator, debidamente rectificadora y ondulada se utiliza para alimentar el devanado rotórico, de ahí la denominación de máquina doblemente alimentada.

Al inyectar en el rotor un sistema trifásico de corrientes de frecuencia tal que se consiga que en el entrehierro de la máquina existan dos campos giratorios con la misma velocidad, el campo magnético del estator (que depende del número de polos de la máquina y la frecuencia de la Red) y el que determina el rotor, que está impulsado mecánicamente a cierta velocidad.

El sistema trifásico de corrientes inyectado al rotor produce un campo giratorio que también gira a la velocidad síncrona si la frecuencia rotórica se ajusta cumpliendo con la siguiente relación:

$$F_{rotor} = F_{estator} - \text{Número de Polos} * RPM_{rotor}/120$$



**Figura 1.7** Generador de inducción con doble alimentación a velocidad variable  
**Fuente:** [7]

En estas condiciones el funcionamiento de la máquina de inducción es similar al de un generador síncrono, ya que tendrá dos campos giratorios estacionarios entre sí. Por esta razón a esta máquina se le llama “asíncrona sincronizada”, presenta todas las ventajas de la generación síncrona y de la máquina de inducción.

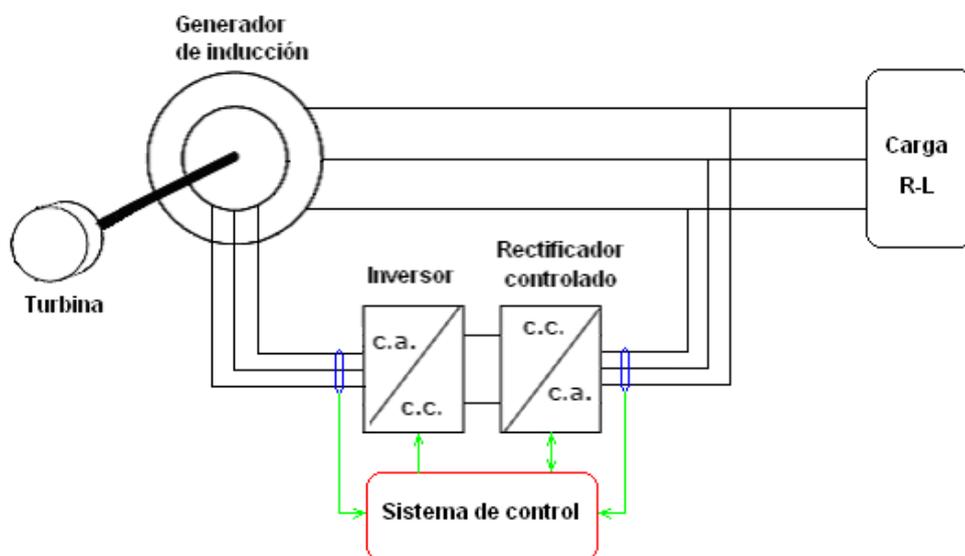
#### 1.1.2.2 Entregando potencia activa a una carga aislada a frecuencia controlada

Las micro-centrales de generación, tiene su principal aplicación en la provisión de energía eléctrica, a consumidores alejados de la red de distribución, que de otra forma no podrían acceder a ella. Debido a la naturaleza de las fuentes de energía que se disponen en estos casos (hidráulicas, eólicas y otras), y con el objetivo de captar la máxima energía posible, es necesario permitir que estas micro-centrales funcionen a velocidad variable. Sumado a esto, no es posible utilizar la red de distribución para regular

frecuencia y tensión, sin embargo la energía generada en forma aislada debe poseer una calidad adecuada para su consumo.

En este sentido, se han propuesto algunos sistemas de generación aislada con velocidad variable que utilizan generadores de inducción, que pueden regular la tensión con frecuencia variable [8] y [9]. Otros sistemas de generación aislada, entregan tensión y frecuencia regulada [10] y [11].

En la Figura 1.8 se muestra una estructura aislada de generación con un generador de inducción con doble alimentación impulsado a velocidad variable, que utiliza un sistema de control para mantener frecuencia constante e la carga.



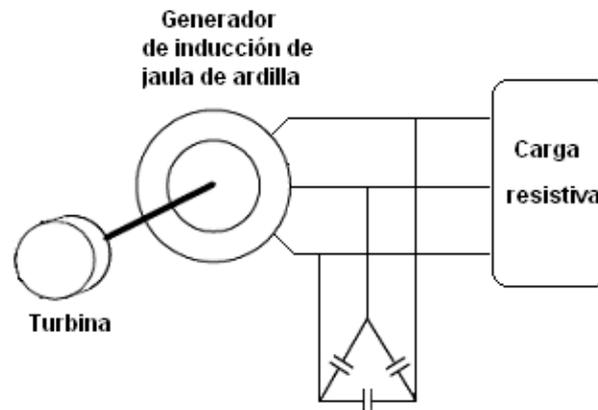
**Figura 1.8** Generador de inducción con doble alimentación impulsado a velocidad variable alimentado una carga aislada  
**Fuente:** [7]

### 1.1.3 Estructuras de generación de velocidad variable y frecuencia variable

Con motores primos de velocidad variable, el funcionamiento de generadores síncronos puede ser afectado. Para velocidad variable que corresponde a la velocidad derivada cambiante, el Generador de Inducción Autoexcitado puede ser convenientemente utilizado para alimentar cargas resistivas de calefacción, que son esencialmente insensibles a la frecuencia.

En la Figura 1.9 se muestra una estructura de generación de este tipo que utiliza una máquina de inducción de jaula de ardilla, que a pesar de ser más simple y de menor costo que una de rotor bobinado de similar potencia, requiere menor mantenimiento, es más robusta y presenta mayor confiabilidad de operación.

En ese sentido, el presente trabajo se centra en este tipo de estructuras de generación aislada, que utiliza al Generador de Inducción Autoexcitado, que está ganando gran importancia para los usos independientes de la energía eólica [12].



**Figura 1.9** Generador de inducción de jaula de ardilla alimentando una carga aislada  
**Fuente:** [6]

## 1.2 Formulación del problema

El generador de inducción es ampliamente conocido por su operación en paralelo con un sistema eléctrico de potencia que le provee la potencia reactiva para la creación del campo magnético, tal como se ha reportado en numerosas aplicaciones a nivel mundial. En el ámbito nacional, en [13] se describe una aplicación del generador de inducción operando en paralelo con un sistema eléctrico de potencia, sin embargo como se ha manifestado, es factible su operación autónoma como generador autoexcitado.

El concepto de autoexcitación de la máquina de inducción emergió por primera vez en 1935, cuando Basset y Potter [14] mostraron que la máquina de inducción puede funcionar como generador en modo aislado, si es impulsada a una velocidad determinada y se le conecta un capacitor, en paralelo con los terminales del estator. Este banco en conexión “shunt” le va a suministrar a la máquina la potencia reactiva requerida para generar la tensión buscada.

El proceso de crecimiento de la tensión en un generador de inducción es muy similar al caso de un generador autoexcitado de corriente continua, por lo cual debe existir un valor conveniente de magnetismo remanente presente en el rotor. En ausencia de un valor apropiado de magnetismo remanente, el voltaje no crecerá: por ello es tan deseable mantener un alto nivel del magnetismo residual, con lo cual se facilita el proceso de autoexcitación de la máquina.

Por lo tanto para la operación autónoma del generador de inducción, la tensión remanente inducida por el flujo remanente del rotor constituye el punto de partida para

que se inicie el crecimiento de la tensión, la que es incrementada por la corriente del banco de capacitores produciéndose la autoexcitación. El valor final de la tensión en terminales se establece por el equilibrio entre la potencia reactiva que puede entregar el banco de capacitores y la potencia reactiva requerida por la máquina, que esta definida por la saturación de su circuito magnético. En ese sentido a lo largo de los años se ha investigado el principio de funcionamiento, diseño y aspectos de control del Generador de Inducción Autoexcitado (GIA).

Desde los años ochenta, debido al énfasis impuesto en los recursos de energía renovable, ha cobrado importancia el desarrollo de fuentes independientes de generación, con un generador asíncrono autoexcitado mediante capacitores en conexión “shunt” e impulsado por motores primos como molinos de viento, pequeñas turbinas hidráulicas, motores de combustión que utilizan el biogás, etc. En tal sentido debido a su bajo costo, a que no requiere una fuente independiente de potencia para la excitación, a su robustez y construcción del rotor sin escobillas, facilidad de mantenimiento, autoprotección en condiciones de falla, el GIA convencional se ha convertido en una alternativa importante en las fuentes de generación autónomas [16] y [17] frente al generador síncrono (alternador convencional).

Existen numerosas publicaciones que han tratado en detalle el análisis en estado estacionario del GIA convencional. En estos trabajos se muestran diversas técnicas de solución ya sea utilizando el circuito equivalente de estado estacionario o el circuito equivalente operacional, entre ellos se puede citar a [15], [18], [19], [20] y [21].

En 1963, Doxey [15] propuso inicialmente un método de análisis gráfico para explicar y calcular su comportamiento en estado estacionario del GIA. En [20] se analiza los requerimientos de capacitores “shunt” para generadores asíncronos autoexcitados convencionales, proponiendo un método analítico para calcular la capacitancia mínima requerida para la autoexcitación en vacío; mostrando que este valor es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad y a la reactancia magnetizante saturada. Asimismo, se examina la influencia de la magnitud del banco de capacitores “shunt” sobre la máxima potencia disponible en terminales del generador asíncrono autoexcitado. En todos los trabajos mencionados, se ha puesto en evidencia que la principal desventaja del GIA es su pobre regulación de tensión, inclusive operando con velocidad regulable. Por esta razón se ha investigado soluciones para mejorar la característica externa (Tensión-Potencia) del GIA y mejorar su factibilidad de aplicación como fuente de generación independiente. En [22] y [23] se han presentado diversos esquemas de regulación de tensión, que utilizan capacitores “shunt”, inductancias variables o reactores saturables, en esquemas de lazo cerrado usando contactores o conmutación a tiristores.

Sin embargo estas soluciones de reguladores de tensión implican configuraciones complejas e intrincados diseños de circuitos de control y problemas operacionales como armónicos y transitorios de conmutación que vician las grandes ventajas de las máquinas asíncronas como fuentes de generación autónomas.

En este contexto, la incorporación de capacitores en conexión serie para proveer potencia reactiva adicional, cuando el GIA opera con carga, ha resultado una de las más atractivas opciones para mejorar la regulación del GIA, que logra eliminar el requerimiento de un regulador de tensión ya que la compensación serie tiene carácter autoregulante. En ese sentido en [24] y [25] se ha investigado esquemas de autorregulación utilizando capacitores en serie para reforzar la potencia reactiva suministrada por los capacitores conectados en paralelo con los terminales de la máquina y lograr una característica externa (Tensión-Potencia) con tensión razonablemente constante. Los capacitores serie pueden conectarse de dos formas; en la primera (conexión corta) los capacitores están en serie con la carga y en la segunda (conexión larga) se conectan en serie con cada fase de la máquina, para compensar la caída de tensión en la resistencia y la reactancia de dispersión del estator. Tanto en [24] como en [25] se utiliza el circuito equivalente para el análisis de la operación en estado estacionario del GIA con compensación serie y se presenta técnicas numéricas de solución del circuito equivalente incorporando la saturación. En ambos trabajos la saturación es incluida utilizando la característica Tensión en el entrehierro-Reactancia Magnetizante, que se obtiene a partir de un ensayo en vacío del motor asíncrono seleccionado para operar como generador asíncrono. Asimismo, [24] y [25] demuestran que la regulación de tensión y la capacidad de corriente del GIA se mejoran sustancialmente con una apropiada selección de los capacitores “shunt” y serie.

En [25] se presenta una metodología para la selección de los capacitores “shunt” y serie a ser utilizados en el GIA y se demuestra que la conexión corta de los capacitores en serie, constituye la alternativa de autorregulación que ofrece una mejor característica externa.

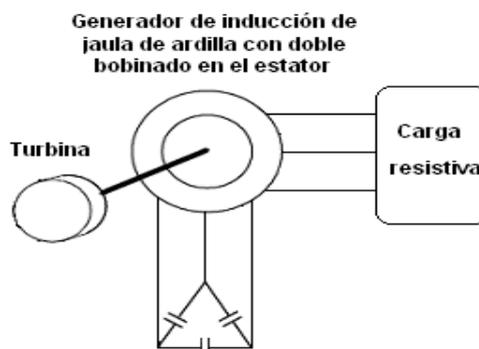
Por otro lado, en cuanto al análisis transitorio del GIA se ha recopilado algunos trabajos que muestran el comportamiento transitorio del GIA, particularmente la autoexcitación y desexcitación [26], [29] y [30].

En [23], utilizando las ecuaciones de la máquina de inducción saturada, se estudia el proceso de autoexcitación en vacío del GIA y los transitorios de conexión de una carga puramente resistiva, y en otro caso, la conexión de una carga puramente resistiva en serie con un capacitor. De esa manera demuestran la eficacia de la compensación serie para el suministro de la potencia reactiva adicional debido al incremento de la corriente

de carga en los generadores asíncronos. En este trabajo la saturación fue incorporada utilizando la teoría del "efecto de acople cruzado" mediante el cual dos bobinados con sus ejes magnéticos en cuadratura exhiben una interacción magnética específica debido a la saturación del camino del flujo principal de la máquina. Este planteamiento fue desarrollado en algunos trabajos, entre los que se puede mencionar a [27] y [28], en los cuales, para incorporar el efecto de la saturación se realizó modificaciones en los elementos de la matriz de inductancias de la máquina usando la inductancia magnetizante  $L_m = \Psi_m / i_m$  y su derivada  $d/L_m / d/i_m$ .

Por su lado, en [29] se ha estudiado en forma detallada el comportamiento transitorio del GIA y autorregulado con capacitores serie en conexión corta, para lo cual incorpora la saturación cruzada utilizada en [26]. Los resultados muestran que el GIA autorregulado con capacitores serie en conexión corta presenta una buena regulación de tensión y alta capacidad de sobrecarga, asimismo, puede soportar la conexión de cargas del orden del 160 % de la nominal sin desexcitarse, la condición final de operación de la máquina si se produce un cortocircuito en la carga es de sobreexcitación y alta corriente que van a posibilitar la operación de dispositivos de protección.

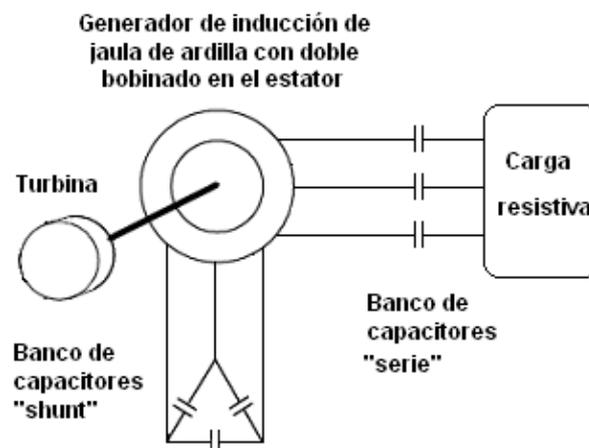
A su vez en [30] se presenta un análisis transitorio de los fenómenos de la autoexcitación y desexcitación del GIA, asimismo se incluye un análisis dinámico de estos fenómenos utilizando la teoría de la bifurcación, presentando los ensayos experimentales que validan los resultados encontrados. La incorporación de la saturación es realizada mediante la utilización de un polinomio que describe la variación de  $1/L_m$  con el flujo concatenado magnetizante  $\Psi_m$ , obtenido a partir del ensayo en vacío. En [30] se ha mostrado que el modelo desarrollado permite simular correctamente las evoluciones en el tiempo de la tensión y la corriente obtenidas experimentalmente en la autoexcitación y desexcitación del GIA.



**Figura 1.10** Generador de inducción de jaula de ardilla con doble bobinado en el estator alimentando una carga aislada  
**Fuente:** [31, 32]

En [31] se desarrolló y verificó experimentalmente el modelo para el análisis de la operación en estado estacionario de un generador asíncrono autoexcitado con dos bobinados independientes en el estator (GIADBE), el cual se muestra esquemáticamente en la Figura 1.10. En el bobinado de mayor tensión, se conectó los capacitores “shunt” de excitación y en el otro bobinado se conectó una carga puramente resistiva. El modelo de este Generador de Inducción no convencional se desarrolló con la finalidad de aplicarlo a la verificación del diseño de generadores de inducción destinados a plantas eólicas, los que tenían previsto entregar potencia por medio de un sistema de rectificación a un banco de baterías de 12 o 24 voltios. En estos casos resultaba adecuado utilizar un bobinado independiente de mayor tensión para la conexión de los capacitores de excitación [32]. El GIADBE, al igual que el GIA convencional, presenta la desventaja de la pobre regulación de tensión y la desexcitación con potencia mayores a la potencia máxima alcanzada.

En el presente trabajo se ha desarrollado el modelo para el análisis de estado estacionario y transitorio del Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el estator, el cual, además de los capacitores “shunt” para la autoexcitación, posee capacitores en serie con la carga. En esta propuesta, que se esquematiza en la Figura 1.10, los capacitores serie se han utilizado para mejorar la regulación de tensión e incrementar la capacidad de sobrecarga del Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el estator.



**Figura 1.11** Generador de inducción de jaula de ardilla con doble bobinado en el estator con capacitores serie y alimentando una carga aislada

**Fuente:** [8]

Para representar a esta máquina las ecuaciones han sido reformuladas en términos de flujos concatenados y se ha representado la saturación del circuito magnético del generador utilizando el modelo propuesto y verificado experimentalmente en [30].

### 1.3 Objetivos de la tesis

Se ha planteado los siguientes objetivos:

- (1) En virtud a que la saturación del circuito magnético del generador se representa incorporando la saturación mediante la utilización de un polinomio que describe la variación de  $1/M$  con el flujo concatenado magnetizante de la máquina  $\psi_m$ , se desarrollan las ecuaciones del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator, con un capacitor *shunt* en el devanado de excitación y un capacitor en serie con la carga conectados al bobinado de carga (GIADBECSE), en términos de flujos concatenados utilizando un sistema de referencia d-q fijo al estator.
- (2) El modelo del GIADBECSE es particularizado para el análisis del proceso de autoexcitación del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator con un capacitor *shunt* en el devanado de excitación (GIADBE). En un caso el modelo se utiliza para la excitación en vacío con un capacitor shunt y en otro caso, con un capacitor en serie adicional para la autoexcitación con una carga determinada. Con estos modelos se muestra el proceso transitorio de autoexcitación del generador de inducción con doble bobinado en el estator impulsado a velocidad constante, en vacío, con carga y serán definidas posibles condiciones críticas de excitación.
- (3) Utilizando el Modelo desarrollado se simulan transitorios de interés en este generador, tales como cambios bruscos de carga, cortocircuitos en la carga y cortocircuito en el capacitor serie. Mediante estas simulaciones se muestra las ventajas de la incorporación de capacitores en serie.
- (4) El Modelo del GIADBECSE es particularizado para obtener sus características de estado estacionario impulsado a velocidad constante y alimentando cargas resistivas, mostrando el efecto autorregulador del capacitor serie.
- (5) Establecer conclusiones sobre el GIADBECSE y mostrar un camino para futuros trabajos en el tema.

#### 1.4 Organización de la tesis

En este trabajo se propone un modelo para el generador de inducción con doble bobinado en el estator, que además de los capacitores *shunt* para la autoexcitación, posee capacitores en serie con la carga. Los capacitores en serie se proponen para mejorar la regulación de tensión y para incrementar la potencia de salida del generador de inducción.

En el capítulo 2 se describe el modelo de la máquina inducción con doble bobinado en el estator en coordenadas *abc* y en coordenadas *qd0*. Para ello se desarrollan las transformaciones de fases apropiadas, para reemplazar los bobinados trifásicos del estator y rotor mediante bobinados bifásicos equivalentes. Asimismo, se muestra la transformación para reemplazar el bobinado bifásico del rotor que gira a una determinada velocidad, por uno bifásico que esta fijo al estator. Finalmente en el modelo d-q obtenido los bobinados equivalentes se reflejan al devanado de excitación y se insertan los elementos pasivos: capacitores *shunt* y serie y la resistencia de carga.

En el capítulo 3 se muestra de manera cualitativa el proceso transitorio de autoexcitación del generador de inducción (GI) convencional, resaltando el papel que juega la saturación del circuito de la máquina en la estabilización de este proceso. Para ello se ha modelado la saturación mediante una relación empírica entre la inversa de la inductancia magnetizante y el flujo concatenado magnetizante de la máquina. Asimismo, se muestra las particularidades del proceso de autoexcitación del generador de inducción convencional cuyos resultados indican que para condiciones dadas de velocidad existe un valor mínimo de capacitor de excitación con el cual no es posible la autoexcitación del GI convencional. Asimismo, se muestra que con un determinado capacitor de excitación, existe un valor mínimo de velocidad con el cual se impulsa el GI y no es posible la autoexcitación.

En el capítulo 4 se muestra el proceso de autoexcitación del generador de inducción con doble bobinado en el estator (GIDBE), que posee un banco de capacitores en el bobinado de excitación, esta impulsado a una determinada velocidad y posee una carga resistiva en el bobinado de excitación. Se demuestra que es posible lograr la autoexcitación del GIDBE con magnitudes de resistencias de carga determinadas y que existe un valor denominado resistencia crítica, con la cual aun se logra la autoexcitación. También se evalúa el comportamiento transitorio del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator (GIADBE), que esta operando inicialmente en una determinada condición de estado estacionario y se producen cambios bruscos de carga. De manera similar se analiza el comportamiento del GIADBE cuando se produce un cortocircuito trifásico en la carga para mostrar que con esta falla se desexcita instantáneamente.

Luego se añaden capacitores en serie con la carga y mediante simulaciones se muestra que se logra la autoexcitación inclusive con resistencias de carga menores al valor crítico y se elimina la inflexibilidad del GIADBE que lograba la autoexcitación con resistencias de carga menores a la resistencia crítica. Se verifica el comportamiento del generador de inducción autoexcitado, con capacitores en el bobinado de excitación y con capacitores en serie con la carga (GIADBECSE) ante cambios bruscos de carga y ante cortocircuitos en la carga y en el capacitor serie.

En el capítulo 5 se describe la operación en estado estacionario del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator, que posee capacitores en el bobinado de excitación y capacitores en serie con la carga en el bobinado de carga (GIADBECSE) y que está impulsado a una velocidad constante  $\omega_r$  y que alimenta a una carga resistiva, conectada en el bobinado de carga. Se presenta una metodología para seleccionar el capacitor *shunt* para la autoexcitación y el capacitor en serie con la carga para propiciar la autorregulación.

Se ha elaborado un programa en Matlab para las simulaciones de la operación en estado estacionario utilizando el método de Newton-Raphson como técnica numérica de solución.

Finalmente en el capítulo 6 se resumen las contribuciones y las conclusiones del presente trabajo, asimismo, se delinea futuros trabajos que se desprenden del desarrollo alcanzado.

## CAPITULO 2

### MODELO MATEMATICO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN CON DOBLE BOBINADO EN EL ESTATOR

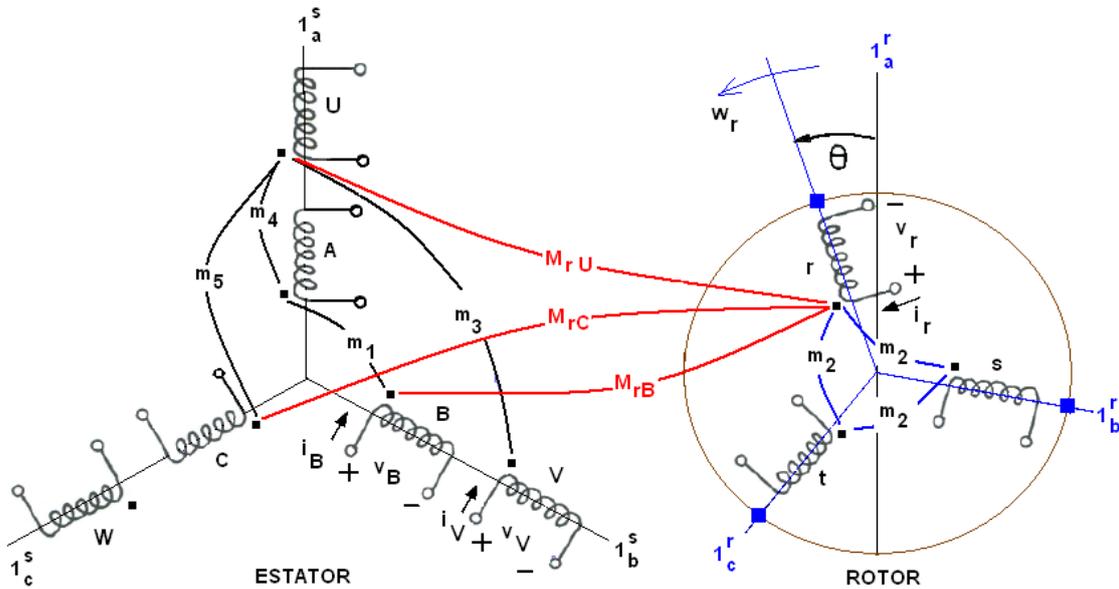
En este capítulo se muestra el desarrollo del modelo matemático del Generador de Inducción con Doble Bobinado en el Estator (GIDBE) utilizando los flujos concatenados como variables de interés.

#### **2.1 Generador de inducción trifásico con doble bobinado en el estator**

En la Figura 2.1 se muestra una representación esquemática de la máquina de inducción trifásica con doble bobinado en el estator. Las bobinas A, B y C, ubicadas en el estator representan al devanado trifásico de excitación (en el cual se conecta el banco trifásico de capacitores) y tienen un número efectivo de vueltas por fase  $N_1$ . El devanado trifásico de carga (U, V y W), también está ubicado en el estator, tiene un número efectivo de vueltas por fase  $N_3$ . El devanado rotórico se ha representado por las bobinas r, s y t, que tienen un número efectivo de vueltas por fase  $N_2$ .

En la referencia [31] se ha modelado el Generador de Inducción Trifásico con Doble Bobinado en el Estator utilizando las corrientes de las bobinas como variables y considerando los siguientes supuestos:

- (a) La inducción magnética en el entrehierro está distribuida en forma cosenoidal. Esto implica despreciar los armónicos espaciales del campo y los armónicos producidos por el efecto de las ranuras del estator y rotor del circuito magnético de la máquina.
- (b) Para el desarrollo de las ecuaciones se asume que el sistema es lineal, y por lo tanto se dejan de lado las variaciones de las inductancias con respecto a las corrientes. Para tomar en cuenta el efecto de la saturación en el modelo las inductancias de dispersión del estator y rotor, son independientes de las corrientes y la inductancia magnetizante es una función de la corriente magnetizante.
- (c) Las pérdidas en el hierro del circuito magnético de la máquina son despreciables.



**Figura 2.1** Generador de Inducción Trifásico con Doble Bobinado en el Estator  
**Fuente:** [31]

Como se aprecia en la Figura 2.1 el GIDBE esta representada por nueve bobinas acopladas magnéticamente, cuyas tensiones y corrientes se relacionan según la ecuación (2.1).

$$[V] = [Z] * [I] \quad (2.1)$$

En esta ecuación  $[V]$  e  $[I]$  son los vectores de tensiones y corrientes, y  $[Z]$  la matriz de impedancias. La ecuación (2.1) tiene el siguiente detalle:

$$\begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{11}] & [Z_{12}] \\ [Z_{21}] & [Z_{22}] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$[V_1]$ ,  $[I_1]$  y  $[V_2]$ ,  $[I_2]$  son los vectores de tensiones y corrientes del estator y rotor respectivamente, que tienen los elementos mostrados en (2.3) y (2.4).

$$\begin{aligned} [V_1]^t &= [v_A \quad v_B \quad v_C \quad v_U \quad v_V \quad v_W] \\ [I_1]^t &= [i_A \quad i_B \quad i_C \quad i_U \quad i_V \quad i_W] \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} [V_2]^t &= [v_r \quad v_s \quad v_t] = [0 \quad 0 \quad 0] \\ [I_2]^t &= [i_r \quad i_s \quad i_t] \end{aligned} \quad (2.4)$$

### 2.1.1 Elementos de la matriz $[Z_{11}]$

La matriz  $[Z_{11}]$  de impedancias del estator esta conformada por las impedancias propias de las bobinas A, B, C, U, V y W y las inductancias mutuas entre ellas, su estructura esta dada por la ecuación (2.5).

$$[Z_{11}] = \begin{bmatrix} R_1 + l_1 p & pM_{AB} & pM_{AC} & pM_{AU} & pM_{AV} & pM_{AW} \\ pM_{BA} & R_1 + l_1 p & pM_{BC} & pM_{BU} & pM_{BV} & pM_{BW} \\ pM_{CA} & pM_{CB} & R_1 + l_1 p & pM_{CU} & pM_{CV} & pM_{CW} \\ pM_{UA} & pM_{UB} & pM_{UC} & R_3 + l_3 p & pM_{UV} & pM_{UW} \\ pM_{VA} & pM_{VB} & pM_{VC} & pM_{VU} & R_3 + l_3 p & pM_{VW} \\ pM_{WA} & pM_{WB} & pM_{WC} & pM_{WU} & pM_{WV} & R_3 + l_3 p \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

En esta ecuación,  $R_1, l_1, R_3, l_3$  son las resistencias e inductancias propias de cada fase de los devanados de excitación y carga del estator. Las inductancias propias están dadas por las relaciones  $l_1 = l_{1\sigma} + l_{1m}$  y  $l_3 = l_{3\sigma} + l_{3m}$ , siendo  $l_{1\sigma}$  y  $l_{3\sigma}$  las inductancias de dispersión y  $l_{1m}, l_{3m}$  las inductancias magnetizantes. Las inductancias magnetizantes de los devanados de excitación y carga del estator están definidas como  $l_{1m} = N_1^2 \lambda_m$  y  $l_{3m} = N_3^2 \lambda_m$ , siendo  $\lambda_m$  la conductancia magnetizante.

Los elementos del tipo  $M_{ij}$  son las inductancias mutuas entre las bobinas del estator y se definen como  $M_{ij} = N_i N_j \lambda_m \cos(\alpha_{ij})$ ,  $\alpha_{ij}$  es el ángulo que hacen los ejes magnéticos de las bobinas "i" y "j". Por lo tanto estas inductancias mutuas son:

$$\begin{aligned} M_{AB} &= M_{BC} = M_{CA} = M_{BA} = M_{CB} = M_{AC} = N_1^2 \lambda_m \cos(120) = m_1 \\ M_{UA} &= M_{VB} = M_{WC} = N_1 N_3 \lambda_m \cos(0) = m_4 \\ M_{UB} &= M_{UC} = M_{VA} = M_{VC} = M_{WA} = M_{WB} = N_1 N_3 \lambda_m \cos(120) = -m_4 / 2 = m_5 \quad (2.6) \\ M_{UV} &= M_{VW} = M_{WU} = M_{VU} = M_{WV} = M_{UW} = N_3^2 \lambda_m \cos(120) = m_3 \end{aligned}$$

Reemplazando estos valores en (2.5) se obtiene la matriz de impedancias  $[Z_{11}]$  del estator:

$$[Z_{11}] = \begin{bmatrix} R_1 + l_1 p & m_1 p & m_1 p & m_4 p & m_5 p & m_5 p \\ m_1 p & R_1 + l_1 p & m_1 p & m_5 p & m_4 p & m_5 p \\ m_1 p & m_1 p & R_1 + l_1 p & m_5 p & m_5 p & m_4 p \\ m_4 p & m_5 p & m_5 p & R_3 + l_3 p & m_3 p & m_3 p \\ m_5 p & m_4 p & m_5 p & m_3 p & R_3 + l_3 p & m_3 p \\ m_5 p & m_5 p & m_4 p & m_3 p & m_3 p & R_3 + l_3 p \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

### 2.1.2 Elementos de la matriz $[Z_{21}]$

Esta matriz esta conformada por las inductancias mutuas de las bobinas del rotor (r, s y t) con las bobinas estator (A, B, C, U, V y W). La estructura de la matriz  $[Z_{21}]$  esta dada por la ecuación (2.8).

$$[Z_{21}] = \begin{bmatrix} pM_{rA} & pM_{rB} & pM_{rC} & pM_{rU} & pM_{rV} & pM_{rW} \\ pM_{sA} & pM_{sB} & pM_{sC} & pM_{sU} & pM_{sV} & pM_{sW} \\ pM_{tA} & pM_{tB} & pM_{tC} & pM_{tU} & pM_{tV} & pM_{tW} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Las inductancias mutuas entre las bobinas del rotor y las bobinas del estator se definen como  $M_{ij} = N_i N_j \lambda_m \cos(\alpha_{ij})$ ,  $\alpha_{ij}$  es el ángulo que hacen los ejes magnéticos de las bobinas "i" y "j". Estas inductancias se definen como:

$$\begin{aligned} M_{rA} &= M_{sB} = M_{tC} = N_2 N_1 \lambda_m \cos(\theta) = m \cos(\theta) \\ M_{rB} &= M_{sC} = M_{tA} = N_2 N_1 \lambda_m \cos(120 + \theta) = m \cos(120 + \theta) \\ M_{rC} &= M_{sA} = M_{tB} = N_2 N_1 \lambda_m \cos(120 + \theta) = m \cos(120 + \theta) \\ M_{rU} &= M_{sV} = M_{tW} = N_2 N_3 \lambda_m \cos(\theta) = m' \cos(\theta) \\ M_{rV} &= M_{sU} = M_{tW} = N_2 N_3 \lambda_m \cos(\theta) = m' \cos(\theta) \\ M_{rW} &= M_{sU} = M_{tV} = N_2 N_3 \lambda_m \cos(120 - \theta) = m' \cos(120 - \theta) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Reemplazando los valores de (2.9) en (2.8) se obtiene la matriz de impedancias mutuas rotor-estator.

$$[Z_{21}] = \begin{bmatrix} mp \cos(\theta) & mp \cos(120 + \theta) & mp \cos(120 - \theta) & m'p \cos(\theta) & m'p \cos(120 + \theta) & m'p \cos(120 - \theta) \\ mp \cos(120 - \theta) & mp \cos(\theta) & mp \cos(120 + \theta) & m'p \cos(120 - \theta) & m'p \cos(\theta) & m'p \cos(120 + \theta) \\ mp \cos(120 + \theta) & mp \cos(120 - \theta) & mp \cos(\theta) & m'p \cos(120 + \theta) & m'p \cos(120 - \theta) & m'p \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

### 2.1.3 Elementos de la matriz $[Z_{12}]$

Como se ha dejado de lado la saturación del núcleo, se cumple que:

$$[Z_{12}] = [Z_{21}]^t \quad (2.11)$$

### 2.1.4 Elementos de la matriz $[Z_{22}]$

Los elementos de esta matriz son las resistencias e inductancias propias de cada fase del devanado rotórico, y las inductancias mutuas entre estos devanados, tal como se muestra en la ecuación (2.12).

$$[Z_{22}] = \begin{bmatrix} R_2 + l_2 p & pM_{rs} & pM_{rt} \\ pM_{sr} & R_2 + l_2 p & pM_{st} \\ pM_{tr} & pM_{ts} & R_2 + l_2 p \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

En esta ecuación,  $R_2, l_2$  son las resistencias e inductancias propias de cada fase de los devanados del rotor. Las inductancias propias de cada fase está dada por la relación  $l_2 = l_{2\sigma} + l_{2m}$ , siendo  $l_{2\sigma}$  la inductancia de dispersión y  $l_{2m}$  la inductancia magnetizante. La inductancia magnetizante del rotor está definida por  $l_{2m} = N_2^2 \lambda_m$ .

Los elementos del tipo  $M_{ij}$  son las inductancias mutuas entre las bobinas del rotor (r, s y t) y se definen como  $M_{ij} = N_2^2 \lambda_m \cos(120^\circ)$ . Estas inductancias están dadas por las siguientes relaciones:

$$M_{rs} = M_{st} = M_{tr} = N_2^2 \lambda_m \cos(120^\circ) = m_2 \quad (2.13)$$

Reemplazando (2.13) en (2.12) se obtiene:

$$[Z_{22}] = \begin{bmatrix} R_2 + l_2 p & m_2 p & m_2 p \\ m_2 p & R_2 + l_2 p & m_2 p \\ m_2 p & m_2 p & R_2 + l_2 p \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Al revisar la estructura de la matriz de impedancias  $[Z]$  del GIDBE se puede remarcar que su orden es 9x9, con 81 elementos no nulos que están distribuidos en las matrices  $[Z_{11}]$ ,  $[Z_{12}]$ ,  $[Z_{21}]$  y  $[Z_{22}]$ . Se aprecia que algunos de estos elementos dependen de la posición  $[\theta]$  del rotor, por lo tanto los coeficientes de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de esta maquina son dependientes del tiempo, excepto para la situación particular cuando el rotor esta detenido. Por lo tanto, el modelo matemático del GIDBE esta conformado por 9 ecuaciones diferenciales de tensión-corriente es del tipo no lineal y para reducir su complejidad es necesario utilizar un cambio de variables.

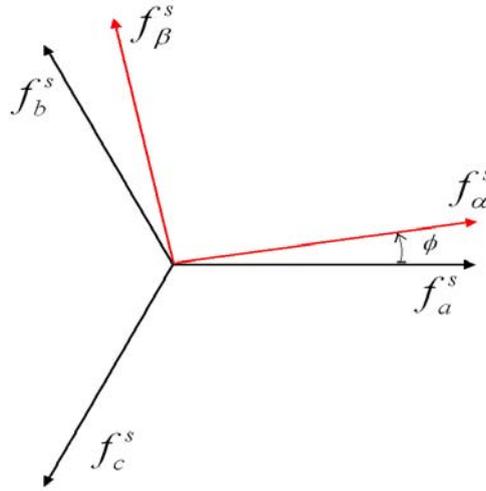
## 2.2 Transformacion de tres ejes a dos ejes y su aplicacion

En [33] se ha resumido que aunque el comportamiento de la maquina de inducción simétrica puede ser descrita en cualquier sistema de referencia, hay tres que son comúnmente utilizados:

- (1) El sistema de referencia fijo al estator que fue utilizado por primera vez en el análisis de las maquinas de inducción en 1930 por H. C. Stanley. Mostró que las inductancias dependientes del tiempo de las ecuaciones de tensión de las máquinas de inducción eran eliminadas mediante una transformación (reemplazo) de las variables asociadas a los bobinados del rotor por variables asociadas a bobinados ficticios estacionarios.
- (2) El sistema de referencia fijo al rotor, que es la transformación de Park aplicada a la maquina de inducción por D. S. Brereton. Utilizó un cambio de variables que también elimina las inductancias dependientes del tiempo de una maquina de inducción simétrica, transformado las variables del estator a un sistema de referencia fijo al rotor.
- (3) El sistema de referencia que gira a la velocidad sincrona introducida por G. Kron. Mediante esta transformación de las variables del estator y del rotor a un sistema de referencia que viaje en sincronismo con el campo magnético giratorio de la maquina.

En 1965 [34] demostró que todas las transformaciones utilizadas para el análisis de la maquina de inducción están contenidas en una transformación general que elimina todas las inductancias dependientes del tiempo, refiriendo las variables del estator y del rotor respecto de un sistema de referencia que rota a velocidad arbitraria o permanece estacionario. Generalmente las condiciones de operación determinarán el sistema de referencia más conveniente para el análisis y las correspondientes simulaciones. En ese

sentido para el análisis de la máquina de inducción simétrica es usual utilizar un sistema de referencia fijo al estator.



**Figura 2.2** Transformación de tres ejes a dos ejes  
Fuente: [34]

### 2.2.1 Transformación de tres ejes a dos ejes

En la Figura 2.2 se muestra un sistema de trifásico de ejes  $a-b-c$  y un sistema bifásico de ejes  $\alpha-\beta$ , en los cuales la variable  $f$  puede representar tensiones, corrientes o flujos concatenados y el superíndice  $s$  indica que los circuitos están fijos. Las variables  $f_a^s$ ,  $f_b^s$  y  $f_c^s$  están consideradas a lo largo de los ejes fijos que están desplazados en  $120^\circ$ . Las variables  $f_\alpha^s$  y  $f_\beta^s$  están orientadas formando un ángulo de  $90^\circ$ , son ortogonales entre si y  $f_\alpha^s$  forma un ángulo  $\phi$  con  $f_a^s$ .

La transformación que relaciona a estas variables se expresa mediante las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha^s \\ f_\beta^s \\ f_o^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \phi & \cos(\phi+120) & \cos(\phi-120) \\ \sin \phi & \sin(\phi+120) & \sin(\phi-120) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a^s \\ f_b^s \\ f_c^s \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Tomando la inversa se obtiene:

$$\begin{bmatrix} f_a^s \\ f_b^s \\ f_c^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 1 \\ \cos(\phi - 120) & \sin(\phi - 120) & 1 \\ \cos(\phi + 120) & \sin(\phi + 120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha^s \\ f_\beta^s \\ f_o^s \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Si en la Figura 2.2 el eje  $\alpha$  esta alineado con el eje a, las ecuaciones (2.15) y (2.16) se convierten en:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha^s \\ f_\beta^s \\ f_o^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a^s \\ f_b^s \\ f_c^s \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

En la ecuación (2.17 a)  $f_o^s$  es una variable que toma en cuenta la asimetría o desbalance de las variables en el sistema trifásico y se denomina la componente de secuencia cero del sistema trifásico. Esta variable de secuencia cero esta relacionada aritméticamente con las variables a, b y c y es independiente del ángulo  $\phi$ . Es importante remarcar que variables  $f_a^s, f_b^s$  y  $f_c^s$  no son fasores, ya que los fasores se utilizan en estado estacionario,  $f_a^s, f_b^s$  y  $f_c^s$  son valores instantáneos, que pueden ser funciones del tiempo.

Cuando se aplica la transformación de la Figura 2.2 a las máquinas de corriente alterna la dirección de  $f_a^s, f_b^s$  y  $f_c^s$  puede también ser visualizada como la dirección de los ejes magnéticos de las bobinas del estator. Desde luego que también pueden representar a vectores espaciales o los ejes de distribución de cada fase de un bobinado trifásico.

De esa manera, la dirección de  $f_\alpha^s$  y  $f_\beta^s$  puede también ser considerada como la dirección de los ejes magnéticos de los nuevos bobinados creados por el cambio de variables.

La inversa de la ecuación (2.17) es:

$$\begin{bmatrix} f_a^s \\ f_b^s \\ f_c^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha^s \\ f_\beta^s \\ f_o^s \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) muestra que las magnitudes de fase (tensiones y corrientes) de un sistema trifásico y del sistema bifásico equivalente son las mismas. Por lo tanto la ventaja de esta transformación es que los valores máximos de fase de las tensiones y corrientes del sistema trifásico y de sistema bifásico son iguales antes y después de la transformación.

La potencia instantánea del sistema trifásico esta dado por  $P = v_a^s i_a^s + v_b^s i_b^s + v_c^s i_c^s$ , mientras que en el sistema bifásico equivalente será  $P = \frac{3}{2}(v_\alpha^s i_\alpha^s + v_\beta^s i_\beta^s) + 2v_o^s i_o^s$ . En condiciones simétricas como los términos homopolares son nulos, para obtener la potencia en la máquina trifásica se debe multiplicar la potencia del sistema bifásico por el factor  $\frac{3}{2}$ .

Hay otra forma de transformación de un sistema de tres ejes a un sistema de dos ejes con la cual la potencia permanece invariable pero las magnitudes de tensiones y corrientes de fase en el sistema bifásico son mayores las tensiones y corrientes del sistema trifásico [35].

$$\begin{bmatrix} f_\alpha^s \\ f_\beta^s \\ f_o^s \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a^s \\ f_b^s \\ f_c^s \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Tomando la inversa se obtiene:

$$\begin{bmatrix} f_a^s \\ f_b^s \\ f_c^s \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha^s \\ f_\beta^s \\ f_o^s \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

En este caso la matriz resulta ortogonal y la inversa es igual a la transpuesta y se cumple que:

$$(f_a^s)^2 + (f_b^s)^2 + (f_c^s)^2 = (f_\alpha^s)^2 + (f_\beta^s)^2 + (f_o^s)^2 \quad (2.21)$$

Con esta transformación las tensiones y corrientes de fase en el sistema de dos ejes son  $\sqrt{3/2}$  veces los valores en tres ejes. Por ello para obtener la potencia en la máquina trifásica no es necesario multiplicar la potencia del sistema bifásico por el factor  $3/2$ , ya que la potencia es invariante.

En el presente trabajo se utilizará la transformación dada por las ecuaciones (2.19) y (2.20).

### 2.2.2 Estructura de la Transformación de Fases

Para lograr la primera simplificación del modelo matemático del GIDBE se aplica la transformación de tres ejes a dos ejes, para que el GIDBE trifásico sea reemplazado mediante un generador de inducción bifásico con doble bobinado en el estator manteniéndose invariante la potencia.

A este cambio de variables estructurado para una máquina de inducción con doble bobinado en el estator se le ha denominado la Transformación de Fases  $[C_F]$  que se aplica al modelo matemático del GIDBE trifásico representado por la ecuación (2.1), siguiendo las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} [I] &= [C_F] * [I'] \\ [V] &= [C_F] * [V'] \end{aligned} \quad (2.22)$$

En esta ecuación  $[V']$  e  $[I']$  son los vectores de tensiones y corrientes de la GIBDBE equivalente y  $[C_F]$  la transformación de fases, que tiene la siguiente estructura matricial.

$$[C_F] = \begin{bmatrix} [C_{13}] & \\ & [C_{32}] \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

De acuerdo a [31] las matrices  $[C_{13}]$  y  $[C_{32}]$  de la ecuación (2.23) están definidas como:

$$[C_{13}] = \begin{bmatrix} [C_{32}] & \\ & [C_{32}] \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$[C_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

### 2.2.3 Aplicación de la Transformación de Fases

Como resultado de la aplicación de la Transformación de Fases se obtiene la matriz de impedancias  $[Z']$  dada por (2.26).

$$[Z'] = [C_F]' [Z] [C_F] \quad (2.26)$$

La estructura de esta nueva matriz de impedancias esta dada en (2.27) y sus componentes se calculan utilizando las relaciones (2.28).

$$[Z'] = \begin{bmatrix} [Z'_{11}] & [Z'_{12}] \\ [Z'_{21}] & [Z'_{22}] \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} [Z'_{11}] &= [C_{13}]' [Z_{11}] [C_{13}] \\ [Z'_{12}] &= [C_{13}]' [Z_{12}] [C_{32}] \\ [Z'_{21}] &= [C_{32}]' [Z_{21}] [C_{13}] \\ [Z'_{22}] &= [C_{32}]' [Z_{22}] [C_{32}] \end{aligned} \quad (2.28)$$

Después de aplicar la Transformación de Fases a la máquina trifásica y luego de haber separado las filas y columnas de las variables "o", que solo aparecen en el caso de fallas asimétricas en máquinas con el neutro conectado, se obtiene las ecuaciones diferenciales dadas por:

$$[V'] = [Z'] * [I'] \quad (2.29)$$

En esta ecuación  $[Z']$  es la matriz de impedancias de la maquina transformada y los vectores de tensiones y corrientes del estator y rotor respectivamente, tienen las siguientes estructuras:

$$\begin{aligned} \left[ V' \right]^T &= \left[ v_{\alpha 1} \quad v_{\beta 1} \quad v_{\alpha 3} \quad v_{\beta 3} \quad v_{\alpha 2} \quad v_{\beta 2} \right] \\ \left[ I' \right]^T &= \left[ i_{\alpha 1} \quad i_{\beta 1} \quad i_{\alpha 3} \quad i_{\beta 3} \quad i_{\alpha 2} \quad i_{\beta 2} \right] \end{aligned} \quad (2.30)$$

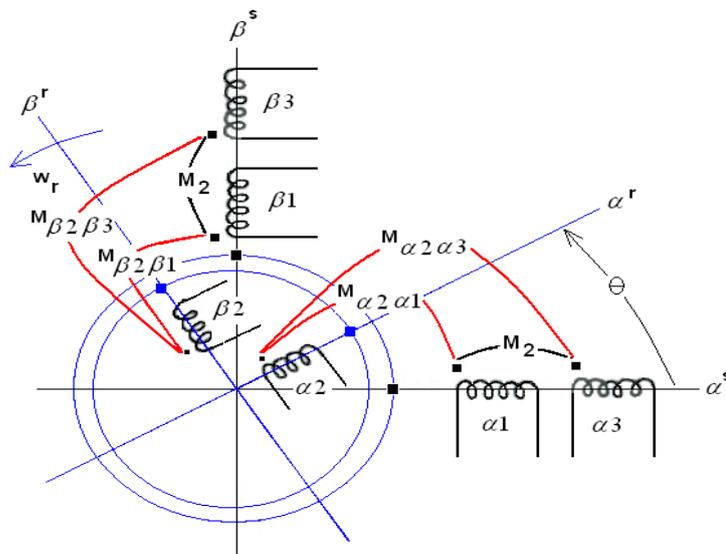
Luego de obtener la matriz  $[Z']$  el detalle de las ecuaciones (2.29) de tensión-corriente se muestra en (2.31).

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha 1} \\ v_{\beta 1} \\ v_{\alpha 3} \\ v_{\beta 3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 p & 0 & M_{13} p & 0 & M_{12} p \cos(\theta) & -M_{12} p \sin(\theta) \\ 0 & R_1 + L_1 p & 0 & M_{13} p & M_{12} p \sin(\theta) & M_{12} p \cos(\theta) \\ M_{13} p & 0 & R_3 + L_3 p & 0 & M_{23} p \cos(\theta) & -M_{23} p \sin(\theta) \\ 0 & M_{13} p & 0 & R_3 + L_3 p & M_{23} p \sin(\theta) & M_{23} p \cos(\theta) \\ M_{12} p \cos(\theta) & M_{12} p \sin(\theta) & M_{23} p \cos(\theta) & M_{23} p \sin(\theta) & R_2 + L_2 p & 0 \\ -M_{12} p \sin(\theta) & M_{12} p \cos(\theta) & -M_{23} p \sin(\theta) & M_{23} p \cos(\theta) & 0 & R_2 + L_2 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \\ i_{\alpha 3} \\ i_{\beta 3} \\ i_{\alpha 2} \\ i_{\beta 2} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Las inductancias propias y mutuas que aparecen en la ecuación (2.31) están definidas como:

$$\begin{aligned} L_1 &= l_1 - m_1, \quad L_2 = l_2 - m_2, \quad L_3 = l_3 - m_3, \\ M_{13} &= \frac{3}{2} m_4, \quad M_{12} = \frac{3}{2} m \quad \text{y} \quad M_{23} = \frac{3}{2} m' \end{aligned} \quad (2.32)$$

Las ecuaciones diferenciales (2.31) corresponden a un generador de inducción bifásico con dos bobinados en el estator, que se representa esquemáticamente en la Figura 2.3, y que es equivalente desde el punto de vista de conversión electromecánica de energía al generador de inducción trifásico con doble bobinado en el estator.



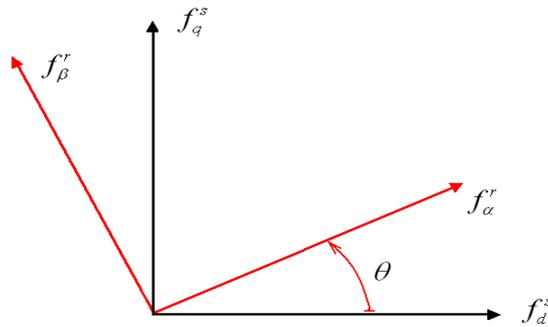
**Figura 2.3** Generador de Inducción Bifásico con Doble Bobinado en el Estator Equivalente  
Fuente: [31]

La estructura de la matriz de impedancias  $[Z']$  del GIDBE bifásico es de orden 6x6, con 26 elementos no nulos. Se aprecia que algunos de estos elementos dependen de la posición  $[\theta]$  del rotor, por lo tanto el modelo matemático de esta máquina aun es del tipo no lineal.

## 2.3 Transformación de dos ejes en movimiento a dos ejes fijos al estator

### 2.3.1 Transformación de dos ejes rotantes a dos ejes fijos

La no-linealidad todavía presente en las ecuaciones diferenciales de la máquina de inducción de doble devanado en el estator (2.31) se elimina reemplazando los bobinados  $\alpha_2$  y  $\beta_2$  del rotor del GIDBE bifásico por bobinados fijos y alineados a los ejes  $\alpha^s$  y  $\beta^s$  del estator. Esta transformación desarrollada en [35] también se denomina Transformación de Conmutador.



**Figura 2.4** Transformación de ejes rotantes a ejes fijos  
Fuente: [34, 35]

En la Figura 2.4 se muestra un sistema de bifásico de ejes ortogonales  $\alpha^r$  y  $\beta^r$  rotantes a una determinada velocidad tal que  $\theta = \omega_r t$  y un sistema bifásico de ejes ortogonales  $d - q$  fijos. La transformación que relaciona a estas variables se expresa mediante las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\begin{bmatrix} f_d^s \\ f_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha^r \\ f_\beta^r \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Como esta transformación es ortogonal la inversa es igual a la transpuesta y se obtiene:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha^r \\ f_\beta^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d^s \\ f_q^s \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Dada la característica ortogonal de esta transformación la potencia se mantiene invariante.

### 2.3.2 Estructura de la Transformación de Conmutador

La Transformación de Conmutador  $[C_c]$  se aplica al modelo matemático del GIDBE bifásico representado por la matriz de impedancias  $[Z']$ . Esta transformación mantiene invariante la potencia y tiene la siguiente estructura matricial:

$$[C_c] = \begin{bmatrix} [U] \\ [C_{22}] \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

En esta ecuación se cumple:

$$[C_{22}] = \begin{bmatrix} [C_2] & \\ & [C_2] \end{bmatrix} \text{ y } [C_2] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

### 2.3.3 Aplicación de la Transformación de Conmutador

Como resultado de la aplicación de la Transformación de Conmutador se obtiene la matriz de impedancias  $[Z'']$ , cuyos componentes se calculan de acuerdo a (2.37).

$$[Z''] = [C_c]' [Z'] [C_c] \quad (2.37)$$

La estructura de nueva matriz de impedancias  $[Z'']$  esta dada en (2.38) y sus componentes se obtienen utilizando las relaciones (2.39).

$$[Z''] = \begin{bmatrix} [Z''_{11}] & [Z''_{12}] \\ [Z''_{21}] & [Z''_{22}] \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} [Z''_{11}] &= [Z'_{11}] \\ [Z''_{12}] &= [Z'_{12}] [C_{22}] \\ [Z''_{21}] &= [C_{22}]' [Z'_{21}] \\ [Z''_{22}] &= [C_{22}]' [Z'_{22}] [C_{22}] \end{aligned} \quad (2.39)$$

Luego, al aplicar la transformación para reemplazar el rotor y sus bobinados en movimiento mediante un rotor que se mueve a la velocidad  $w_r$  y sus bobinas se mantienen fijas en el espacio (Transformación de Conmutador) se obtiene las ecuaciones diferenciales, que matricialmente tienen la estructura de (2.40).

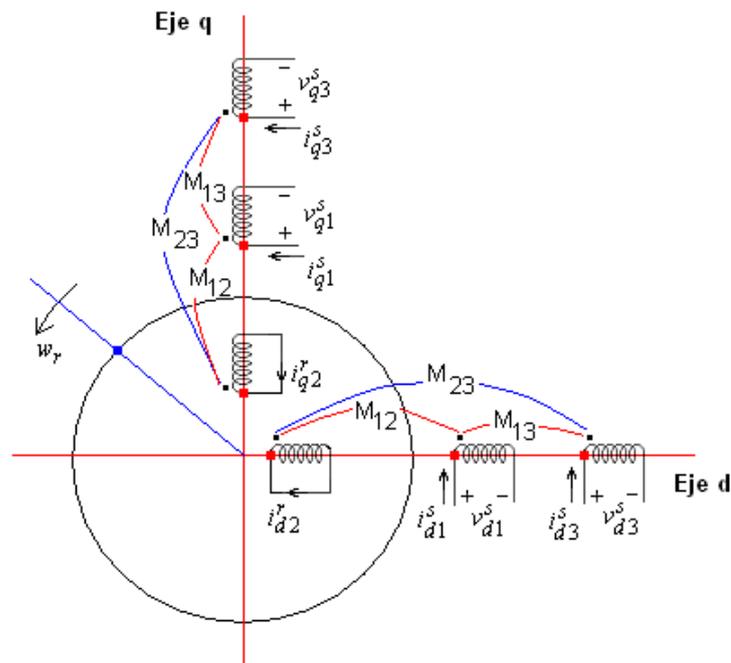
$$[V^r] = [Z^r] * [I^r] \quad (2.40)$$

En esta ecuación  $[Z^r]$  es la matriz de impedancias de maquina transformada y los vectores de tensiones y corrientes del estator y rotor respectivamente, son:

$$[V^r]^t = [v_{d1}^s \quad v_{q1}^s \quad v_{d3}^s \quad v_{q3}^s \quad 0 \quad 0] \text{ y } [I^r]^t = [i_{d1}^s \quad i_{q1}^s \quad i_{d3}^s \quad i_{q3}^s \quad i_{d2}^r \quad i_{q2}^r].$$

Por lo tanto las ecuaciones diferenciales son:

$$\begin{bmatrix} v_{d1}^s \\ v_{q1}^s \\ v_{d3}^s \\ v_{q3}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 p & 0 & M_{13} p & 0 & M_{12} p & 0 \\ 0 & R_1 + L_1 p & 0 & M_{13} p & 0 & M_{12} p \\ M_{13} p & 0 & R_3 + L_3 p & 0 & M_{23} p & 0 \\ 0 & M_{13} p & 0 & R_3 + L_3 p & 0 & M_{23} p \\ M_{12} p & M_{12} \omega_m & M_{23} p & M_{23} \omega_m & R_2 + L_2 p & L_2 \omega_m \\ -M_{12} \omega_m & M_{12} p & -M_{23} \omega_m & M_{23} p & -L_2 \omega_m & R_2 + L_2 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1}^s \\ i_{q1}^s \\ i_{d3}^s \\ i_{q3}^s \\ i_{d2}^r \\ i_{q2}^r \end{bmatrix} \quad (2.41)$$



**Figura 2.5** Modelo d-q del GIDBE  
Fuente: Elaboración propia

Al revisar la estructura de las ecuaciones diferenciales de (2.41) se aprecia que son lineales y su solución es viable. Desde el punto de vista físico, estas ecuaciones diferenciales corresponden a un generador de conmutador equivalente, que se muestra en la Figura 2.5.

Resulta conveniente resumir las características de los parámetros que conforman la matriz de impedancias del Modelo d-q del Generador de Inducción con Doble Bobinado en el Estator. Estas son:

- (1) En la impedancia  $R_1 + L_1 p$ ,  $R_1$  es la resistencia por fase del bobinado trifásico de excitación del estator de la GIDBE y  $L_1$  la inductancia propia dada por  $L_1 = l_1 - m_1$ . Utilizando las relaciones del acápite 2.1.1 se obtiene:

$$L_1 = l_{1\sigma} + \frac{3}{2} N_1^2 \lambda_m \quad (2.42)$$

- (2) De manera similar, en la impedancia  $R_3 + L_3 p$ ,  $R_3$  es la resistencia por fase del bobinado trifásico de carga del estator del GIDBE y  $L_3$  la inductancia propia dad por  $L_3 = l_3 - m_3$ . Utilizando las relaciones del acápite 2.1.1 se obtiene:

$$L_3 = l_{3\sigma} + \frac{3}{2} N_3^2 \lambda_m \quad (2.43)$$

- (3) En  $R_2 + L_2 p$ ,  $R_2$  es la resistencia por fase del bobinado trifásico del rotor del GIDBE y  $L_2$  la inductancia propia definida como  $L_2 = l_2 - m_2$ . Utilizando las relaciones del acápite 2.1.4 se obtiene:

$$L_2 = l_{2\sigma} + \frac{3}{2} N_2^2 \lambda_m \quad (2.44)$$

- (4) Las inductancias mutuas de las bobinas del modelo d-q son:  $M_{13} = \frac{3}{2} m_4$ ,  $M_{12} = \frac{3}{2} m$  y  $M_{23} = \frac{3}{2} m'$ . Al reemplazar los valores de  $m_4$ ,  $m$  y  $m'$  de las ecuaciones (2.6) y (2.9) se obtiene:

$$M_{13} = \frac{3}{2} N_1 N_3 \lambda_m, M_{12} = \frac{3}{2} N_1 N_2 \lambda_m \text{ y } M_{23} = \frac{3}{2} N_2 N_3 \lambda_m \quad (2.45)$$

## 2.4 Modelo propuesto para el generador de inducción con doble bobinado en el estator

### 2.4.1 Modelo d-q del Generador de Inducción con Doble Bobinado en el Estator (GIDBE) reflejado al bobinado de excitación

En el presente trabajo para el modelamiento del Generador de Inducción con Doble Bobinado en el Estator (GIDBE), que además de tener capacitores en el devanado de excitación también tiene capacitores en serie con una carga resistiva, el supuesto (b) del ítem 2.1 ha sido reformulado de la siguiente manera:

*“Para el desarrollo de las ecuaciones se asume que el sistema es lineal, y por lo tanto se dejan de lado las variaciones de las inductancias con respecto a los flujos magnéticos. Para tomar en cuenta el efecto de la saturación, la inductancia magnetizante se expresa como una función del flujo concatenado magnetizante”.*

Asimismo, para obtener el comportamiento del MIDBE referido a uno de sus bobinados, el modelamiento se ha realizado considerando que los bobinados del rotor y de carga del estator han sido reflejados al bobinado de excitación. Con esta reflexión los parámetros que conforman la matriz de impedancias del Modelo d-q de (2.41) experimentan los siguientes cambios:

- (1) La impedancia  $R_1 + L_1 p$ , no se modifica.
- (2) La impedancia  $R_3 + L_3 p$ , se debe reflejar al bobinado de excitación. Se reemplaza por  $R'_3 + L'_3 p$ ,  $R'_3$  es la resistencia y  $L'_3$  la inductancia propia por fase del bobinado de carga reflejadas, esta ultima resulta:

$$L'_3 = l'_{3\sigma} + \frac{3}{2} N_1^2 \lambda_m \quad (2.46)$$

- (3) De manera similar,  $R_2 + L_2 p$ , Se reemplaza por  $R'_2 + L'_2 p$ ,  $R'_2$  es la resistencia y  $L'_2$  la inductancia propia por fase del bobinado del rotor reflejados, esta ultima resulta:

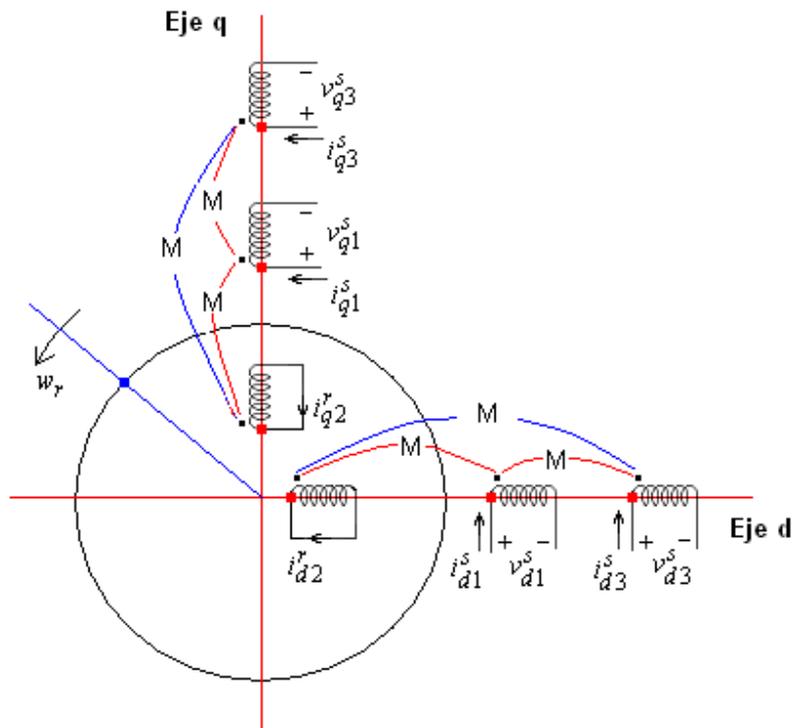
$$L'_2 = l'_{2\sigma} + \frac{3}{2} N_1^2 \lambda_m \quad (2.47)$$

- (4) Las inductancias mutuas  $M_{13}$ ,  $M_{12}$  y  $M_{23}$  se igualan y están dadas por:

$$M'_{13} = M'_{23} = M'_{12} = M = \frac{3}{2} N_1^2 \lambda_m \quad (2.48)$$

Al reemplazar en (2.41) las relaciones (2.46), (2.47) y (2.48) se obtiene las ecuaciones diferenciales del GIDBE con sus bobinados de carga y del rotor reflejados al bobinado de excitación del estator.

$$\begin{bmatrix} v_{d1}^s \\ v_{q1}^s \\ v_{d3}^s \\ v_{q3}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_1 p & 0 & Mp & 0 & Mp & 0 \\ 0 & R_1 + L_1 p & 0 & Mp & 0 & Mp \\ Mp & 0 & R'_3 + L'_3 p & 0 & Mp & 0 \\ 0 & Mp & 0 & R'_3 + L'_3 p & 0 & Mp \\ Mp & Mw_m & Mp & Mw_m & R'_2 + L'_2 p & L'_2 w_m \\ -Mw_m & Mp & -Mw_m & Mp & -L'_2 w_m & R'_2 + L'_2 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1}^s \\ i_{q1}^s \\ i_{d3}^s \\ i_{q3}^s \\ i_{d2}^r \\ i_{q2}^r \end{bmatrix} \quad (2.49)$$



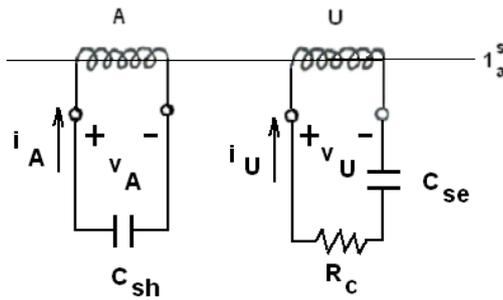
**Figura 2.6** Modelo d-q del GIDBE reflejado al devanado de excitación  
**Fuente:** elaboración propia

En la Figura 2.6 se representa esquemáticamente al GIDBE con sus bobinados de carga y del rotor reflejados al bobinado de excitación del estator. Se aprecia que las inductancias mutuas de los bobinados en el eje directo o en el eje cuadratura tienen

ahora el mismo valor  $M$  . Asimismo, las componentes magnetizantes de las inductancias propias de los tres bobinados (excitación, carga y rotor) también son iguales a  $M$  .

### 2.4.2 Incorporación de los capacitores excitación, capacitores serie y la resistencia de carga

Para completar las ecuaciones el sistema, es necesario reflejar los capacitores de excitación  $C_{sh}$  conectados en el bobinado trifásico de excitación, los capacitores en serie  $C_{se}$  con la carga resistiva  $R_c$  del bobinado de carga (Figura 2.7).



**Figura 2.7** Conexión por fase de los capacitores *shunt*, serie y la resistencia de carga  
**Fuente:** elaboración propia

Las ecuaciones de tensión-corriente de estos bobinados son de la forma:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ v_U \\ v_V \\ v_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{pC_{sh}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{pC_{sh}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{pC_{sh}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(R_c + \frac{1}{pC_{se}}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(R_c + \frac{1}{pC_{se}}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(R_c + \frac{1}{pC_{se}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

o también:

$$[V_1] = [Z_{RC}] [I_1] \quad (2.51)$$

Para que estos elementos pasivos conectados en los terminales de los bobinados trifásicos del estator sean expresados en los ejes d-q, solo se debe aplicar la

Transformación de Fases  $[C_F]$ . Por lo tanto, de manera similar a la ecuación (2.26) se tendrá:

$$[V_1^s] = [C_F]^{-1} [Z_{RC}] [C_F] [I_1^s] \quad (2.52)$$

Reemplazando los términos de  $[C_F]$  indicados en el acápite 2.2.2 y efectuando operaciones se obtiene que

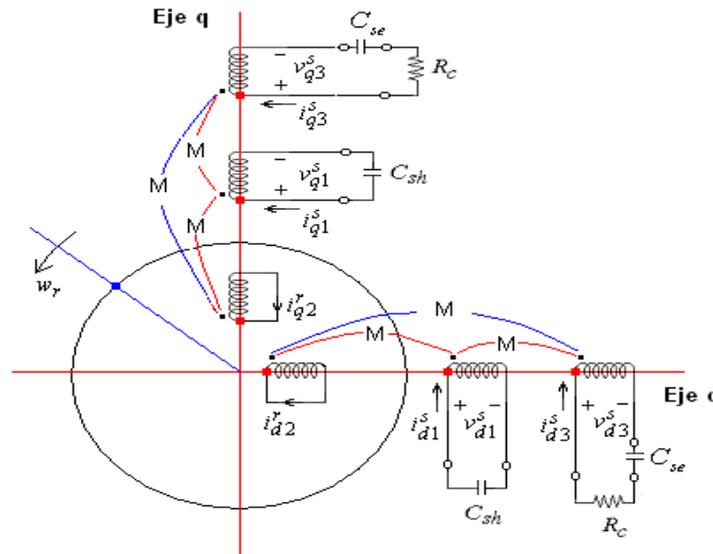
$$[V_1^s] = [Z_{RC}] [I_1^s] \quad (2.53)$$

En la ecuación (2.53) se muestra que las impedancias conectadas en el estator de la maquina de inducción permanece inalterable luego de la transformación de fases. Dejando de lado la componente homopolar la ecuación (2.53) puede presentarse como:

$$\begin{bmatrix} v_{d1}^s \\ v_{q1}^s \\ v_{d3}^s \\ v_{q3}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{pC_{sh}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{pC_{sh}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(R_c + \frac{1}{pC_{se}}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(R_c + \frac{1}{pC_{se}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1}^s \\ i_{q1}^s \\ i_{d3}^s \\ i_{q3}^s \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

### 2.4.3 Modelo propuesto para el GIDBE con capacitores en serie con la carga

En la Figura 2.8 se muestra el modelo del GIDBE, con capacitores *shunt* para la excitación y capacitores en serie con la carga para la autorregulación, expresado en un sistema de referencia d-q fijo al estator, que será denominada GIDBECSE.



**Figura 2.8** Modelo d-q del GIDBECSE reflejado al bobinado de excitación incluyendo los capacitores y la resistencia de carga

**Fuente:** elaboración propia

Mediante la técnica de utilizar los flujos concatenados como variables de interés en los motores de inducción, planteada en [33], las ecuaciones del GIADBECE para un sistema de referencia d-q fijo al estator, expresadas en función de las corrientes, han sido expresadas en función de las variables flujos concatenados.

La idea ha sido obtener el flujo concatenado magnetizante de la máquina ( $\psi_m$ ), ya que va a ser utilizado como variable para expresar la inductancia magnetizante (M) y de esa manera desarrollar un modelo de esta inductancia para considerar el efecto de la saturación.

Las ecuaciones diferenciales de tensión del GIDBCSE, son:

$$\begin{aligned}
 v_{q1}^s &= R_1 i_{q1}^s + p \psi_{q1}^s \\
 v_{d1}^s &= R_1 i_{d1}^s + p \psi_{d1}^s \\
 v_{q3}^s &= R_3 i_{q3}^s + p \psi_{q3}^s \\
 v_{d3}^s &= R_3 i_{d3}^s + p \psi_{d3}^s \\
 0 &= R_2 i_{q2}^r + p \psi_{q2}^r - \omega_r \psi_{d2}^r \\
 0 &= R_2 i_{d2}^r + p \psi_{d2}^r + \omega_r \psi_{q2}^r
 \end{aligned} \tag{2.55}$$

En estas ecuaciones, los flujos concatenados de los bobinados del estator y rotor son:

$$\begin{aligned}
 \psi_{q1}^s &= L_{1\sigma} i_{q1}^s + \psi_{qm} \\
 \psi_{d1}^s &= L_{1\sigma} i_{d1}^s + \psi_{dm} \\
 \psi_{q3}^s &= L_{3\sigma} i_{q3}^s + \psi_{qm} \\
 \psi_{d3}^s &= L_{3\sigma} i_{d3}^s + \psi_{dm} \\
 \psi_{q2}^r &= L_{2\sigma} i_{q2}^r + \psi_{qm} \\
 \psi_{d2}^r &= L_{2\sigma} i_{d2}^r + \psi_{dm}
 \end{aligned} \tag{2.56}$$

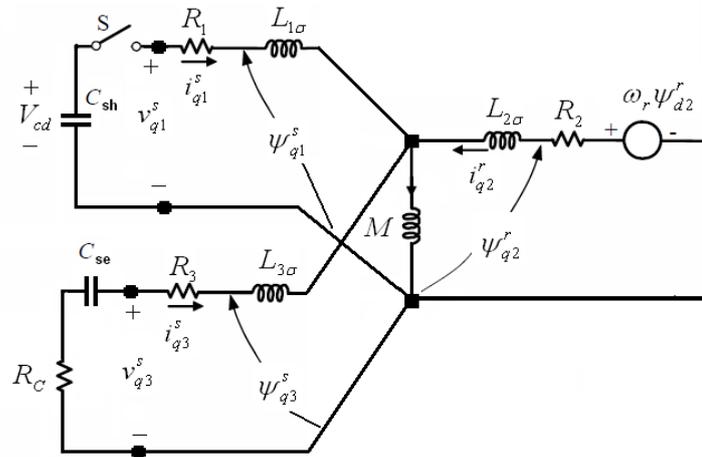
Donde:

$$\begin{aligned}
 \psi_{qm} &= M (i_{q1}^s + i_{q3}^s + i_{q2}^r) \\
 \psi_{dm} &= M (i_{d1}^s + i_{d3}^s + i_{d2}^r)
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

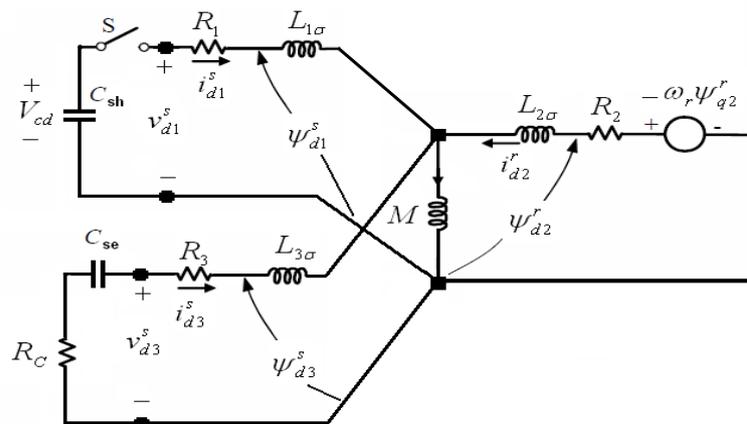
Asimismo, las tensiones en los bobinados de excitación y carga del estator están dadas por:

$$\begin{aligned}
 v_{q1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{q1}^s \\
 v_{d1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{d1}^s \\
 v_{q3}^s &= -\frac{1}{pC_{se}} i_{q3}^s - R_C i_{q3}^s \\
 v_{d3}^s &= -\frac{1}{pC_{se}} i_{d3}^s - R_C i_{d3}^s
 \end{aligned}
 \tag{2.58}$$

Estas ecuaciones diferenciales y algebraicas (2.55), (2.56), (2.57) y (2.58) pueden ser expresadas mediante los circuitos equivalentes desarrollados de manera separada en los ejes d y q tal como se muestra en la Figura 2.9.



(a) Eje cuadratura



(b) Eje directo

**Figura 2.9** Modelo del GIDBECSE en un sistema de referencia d-q fijo al estator

**Fuente:** elaboración propia

## 2.5 Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo matemático para representar un generador de inducción con doble bobinado en el estator, que posee un banco trifásico de capacitores conectado en el bobinado de excitación, capacitores en serie con la carga en el bobinado de carga y que se impulsa a una determinada velocidad. El modelo de la máquina inducción con doble bobinado en el estator en coordenadas  $abc$  es expresado en las coordenadas  $qd0$  fijas al estator. Para ello se ha desarrollado la transformación de fases apropiada, para reemplazar los bobinados trifásicos del estator y rotor mediante bobinados bifásicos equivalentes. Asimismo, mediante la transformación de conmutador se ha reemplazado el bobinado bifásico del rotor que gira a una determinada velocidad, por uno bifásico que esta fijo al estator.

Las ecuaciones algebraicas y diferenciales que conforman el modelo en un sistema de ejes d-q fijos al estator, que contienen los parámetros de la maquina y elementos pasivos (capacitores *shunt*, capacitor serie y la resistencia de carga) han sido reflejadas al bobinado de excitación.

Este modelo del GIADBECSE, que inicialmente utilizaba como variables de estado a las corrientes, ha sido reformulado y expresado en función de flujos concatenados, para obtener el flujo concatenado magnetizante de la máquina ( $\psi_m$ ). Este flujo concatenado magnetizante va a ser utilizado como variable para expresar la inductancia magnetizante (M) y de esa manera considerar el efecto de la saturación.

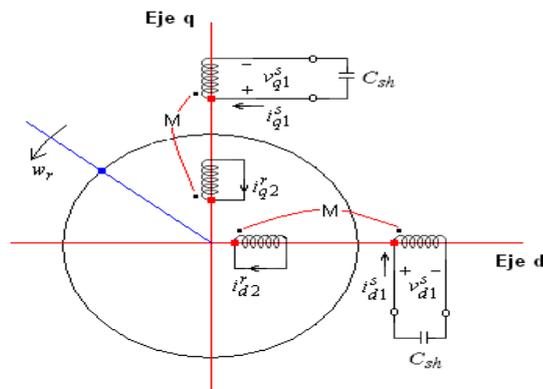
### CAPITULO 3

## AUTOEXCITACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN CONVENCIONAL

En este capítulo se muestra el modelo del generador de inducción convencional y explicado de manera conceptual el proceso de autoexcitación simulando la conexión de un banco de capacitores con una determinada carga inicial al bobinado del estator del GI impulsado a una determinada velocidad. Se obtiene que cuando los capacitores cargados se conectan a los terminales del estator una corriente transitoria de excitación circulará y producirá un flujo magnético, el cual generará una tensión que incrementará la carga en los capacitores. Como la tensión en el capacitor se incrementa se tiene una mayor corriente de excitación suministrada al GI, entonces el flujo magnético continúa creciendo produciendo una mayor tensión generada, siendo esta la forma en que crece la tensión. También se muestra que para hacer posible el crecimiento de la tensión del generador de inducción, hay ciertas condiciones de velocidad del rotor y valor del capacitor de excitación que deben alcanzarse.

### 3.1 Modelo del generador de inducción convencional

La representación de generador de inducción autoexcitado convencional se obtiene a partir del GIADBECSSE, expresado en un sistema de referencia d-q fijo al estator que se muestra en la Figura 2.5, dejando de lado el bobinado de carga. Esta representación se muestra en la Figura 3.1 y  $C_{sh}$  representa al banco de capacitores que se conecta en cada fase del bobinado de excitación.



**Figura 3.1** Representación del GI convencional en un sistema de referencia d-q fijo al estator  
**Fuente:** elaboración propia

Las ecuaciones diferenciales del GI convencional impulsado a velocidad  $\omega_r$  constante, expresadas en un sistema de referencia d-q fijo al estator se obtienen de las ecuaciones (2.41), (2.42), (2.43) y (2.44) dejando de lado el bobinado de carga. Por lo tanto, para el análisis de la autoexcitación en vacío del GI convencional se utilizan las ecuaciones diferenciales y algebraicas que a continuación se detallan.

Las ecuaciones de tensión:

$$\begin{aligned}
 v_{q1}^s &= R_1 i_{q1}^s + p \psi_{q1}^s \\
 v_{d1}^s &= R_1 i_{d1}^s + p \psi_{d1}^s \\
 0 &= R_2 i_{q2}^r + p \psi_{q2}^r - \omega_r \psi_{d2}^r \\
 0 &= R_2 i_{d2}^r + p \psi_{d2}^r + \omega_r \psi_{q2}^r
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Las ecuaciones de flujos concatenados:

$$\begin{aligned}
 \psi_{q1}^s &= L_{1\sigma} i_{q1}^s + \psi_{qm} \\
 \psi_{d1}^s &= L_{1\sigma} i_{d1}^s + \psi_{dm} \\
 \psi_{q2}^r &= L_{2\sigma} i_{q2}^r + \psi_{qm} \\
 \psi_{d2}^r &= L_{2\sigma} i_{d2}^r + \psi_{dm}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

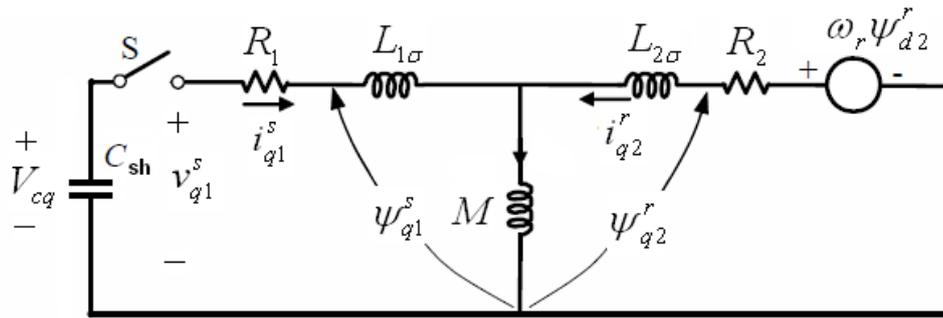
Las componentes del flujo concatenado magnetizante:

$$\begin{aligned}
 \psi_{qm} &= M (i_{q1}^s + i_{q2}^r) \\
 \psi_{dm} &= M (i_{d1}^s + i_{d2}^r)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

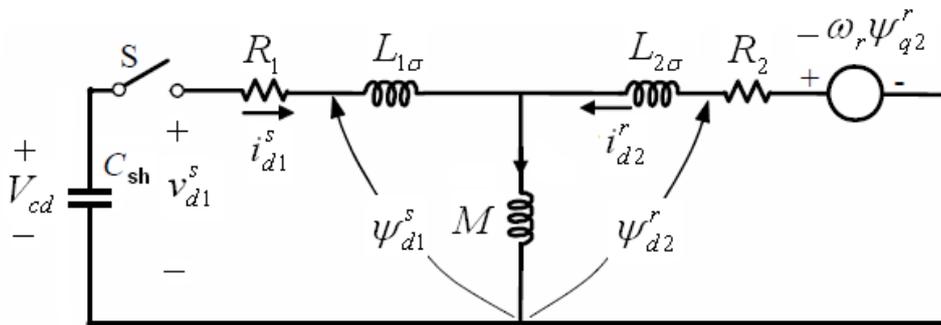
Las ecuaciones tensión – corriente del banco de capacitores:

$$\begin{aligned}
 v_{q1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{q1}^s \\
 v_{d1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{d1}^s
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Estas ecuaciones diferenciales y algebraicas (3.1), (3.2), (3.3) y (3.4) pueden ser expresadas mediante los circuitos equivalentes desarrollados de manera separada en los ejes d y q tal como se muestra en la Figura 3.2. Estos circuitos equivalentes se obtienen de los circuitos equivalentes de la Figura 2.6 del Capítulo 2 si se deja de lado el bobinado de carga.



(a) Eje cuadratura



(a) Eje directo

**Figura 3.2** Modelo del GIA convencional en un sistema de referencia d-q fijo al estator  
**Fuente:** elaboración propia

Es importante mencionar que si los capacitores tienen una carga inicial entonces  $V_{cd}$  y  $V_{cq}$  serán diferentes de cero, entonces la ecuación (3.4) se convierte en:

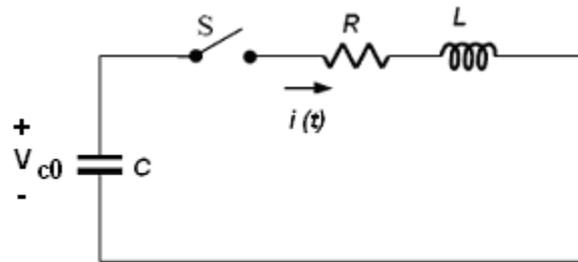
$$\begin{aligned}
 v_{q1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{q1}^s + V_{cq} \\
 v_{d1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{d1}^s + V_{cd}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

### 3.2 Conceptualización del proceso transitorio de autoexcitación

#### 3.2.1 Transitorio de autoexcitación en un circuito R-L-C

Debido a que las ecuaciones de un generador de inducción son complejas, el principio del proceso de autoexcitación de esta máquina se explica utilizando un circuito RLC, ya que el comportamiento del generador de inducción en la autoexcitación resulta similar al transitorio en este circuito.

En el circuito RLC mostrado en la Figura 3.3, la energía puede estar almacenada en la bobina o en el capacitor y la resistencia es incapaz de almacenar energía, mas bien la consume.



**Figura 3.3** Circuito RLC

**Fuente:** elaboración propia

Si se supone que el capacitor tiene una carga inicial  $V_{c0} = 0$  y el interruptor “S” se cierra en  $t=0$ , entonces no habrá ningún flujo de corriente transitoria o de estado estacionario. Sin embargo si las condiciones iniciales en la Figura 3.3 no son nulas, es decir  $V_{c0} \neq 0$ , cuando se cierra “S” la ecuación de tensión en el circuito es:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt - V_{c0} = 0 \quad \text{ó} \quad (R + pL + \frac{1}{pC})i(t) = V_{c0} \quad (3.6)$$

La corriente  $i(t)$  se puede expresar como:

$$i(t) = \frac{pV_{c0}}{p^2L + pR + \frac{1}{C}} \quad (3.7)$$

La ecuación característica del sistema es el denominador de la ecuación (3.7) igualada a cero, cuyas raíces son:

$$p_{12} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (3.8)$$

Con estas raíces,  $p_1$  y  $p_2$ , se construye la solución completa para la corriente de (3.8), dada por (3.9), siendo  $A_1$  y  $A_2$  las constantes de integración definidas por las condiciones iniciales.

$$i(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (3.9)$$

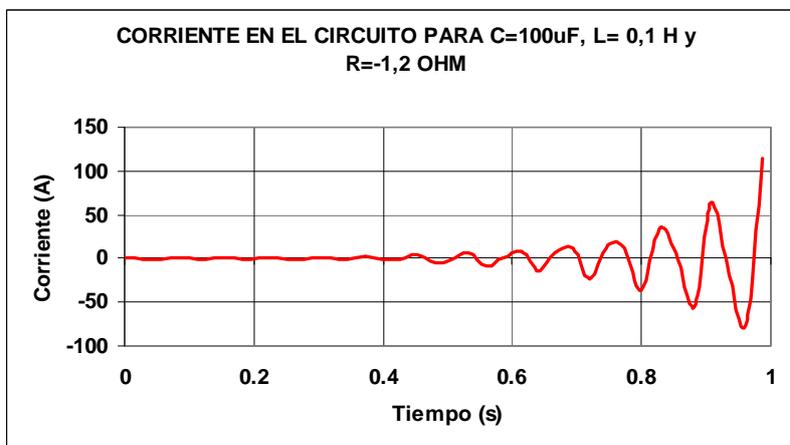
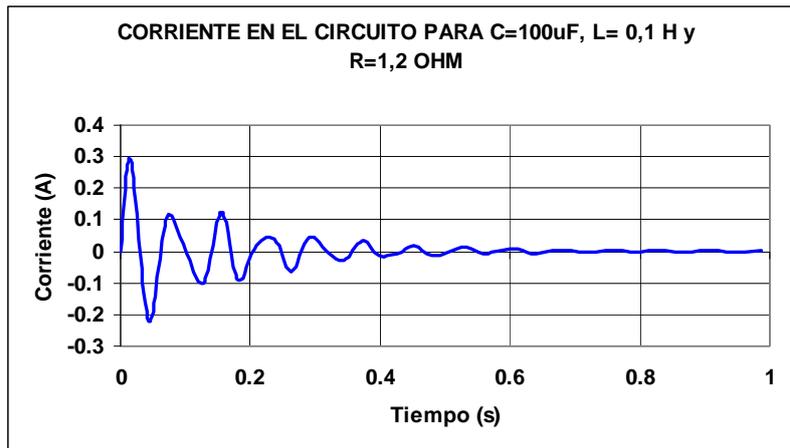
En la ecuación (3.9), si  $(\frac{R}{2L})^2 < \frac{1}{LC}$  entonces las raíces serán números complejos, cuyas

partes reales  $\sigma$  e imaginarias  $\omega$  son:  $\sigma = -\frac{R}{2L}$  y  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2}$ . La parte real  $\sigma$

representa la tasa con la cual el transitorio decae y  $\omega$  es la frecuencia de oscilación del transitorio. Se puede deducir que en el circuito  $RLC$ , como  $R$  es positivo, entonces  $\sigma$  es siempre negativo, lo que significa que el transitorio provocado por la conexión del capacitor cargado, se reduce en magnitud con el tiempo y finalmente decae a cero.

Sin embargo, si  $\sigma$  fuera positivo, implica que el transitorio crecerá con el tiempo y teóricamente podría incrementarse hasta el infinito. Se debe remarcar que  $\sigma$  sería positivo si  $R$  fuera negativo. Considerando que una *“resistencia positiva representa a un elemento que consume potencia”*, entonces una resistencia negativa implica una fuente de potencia.

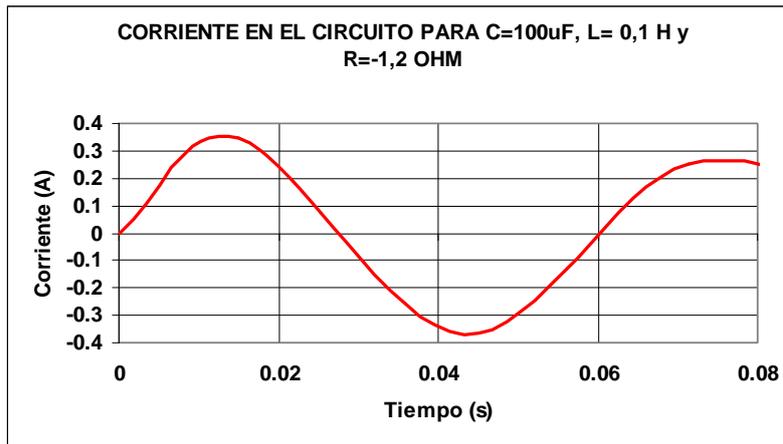
En la Figura 3.4 se muestra los resultados del transitorio de conexión de un capacitor cargado a un determinado circuito serie  $RLC$ . En el caso de resistencia positiva la corriente en el primer instante alcanza un pico de 0,3 A y luego decae (amortiguamiento positivo) de modo tal que en 0,6 s se ha extinguido, mientras que con resistencia negativa, la corriente no se extingue. Es importante destacar que después de cerrar el interruptor, en el primer instante del transitorio, la corriente que fluye en el circuito  $RLC$  en ambos casos es prácticamente la misma (Ver Figura 3.5), la diferencia se aprecia después al transcurrir el tiempo.



**Figura 3.4** Respuesta transitoria del circuito RLC

**Fuente:** elaboración propia

En el caso de tener resistencia negativa, como no hay variación alguna de los parámetros R, L y C, la corriente continúa creciendo (amortiguamiento negativo). Por ello se puede decir que, si hay una corriente cada vez mayor que disipa energía cada vez mayor, debe haber una cierta fuente de energía disponible para suministrar la energía cada vez mayor. Este es de hecho el fenómeno en el caso del generador de inducción autoexcitado. Por lo tanto, este ejemplo raro de transitorio en el circuito RLC es característico del generador de inducción autoexcitado, en el cual la fuente de potencia es el motor primo que la impulsa.



**Figura 3.5** Detalle en el primer instante con resistencia negativa  
**Fuente:** elaboración propia

### 3.2.2 Ecuaciones del proceso de autoexcitación del generador de inducción convencional lineal

Como se menciona en el ítem anterior, los transitorios que crecen en magnitud (autoexcitación) con una de sus raíces con parte real positiva pueden ocurrir si hay una fuente de energía externa que es capaz de suministrar toda la potencia de pérdidas asociadas con el incremento de corriente. La autoexcitación del generador de inducción es capaz de tener un transitorio creciente debido a la fuente externa de energía mecánica que esta impulsando al generador de inducción. Esta fuente de energía, necesaria para que este tipo inusual de proceso transitorio ocurra es la energía cinética del rotor. Si el rotor esta impulsado por un determinado motor primo, la energía cinética del rotor se mantiene y la autoexcitación y transferencia de energía continúa permanentemente. Como el inicio del proceso de autoexcitación es un fenómeno transitorio, es mejor visualizarlo y entenderlo analizando los valores instantáneos de las corrientes y tensiones de la maquina.

Para simular el proceso de autoexcitación del GIA convencional en vacío, considerando que no existe tensión remanente inducida en el rotor y sin tomar en cuenta el efecto de la saturación, es necesario despejar las ecuaciones algebraico-diferenciales en la forma siguiente:

(1) A partir de las ecuaciones (3.1) se despeja:

$$\begin{aligned}
 p \psi_{q1}^s &= v_{q1}^s - R_1 i_{q1}^s \\
 p \psi_{d1}^s &= v_{d1}^s - R_1 i_{d1}^s \\
 p \psi_{q2}^r &= -R_2 i_{q2}^r + \omega_r \psi_{d2}^r \\
 p \psi_{d2}^r &= -R_2 i_{d2}^r - \omega_r \psi_{q2}^r
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

(2) De las ecuaciones (3.2) es posible despejar las componentes del flujo concatenado magnetizante de la máquina en los ejes “d” y “q”, expresadas en función de las variables del bobinado de excitación.

$$\begin{aligned}\psi_{qm} &= \psi_{q1}^s - L_{1\sigma} i_{q1}^s \\ \psi_{dm} &= \psi_{d1}^s - L_{1\sigma} i_{d1}^s\end{aligned}\quad (3.11)$$

(3) Con las componentes del flujo concatenado magnetizante en los ejes “d” y “q”, se calculan las componentes en los ejes d y q de las corrientes del bobinado de excitación, así como la corriente del rotor.

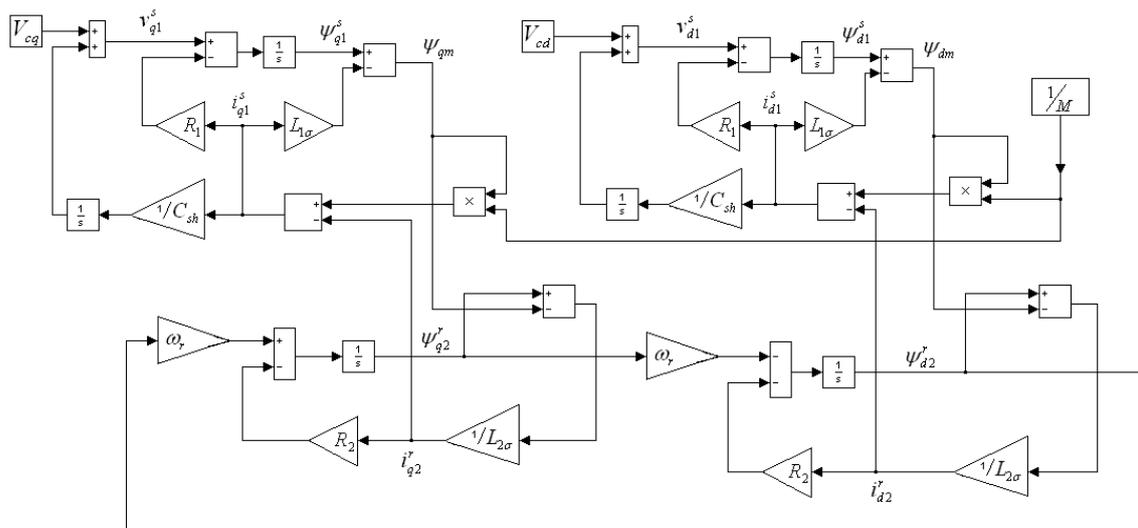
$$\begin{aligned}i_{q1}^s &= \frac{1}{M} \psi_{qm} - (i_{q3}^s + i_{q2}^r) \\ i_{d1}^s &= \frac{1}{M} \psi_{dm} - (i_{d3}^s + i_{d2}^r) \\ i_{q2}^r &= \frac{1}{L_{2\sigma}} (\psi_{q2}^r - \psi_{qm}) \\ i_{d2}^r &= \frac{1}{L_{2\sigma}} (\psi_{d2}^r - \psi_{dm})\end{aligned}\quad (3.12)$$

(4) Las tensiones en bornes del bobinado de excitación del estator se calculan con las ecuaciones:

$$\begin{aligned}v_{q1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{q1}^s + V_{cq} \\ v_{d1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{d1}^s + V_{cd}\end{aligned}\quad (3.13)$$

Las tensiones  $V_{cd}$  y  $V_{cq}$  representan a la carga inicial de los capacitores de excitación que se conectan al estator.

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de bloques que utilizando el Toolbox Simulink de Matlab implementa las ecuaciones (3.10) a (3.13) para simular el Transitorio de Autoexcitación del Generador de inducción convencional, sin saturación.



**Figura 3.6** Diagrama de bloques de la autoexcitación del GI convencional sin saturación  
**Fuente:** elaboración propia

### 3.2.3 Autoexcitación del generador de inducción convencional lineal

Para las simulaciones del presente trabajo se ha utilizado los parámetros y características de un Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el Estator (GIADBE) implementado en [31], utilizando la Máquina Generalizada Mawdsley Student's Demonstration Set del Laboratorio de Electricidad de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Esta máquina generalizada fue conectada como máquina asíncrona con dos bobinados independientes en el estator, los cuales fueron diseñados utilizando las bobinas disponibles en el panel de la máquina generalizada, resultando:

Bobinado de excitación ( $\Delta$ , 250 V, 50 Hz) :  $N_1=208.98$  espiras efectivas /fase

Bobinado de carga ( $\Delta$ , 125 V, 50 Hz) :  $N_3=120.66$  espiras efectivas /fase

Bobinado del rotor :  $N_2=206.526$  espiras efectivas /fase

Los parámetros obtenidos a partir de pruebas en la referencia [31] son:

- (a) Resistencias y inductancias de dispersión por fase de los bobinados del GIADBE.

Bobinado de Excitación :  $R_1 = 5.684\Omega, L_{1\sigma} = 0.0530H$

Bobinado de Carga :  $R_3 = 1.845\Omega, L_{3\sigma} = 0.01766H$

Bobinado del Rotor :  $R_2 = 3.663\Omega, L_{2\sigma} = 0.0030H$

(b) Inductancia magnetizante en función de la corriente de magnetización

$$M = 0.41237 + 0.31373 * I_m; \quad I_m < 0.40$$

$$M = 0.53853; \quad 0.55 < I_m < 0.40$$

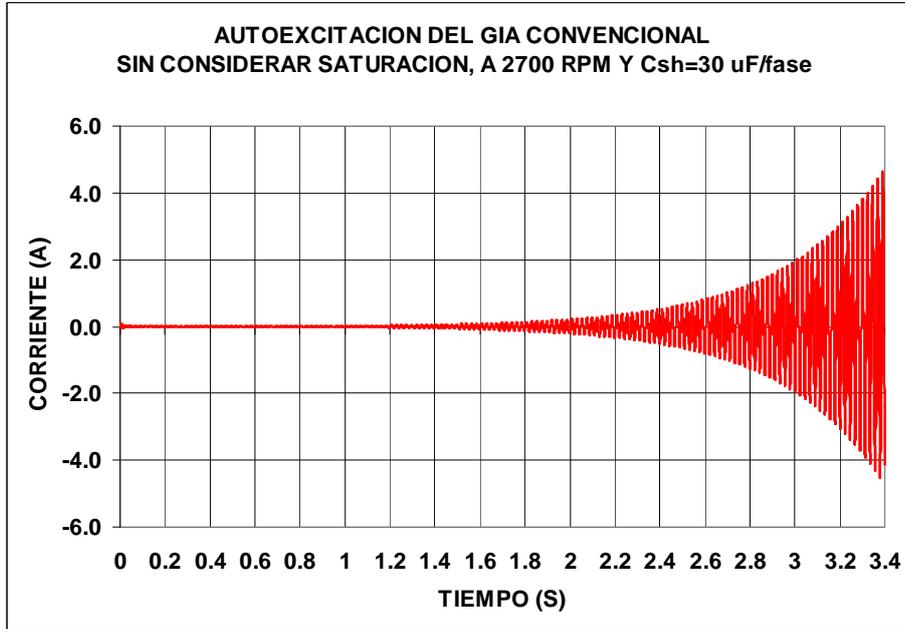
$$M = 0.59755 - 0.10713 * I_m; \quad I_m > 0.55$$

Se ha simulado el transitorio de autoexcitación del GI convencional (que tiene solo un bobinado en el estator) sin considerar el efecto de la saturación del circuito magnético, utilizando solamente el bobinado de excitación del estator y el bobinado del rotor de la referencia [31].

Esta simulación consiste en impulsar al GI convencional a una velocidad constante de 2700 rpm y luego se conecta (en el bobinado de excitación) un banco de capacitores de 30 uF/fase, que tienen una carga inicial. Como en esta simulación no se considera la saturación, se ha asumido que la inductancia magnetizante  $M$  es constante e igual a 0.47 Henrios.

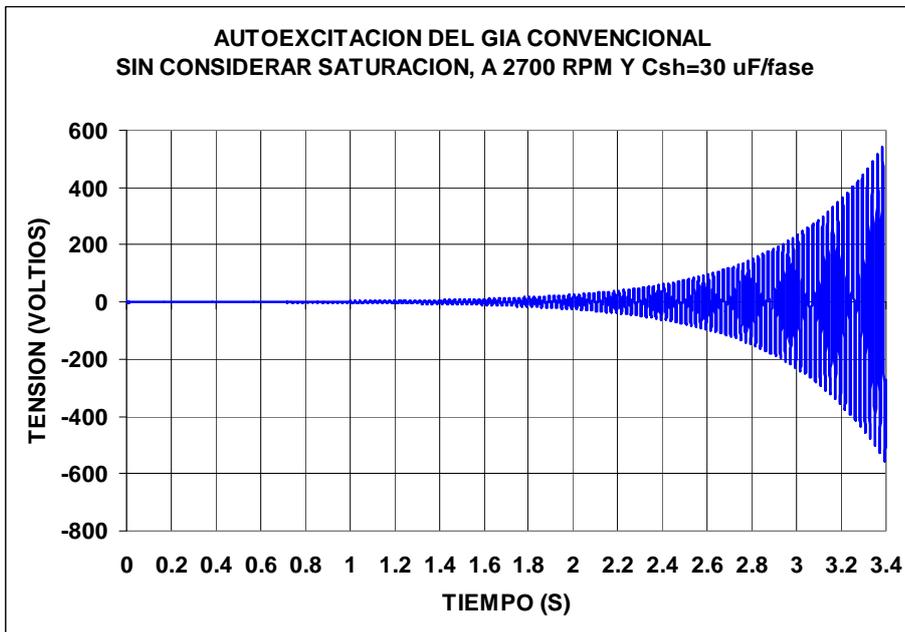
En las simulaciones de conceptualización del proceso de autoexcitación del GI convencional, la carga inicial  $V_{cd}$  y  $V_{cq}$  de los capacitores de excitación que se conectan al estator ha sido supuesta similar a los valores de las tensiones remanentes de la máquina impulsada a los 2700 rpm. Por ello, se debe mencionar que la tensión remanente de una máquina, medida en sus terminales a frecuencia nominal esta en el rango de 2 a 4 % de la tensión nominal. Entonces, la carga inicial de los capacitores expresada en los ejes d-q ha sido estimada como:  $V_{cd} = V_{cq} = 5.3$  voltios.

En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestra el comportamiento transitorio de la corriente  $i_{d1}^s$  y tensión de bobinado de excitación  $v_{d1}^s$ . Se aprecia una gran similitud con la respuesta transitoria de la corriente en un circuito serie RLC, cuyo capacitor tiene una determinada carga inicial (Figura 3.4).



**Figura 3.7** Corriente en el bobinado de excitación

**Fuente:** elaboración propia



**Figura 3.8** Tensión en el bobinado de excitación

**Fuente:** elaboración propia

### 3.3 Autoexcitación del generador de inducción convencional considerando la saturación

#### 3.3.1 La inductancia magnetizante

En el modelamiento de la maquina de inducción como motor es importante determinar la inductancia magnetizante a la tensión nominal que implica corriente magnetizante nominal, sin embargo en el GIA, la variación de la inductancia magnetizante es el principal factor en la dinámica de crecimiento de la tensión en bornes de la máquina y la posterior estabilización. En la Figura 3.9 se muestran los valores de  $M$  en función de la corriente magnetizante tomados de la referencia [31].

Del análisis de la Figura 3.9 se puede mencionar que la simulación del inicio del proceso de autoexcitación se puede realizar utilizando un valor de inductancia magnetizante con una corriente de excitación cercana a cero, este valor sería alrededor de 0.30 Henrios. Una vez que arranca la autoexcitación del GI la inductancia magnetizante se incrementa por encima de la zona A, la tensión en bornes y la corriente de excitación crecerán, asimismo, la inductancia magnetizante se incrementa hasta los valores del punto B. Desde el punto B hacia la zona C la inductancia magnetizante disminuye mientras que la tensión continua creciendo hasta que alcanza su valor de estado estacionario, que quedará establecida por el valor de  $M$ , la capacitancia  $C_{sh}$  y la velocidad del rotor  $\omega_r$ .

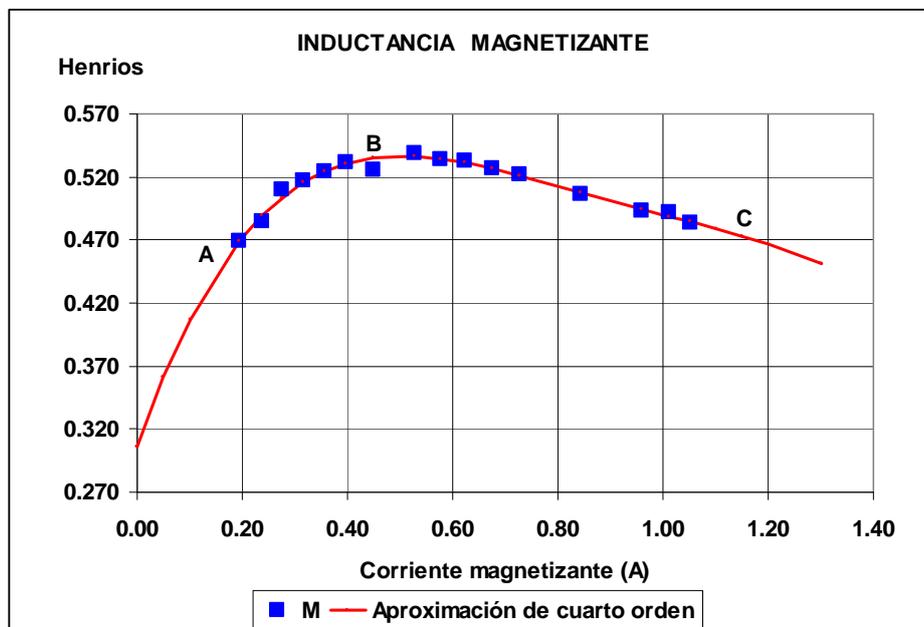


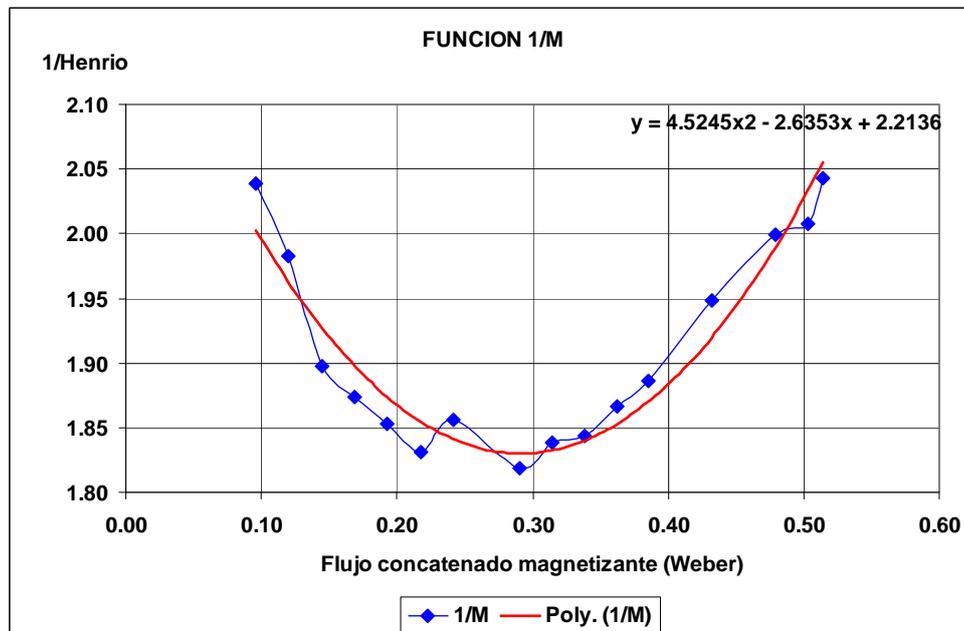
Figura 3.9 Variación de la inductancia magnetizante con la corriente magnetizante  
Fuente: [31]

### 3.3.2 Incorporación de la saturación

Para representar la saturación del circuito magnético del generador se ha utilizado un modelo que consiste en representar la inversa de la inductancia magnetizante de la máquina, mediante un polinomio de segundo grado cuya variable es el flujo concatenado magnetizante.

$$\frac{1}{M} = a_0 + a_1\psi_m + a_2\psi_m^2$$

A partir de los resultados experimentales consignados en el numeral 3.2.3 y que muestran la dependencia de la inductancia magnetizante  $M$  en función de la corriente magnetizante (Figura 3.9), se ha construido la característica  $1/M = Función(\psi_m)$ .



**Figura 3.10** Variación de la inductancia magnetizante con la corriente magnetizante-ajuste de función empírica  
**Fuente:** elaboración propia

Los coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  se obtienen luego de ajustar una ecuación de segundo grado a la dependencia de  $\frac{1}{M}$  respecto de  $\psi_m$  mostrada en la Figura 3.10.

### 3.3.3 Estrategia de simulación

Para simular el proceso de autoexcitación del GIA convencional en vacío, considerando el efecto de la saturación se siguen los siguientes pasos:

- (1) Se procesan las ecuaciones (3.10), (3.11) del procedimiento indicado en el numeral 3.2.2.
- (2) Con las componentes en los ejes “d” y “q” del flujo concatenado magnetizante, se calcula su magnitud mediante la ecuación:

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{qm}^2 + \psi_{dm}^2} \quad (3.14)$$

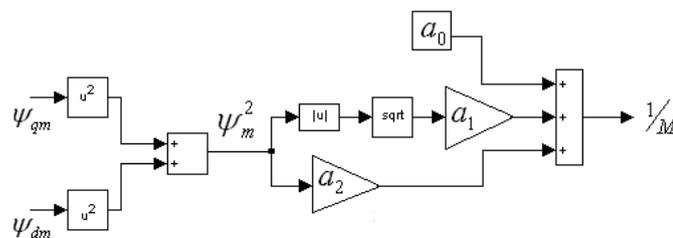
- (3) Con los coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  se calcula  $1/M$  utilizando:

$$\frac{1}{M} = a_0 + a_1\psi_m + a_2\psi_m^2 \quad (3.15)$$

- (4) Luego se procesan las ecuaciones (3.12) y (3.13).

En este caso, en cada instante se debe calcular el valor de  $1/M$  utilizando las ecuaciones (3.14) y (3.15) tal como se muestra en la Figura 3.11.

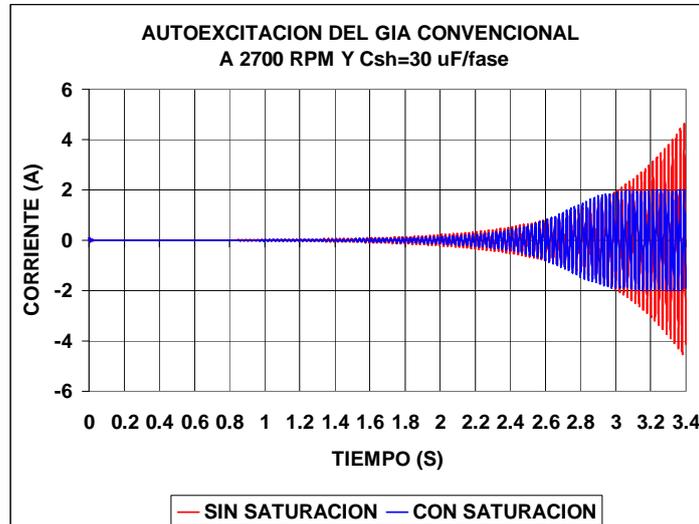
El diagrama de bloques de la Figura se utiliza para reemplazar al valor constante  $1/M$  del diagrama de bloques mostrado en la Figura 3.6, para simular el Transitorio de Autoexcitación del Generador de Inducción Convencional considerando la saturación del circuito magnético.



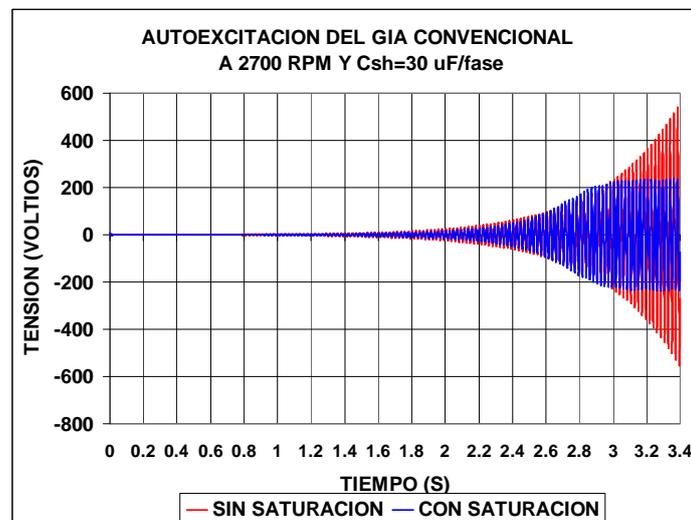
**Figura 3.11** Diagrama de bloques para el modelamiento de la saturación  
**Fuente:** elaboración propia

En las Figuras 3.12 y 3.13 se muestra el comportamiento transitorio de la corriente  $i_{d1}^s$  y tensión de bobinado de excitación  $v_{d1}^s$  obtenido utilizando la opción Análisis Transitorio de Autoexcitación en Vacío del GIADBE (Sin Capacitor Serie) del PROGRAMA GIADBCSE cuya estructura se muestra en el Anexo 1.

En estas Figuras se aprecia que debido al efecto de la saturación la tensión alcanza su valor de estado estacionario, definido por el valor que adopta la inductancia magnetizante  $M$ , el valor de la capacitancia  $C_{sh}$  y la velocidad del rotor  $\omega_r$ .



**Figura 3.12** Corriente en el bobinado de excitación-efecto de la saturación  
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 3.13** Tensión en el bobinado de excitación-efecto de la saturación  
**Fuente:** elaboración propia

### 3.3.4 Análisis de resultados

Se puede resumir que una vez que arranca la autoexcitación, el proceso de crecimiento de corriente en el bobinado de excitación y la tensión en terminales continúa en la forma descrita hasta que el hierro del circuito magnético se satura y la tensión empieza a estabilizarse. El efecto de la saturación se traduce en un proceso de crecimiento de la corriente y disminución de la inductancia magnetizante  $M$  hasta que la parte real de una

de las raíces se hace cero. En este momento el transitorio de autoexcitación termina y se llega a una condición de equilibrio (régimen final de estado estacionario) con una determinada tensión en terminales en el generador de inducción.

Se aprecia que la autoexcitación en vacío a las condiciones de velocidad (2700 rpm) y capacitor de excitación de 30 uF se logra en 3.1 s.

### **3.4 Efecto de la velocidad del rotor y del valor del banco de capacitores de excitacion**

#### **3.4.1 Relación Capacitor-Velocidad en vacío**

Cuando el GI es impulsado en vacío a una determinada velocidad, la frecuencia de la tensión generada en estado estacionario por el GIA es muy similar a la velocidad expresada en rad/s ya que el deslizamiento es cero. Asimismo, las corrientes en rotor son despreciables.

Por lo tanto, de la Figura 3.2 (despreciando el valor de la resistencia del estator), para que la autoexcitación del GI sea posible debe cumplirse un principio básico: la potencia reactiva suministrada por el capacitor de excitación debe ser igual a la potencia reactiva que consume la máquina en esta condición de vacío. Igualando estas potencias reactivas y simplificando la tensión del bobinado de excitación se obtiene la siguiente relación:

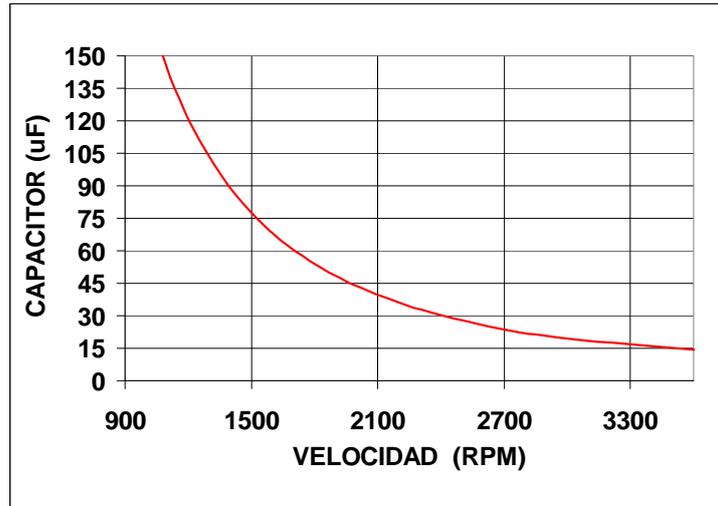
$$C = \frac{1}{\omega_r^2 (L_{1\sigma} + M)} \quad (3.16)$$

En (3.16)  $L_{1\sigma}$  es la inductancia de dispersión del devanado de excitación y  $M$  el valor no saturado de la inductancia magnetizante.

Utilizando (3.16) y los parámetros del GI utilizado en el presente trabajo se ha construido la Figura 3.14, para estimar el capacitor mínimo para provocar la autoexcitación, dada la velocidad en rpm ó para conocer la velocidad mínima si se utiliza un determinado valor de capacitor de excitación.

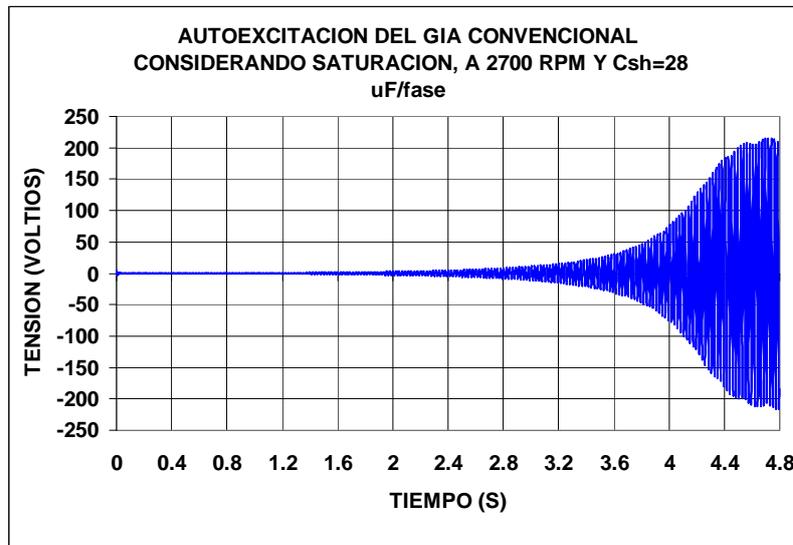
#### **3.4.2 Efecto del valor del capacitor de excitación**

Se ha simulado el proceso de autoexcitación en vacío de un GIA convencional, impulsado a 2700 rpm, utilizando valores de capacitor  $C_{sh}$  comprendidos entre 24 y 36 uF/fase.

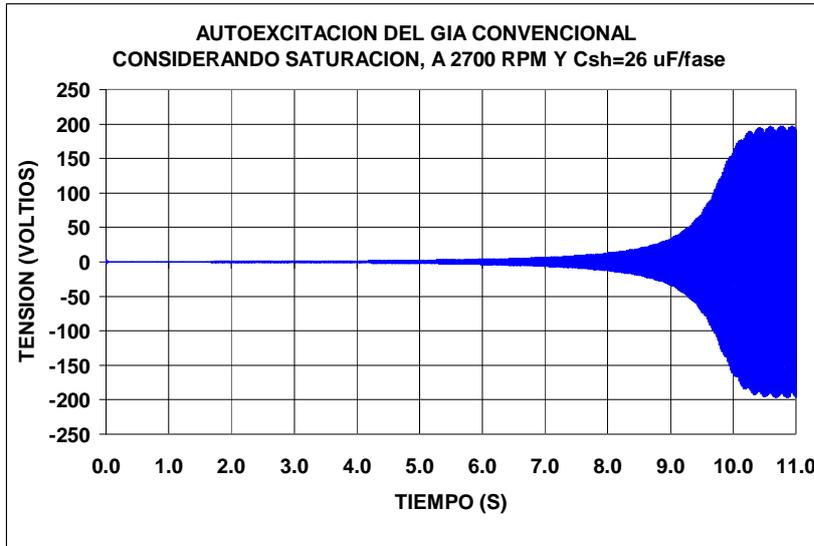


**Figura 3.14** Relación Capacitor-Velocidad en excitación en vacío  
**Fuente:** elaboración propia

En las Figuras 3.15 y 3.16 se muestra la evolución en el tiempo de la tensión del bobinado de excitación con capacitores de 28 y 26 uF/fase.

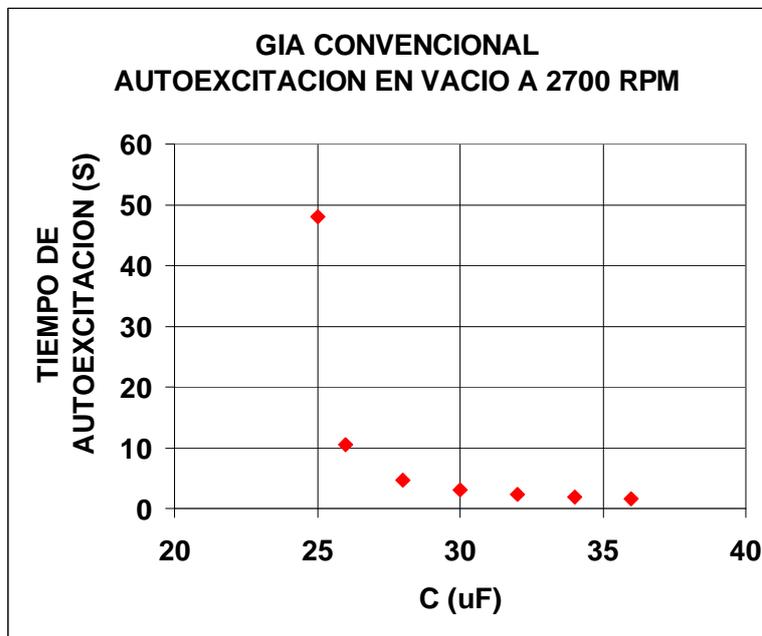


**Figura 3.15** Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 28 uF  
**Fuente:** elaboración propia

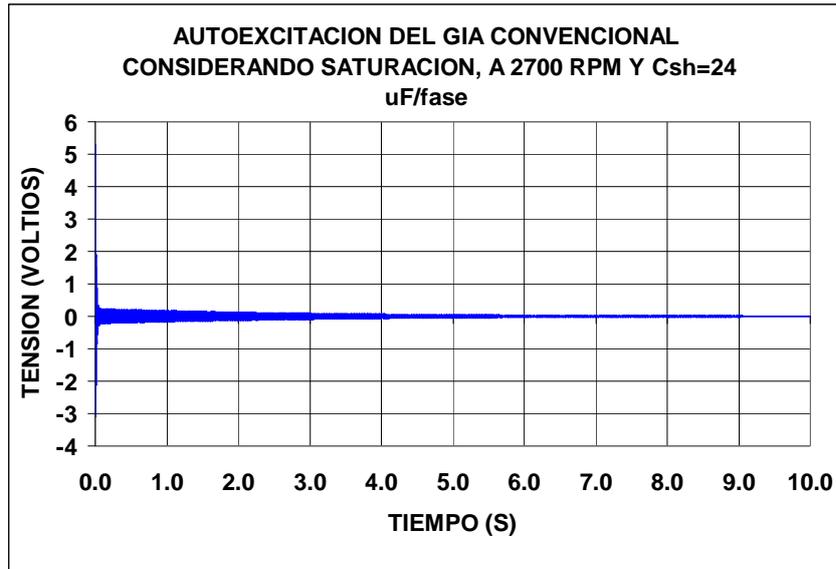


**Figura 3.16** Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 26 uF  
**Fuente:** elaboración propia

En la Figura 3.17 se presenta un resumen del tiempo en que se logra la autoexcitación en vacío en función de los valores de capacitor de excitación. Se aprecia que al utilizar capacitores de mayor magnitud el transitorio de autoexcitación toma menor tiempo y que no es posible la autoexcitación si se utiliza capacitores menores a 25 uF/fase.



**Figura 3.17** Tiempo de autoexcitación en vacío  
**Fuente:** elaboración propia



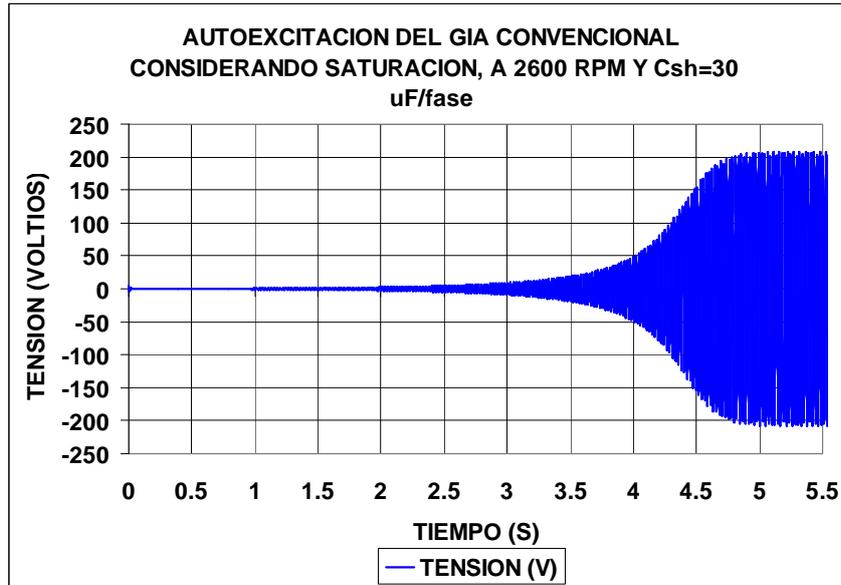
**Figura 3.18** Tensión en el bobinado de excitación-geoautoexcitación con 24 uF  
**Fuente:** elaboración propia

En la Figura 3.18 se muestra que no es posible la autoexcitación a 2700 rpm con capacitores de 24 uF/fase conectados al bobinado de excitación, ya que en vez de reforzar la carga inicial de los capacitores de excitación, en el transitorio se la máquina se desexcita completamente.

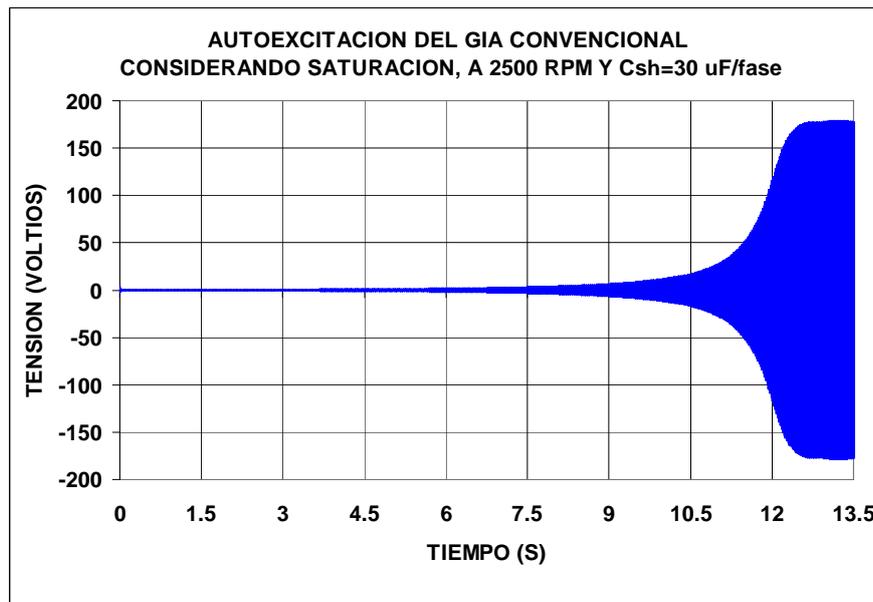
### 3.4.3 Efecto del valor de la velocidad del rotor

Para establecer el efecto del valor de la velocidad sobre la autoexcitación en vacío de un GIA convencional se ha simulado este proceso de autoexcitación, con un capacitor de excitación  $C_{sh} = 30$  uF/fase e impulsado a velocidades de 2600 rpm y 2500 rpm.

Los resultados de las Figuras 3.19 y 3.20 muestran que al impulsar el rotor a velocidades menores a 2700 el transitorio de autoexcitación toma mayor tiempo y el valor final de la tensión en el bobinado de excitación disminuye. Con velocidades de 2600 rpm y 2500 rpm los transitorios de autoexcitación toman 5 y 13.5 s, respectivamente.

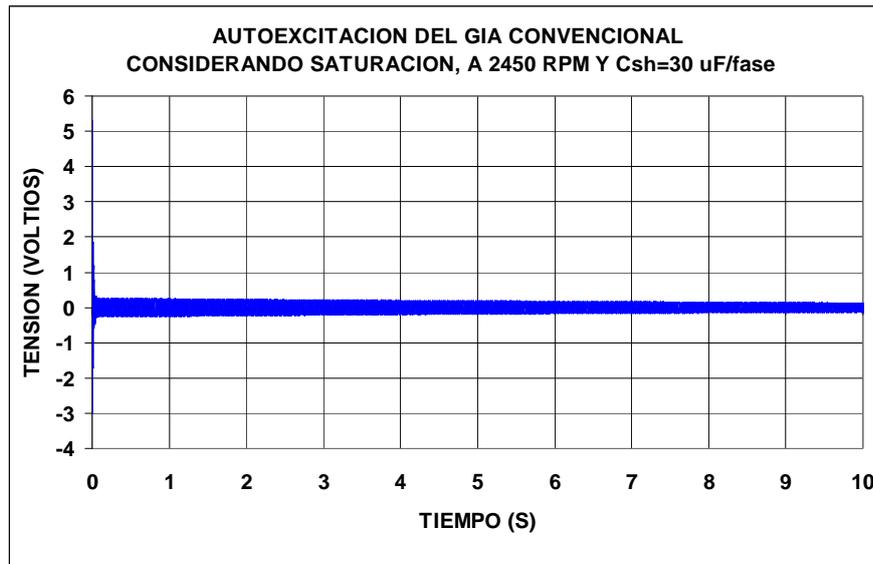


**Figura 3.19** Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 2600 rpm  
Fuente: elaboración propia



**Figura 3.20** Tensión en el bobinado de excitación-autoexcitación con 2500 rpm  
Fuente: elaboración propia

Asimismo, en la Figura 3.21 se muestra que no es posible la autoexcitación a 2450 rpm con capacitores de 30 uF/fase conectados al bobinado de excitación. Se puede indicar que con estos valores de capacitores de excitación se logra la autoexcitación solamente con velocidades superiores a 2450 rpm.



**Figura 3.21** Tensión en el bobinado de excitación- autoexcitación con 2450 rpm  
**Fuente:** elaboración propia

### 3.5 Conclusiones

A partir del modelo del GIADBECE se han obtenido las ecuaciones diferenciales del Generador de Inducción Autoexcitado convencional (GIA).

Luego se ha mostrado de manera cualitativa el proceso transitorio de autoexcitación del generador de inducción (GI) convencional, resaltando el papel que juega la saturación del circuito de la máquina en la estabilización de este proceso. Para ello se ha representado la saturación del circuito magnético del generador mediante un polinomio de segundo grado que muestra la dependencia de la inversa de la inductancia magnetizante de la máquina ( $1/M$ ) en función del flujo concatenado magnetizante ( $\psi_m$ ).

Las simulaciones muestran que para condiciones dadas de velocidad existe un valor mínimo de capacitor de excitación (valor crítico) con el cual no es posible la autoexcitación del GI convencional. Asimismo, se muestra que con un determinado capacitor de excitación, existe un valor mínimo o crítico de velocidad con el cual se impulsa el GI y no es posible la autoexcitación.

## CAPITULO 4

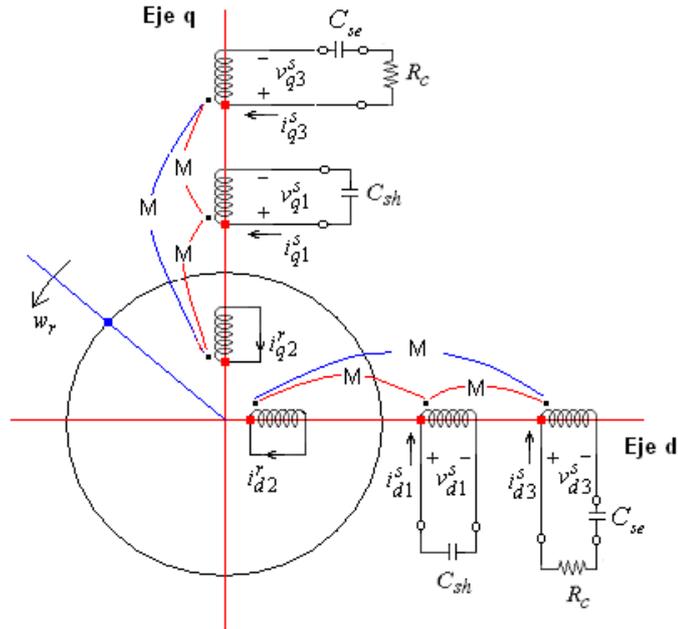
### TRANSITORIOS EN EL GENERADOR DE INDUCCIÓN CON DOBLE BOBINADO EN EL ESTATOR AUTOEXCITADO Y AUTOREGULADO

En el Capítulo 3 se ha verificado de manera cualitativa la autoexcitación del GIA convencional. Ahora se verifica la autoexcitación del generador de inducción con doble bobinado en el estator que posee capacitores de excitación  $C_{sh}$  en el bobinado de excitación, habiéndose incorporado capacitores  $C_{se}$  conectados en el bobinado de carga en serie con una carga resistiva  $R_c$ .

#### 4.1 Modelo del GIADBE con capacitor en serie con la carga

La representación del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator con capacitores de excitación y capacitores en serie con la carga (GIADBECSE), desarrollada en el Capítulo 2 se muestra en la Figura 4.1. Se aprecia que  $C_{sh}$  es el capacitor que se conecta en cada fase del bobinado de excitación,  $C_{se}$  es el capacitor que se conecta en serie con cada fase del bobinado de carga y  $R_c$  la carga resistiva por fase en el bobinado de carga.

En la representación de la Figura 4.1 los parámetros y variables de los bobinados de carga y del rotor están reflejados al bobinado de excitación del estator.



**Figura 4.1** Representación del GIADBECSE en un sistema de referencia d-q fijo al estator  
**Fuente:** elaboración propia

#### 4.2 Estrategia de solución de las ecuaciones algebraico-diferenciales

Las ecuaciones diferenciales y algebraicas del GIADBECSE impulsado a velocidad  $\omega_r$  constante, expresadas en un sistema de referencia d-q fijo al estator se obtienen de las ecuaciones (2.55), (2.56), (2.57) y (2.58) del Capítulo 2.

Para la solución de las ecuaciones del GIADBECSE, es necesario que las ecuaciones mencionadas sean despejadas en la forma requerida para efectuar las simulaciones mediante el Toolbox Simulink de Matlab.

Entonces, a partir de las ecuaciones (2.55) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 p\psi_{q1}^s &= v_{q1}^s - R_1 i_{q1}^s \\
 p\psi_{d1}^s &= v_{d1}^s - R_1 i_{d1}^s \\
 p\psi_{q3}^s &= v_{q3}^s - R_3 i_{q3}^s \\
 p\psi_{d3}^s &= v_{d3}^s - R_3 i_{d3}^s \\
 p\psi_{q2}^r &= -R_2 i_{q2}^r + \omega_r \psi_{d2}^r \\
 p\psi_{d2}^r &= -R_2 i_{d2}^r - \omega_r \psi_{q2}^r
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Con las ecuaciones (2.57) es posible despejar las componentes en los ejes “d” y “q” del flujo concatenado magnetizante de la máquina, expresado en función de las variables del bobinado de excitación.

$$\begin{aligned}\psi_{qm} &= \psi_{q1}^s - L_{1\sigma} i_{q1}^s \\ \psi_{dm} &= \psi_{d1}^s - L_{1\sigma} i_{d1}^s\end{aligned}\quad (4.2)$$

Una vez obtenidas las componentes en los ejes “d” y “q” del flujo concatenado magnetizante, es posible obtener su magnitud mediante la ecuación (4.3), dada por:

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{qm}^2 + \psi_{dm}^2} \quad (4.3)$$

Luego se calcula:

$$\frac{1}{M} = a_0 + a_1 \psi_m + a_2 \psi_m^2 \quad (4.4)$$

Entonces, las componentes en los ejes d y q de las corrientes de los bobinados de excitación y carga, así como las componentes de la corriente del rotor se calculan a partir de las ecuaciones (2.56) y (2.57), mediante las siguientes relaciones:

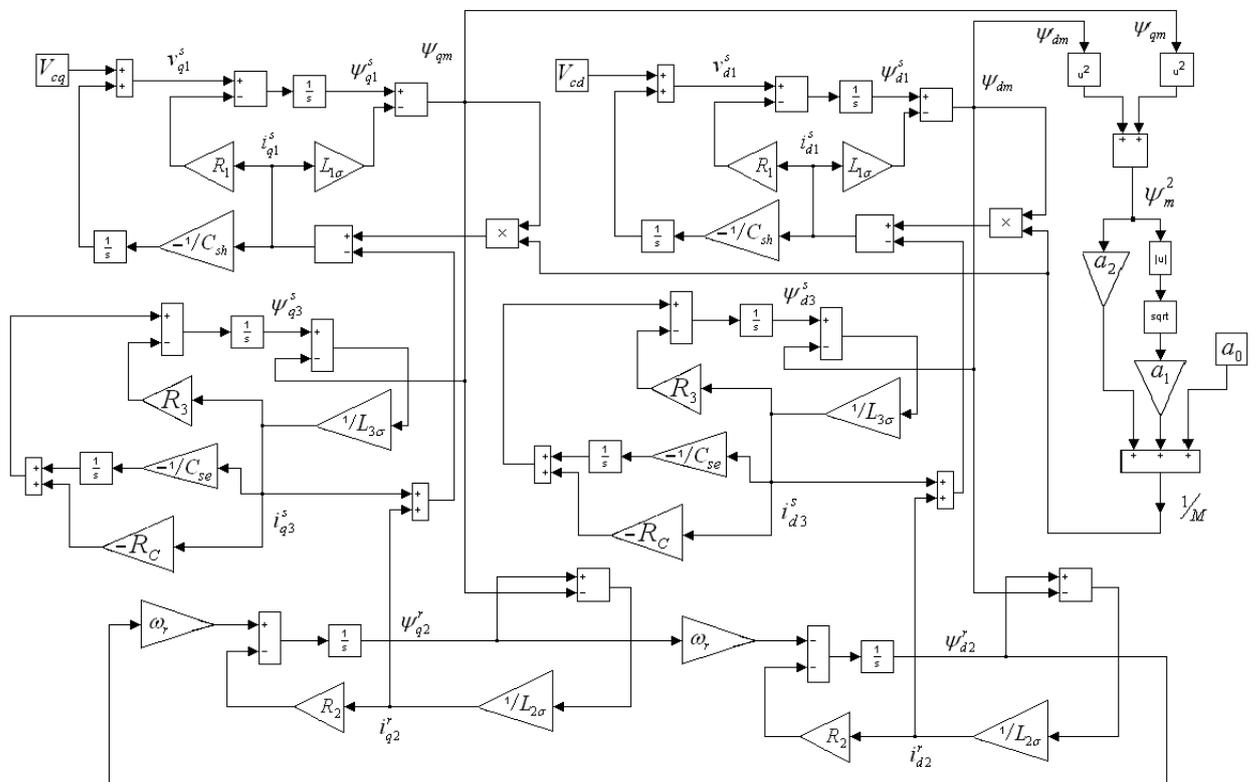
$$\begin{aligned}i_{q1}^s &= \frac{1}{M} \psi_{qm} - (i_{q3}^s + i_{q2}^r) \\ i_{d1}^s &= \frac{1}{M} \psi_{dm} - (i_{d3}^s + i_{d2}^r) \\ i_{q3}^s &= \frac{1}{L_{3\sigma}} (\psi_{q3}^s - \psi_{qm}) \\ i_{d3}^s &= \frac{1}{L_{3\sigma}} (\psi_{d3}^s - \psi_{dm}) \\ i_{q2}^r &= \frac{1}{L_{2\sigma}} (\psi_{q2}^r - \psi_{qm}) \\ i_{d2}^r &= \frac{1}{L_{2\sigma}} (\psi_{d2}^r - \psi_{dm})\end{aligned}\quad (4.5)$$

Por lo tanto, las tensiones en los bobinados de excitación y carga del estator están dadas por:

$$\begin{aligned}v_{q1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{q1}^s \\ v_{d1}^s &= -\frac{1}{pC_{sh}} i_{d1}^s \\ v_{q3}^s &= -\frac{1}{pC_{se}} i_{q3}^s - R_C i_{q3}^s \\ v_{d3}^s &= -\frac{1}{pC_{se}} i_{d3}^s - R_C i_{d3}^s\end{aligned}\quad (4.10)$$

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de bloques que implementa las ecuaciones (4.1) a (4.10) utilizando el Toolbox Simulink de Matlab que forma parte del Análisis Transitorio de Autoexcitación Con Carga del PROGRAMA GIADBCSE cuya estructura se muestra en el Anexo 1.

En esta concepción el generador está impulsado a una velocidad constante de 2700 rpm, tiene una carga resistiva determinada en el bobinado de carga y un capacitor serie, y luego se conecta (en el bobinado de excitación) un banco de capacitores de 30 uF/fase, que tiene una carga inicial por fase similar a la tensión remanente de la máquina a la velocidad indicada.



**Figura 4.2** Diagrama de bloques de la autoexcitación del GIADBE con carga resistiva  
Fuente: elaboración propia

### 4.3 Autoexcitación del GIADBE con carga resistiva

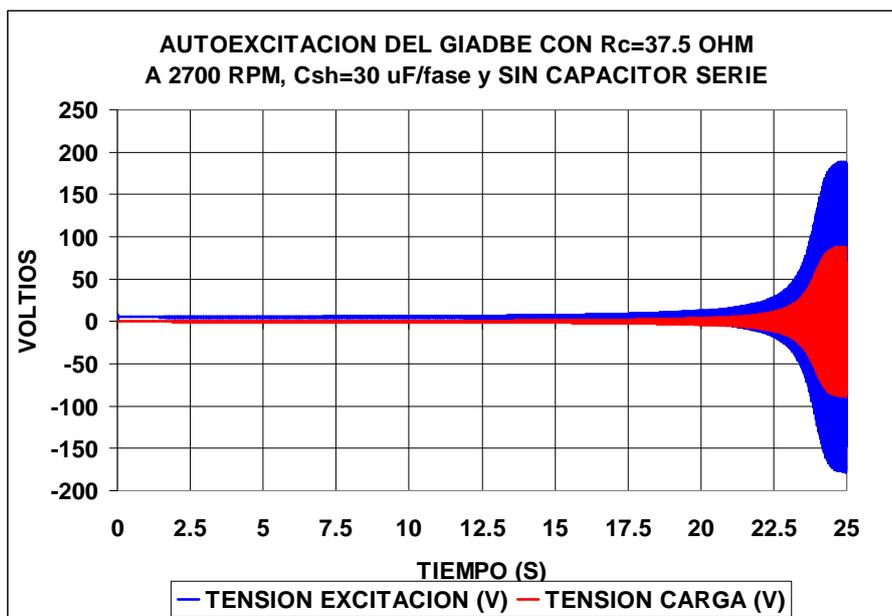
Para simular estos procesos transitorios del GIADBE, se utiliza la opción Análisis Transitorio Sin Capacitor Serie Autoexcitación con Carga del PROGRAMA GIADBE cuya estructura se muestra en el Anexo 1. Consiste en impulsar al GIADBE a una velocidad constante de 2700 rpm, con una carga resistiva en el bobinado de carga y

luego se conecta (en el bobinado de excitación) un banco de capacitores de 30 uF/fase, que tiene una carga inicial por fase similar a la tensión remanente.

Con la finalidad de encontrar la resistencia de carga crítica con la cual aun es posible lograr la autoexcitación con carga del GIADBE se han realizado simulaciones con varios valores de  $R_C$ .

#### 4.3.1 Resistencia de carga crítica

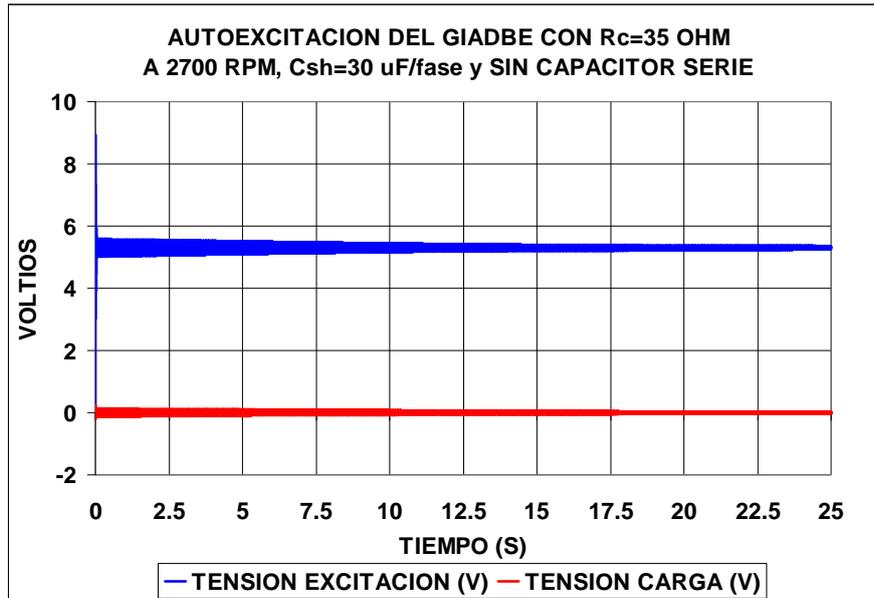
Se ha encontrado que para las condiciones de velocidad (2700 rpm) y el banco de capacitores de 30 uF/fase en el bobinado de excitación, la resistencia de carga crítica es 37.5  $\Omega$  por fase. En la Figura 4.3 se muestra la evolución en el tiempo de la tensión en el bobinado de excitación y la tensión en el bobinado de carga, este comportamiento indica que el GIADBE aún logra autoexcitarse con este valor de carga resistiva, para lo cual le toma 25 s.



**Figura 4.3** Autoexcitación del GIDBE con la carga resistiva crítica  
**Fuente:** elaboración propia

#### 4.3.2 Resistencias de carga menores a la crítica

Se ha verificado que con resistencias de carga menores a 37.5  $\Omega$  por fase no es posible la autoexcitación del GIADBE, impulsado a una velocidad de 2700 rpm y con un banco de capacitores de 30 uF/fase en el bobinado de excitación. En la Figura 4.4 se muestra el comportamiento de las tensiones en los bobinados de excitación y carga, se aprecia que para este valor de resistencia no es posible la autoexcitación.



**Figura 4.4** Autoexcitación del GIADBE con resistencia de carga menor a la crítica  
**Fuente:** elaboración propia

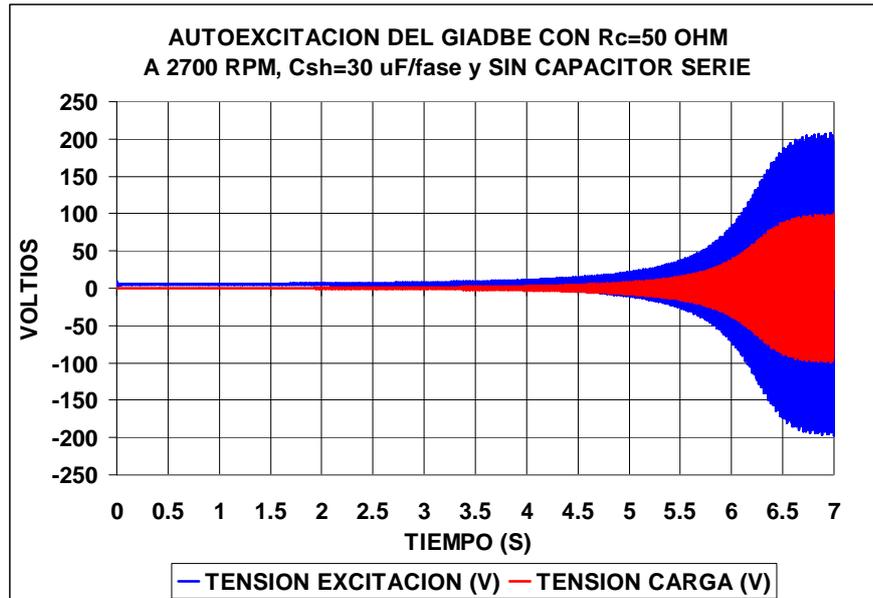
### 4.3.3 Resistencias de carga mayores a la crítica

Se ha simulado el proceso de autoexcitación del GIADBE con valores de  $R_c$  mayores a la resistencia de carga crítica ( $37.5 \Omega$ ), para las condiciones de velocidad y magnitud de capacitor en el bobinado de excitación utilizados.

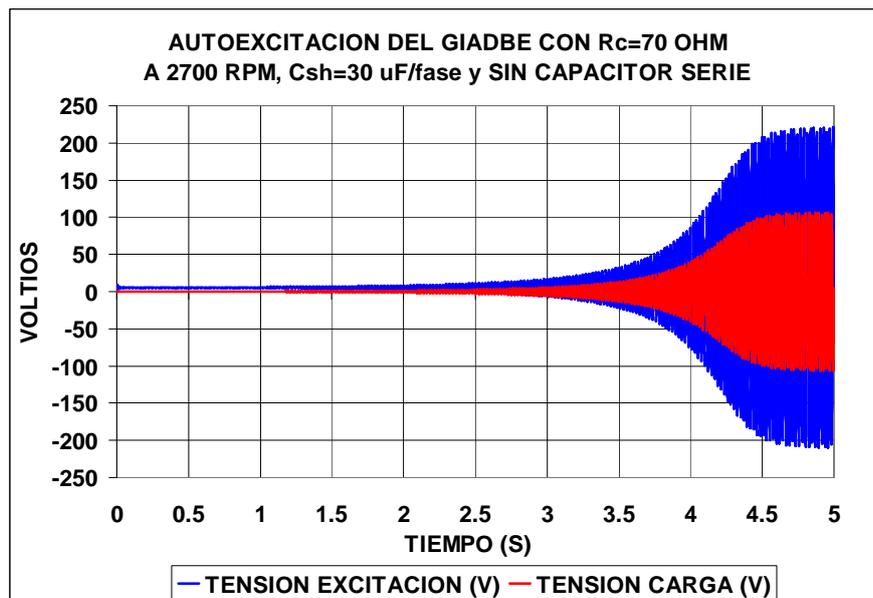
Para efectos de ilustración en las Figuras 4.5 y 4.6 se muestra los resultados del comportamiento transitorio de la tensión y corriente en los bobinados de excitación y carga para el caso de cargas resistivas de  $50 \Omega$  y  $70 \Omega$  por fase.

El efecto de utilizar un valor mayor de resistencia se aprecia en el tiempo que toma la autoexcitación y en los valores finales de las tensiones y corrientes en los devanados de excitación y carga.

Se puede resumir de manera cualitativa que la autoexcitación con  $50 \Omega$  se logra a los 7 s y con una resistencia de  $70 \Omega$  por fase la autoexcitación es exitosa luego de 4.8 s.



**Figura 4.5** Autoexcitación del GIADBE con carga 50 ohm  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.6** Autoexcitación del GIADBE con 70 ohm  
Fuente: elaboración propia

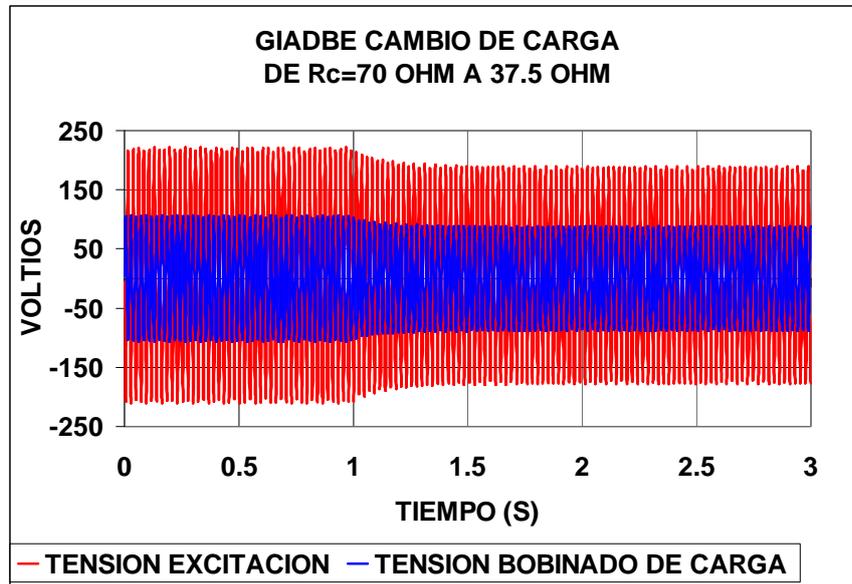
#### 4.4 Cambios bruscos de carga en el GIADBE

Para las simulaciones se utiliza la opción Otros de Análisis Transitorio Sin Capacitor Serie del PROGRAMA GIADBECESE mostrado en el Anexo 1.

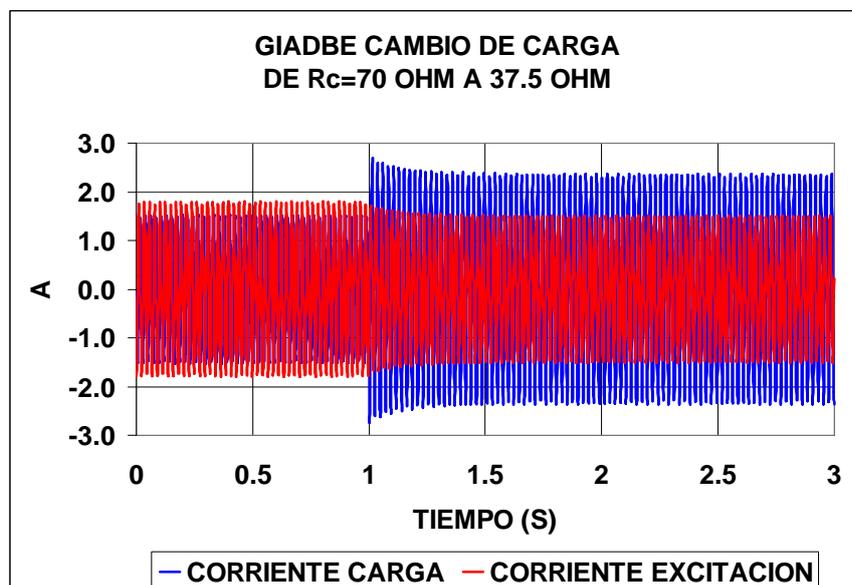
##### 4.4.1 Cambios bruscos de carga menores a la carga crítica

En las Figuras 4.7 y 4.8 se muestra la evolución en el tiempo de las tensiones de los bobinados de excitación y carga, así como las corrientes en estos bobinados, antes y

después del cambio súbito de la resistencia de carga. Se aprecia que por el incremento de la carga, tanto en los bobinados de excitación como de carga se aprecian disminuciones transitorias, que se estabilizan 250 ms después de provocado el evento.



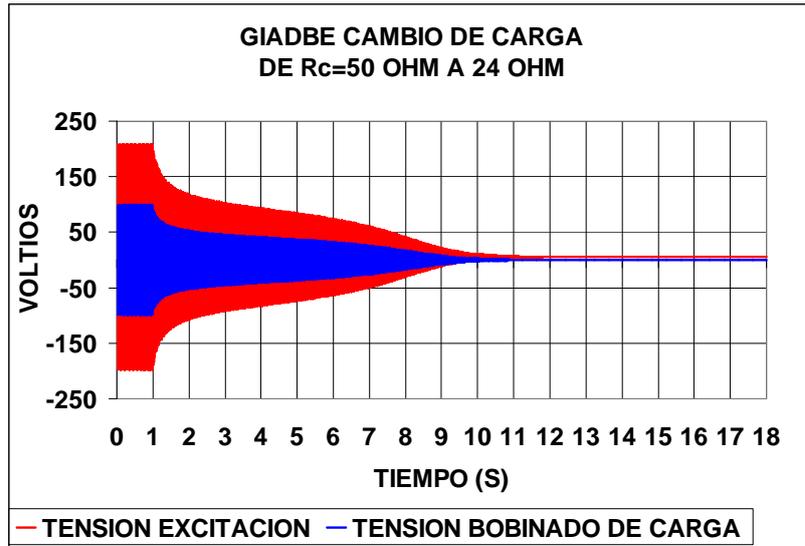
**Figura 4.7** Comportamiento transitorio de las tensiones  
Fuente: elaboración propia



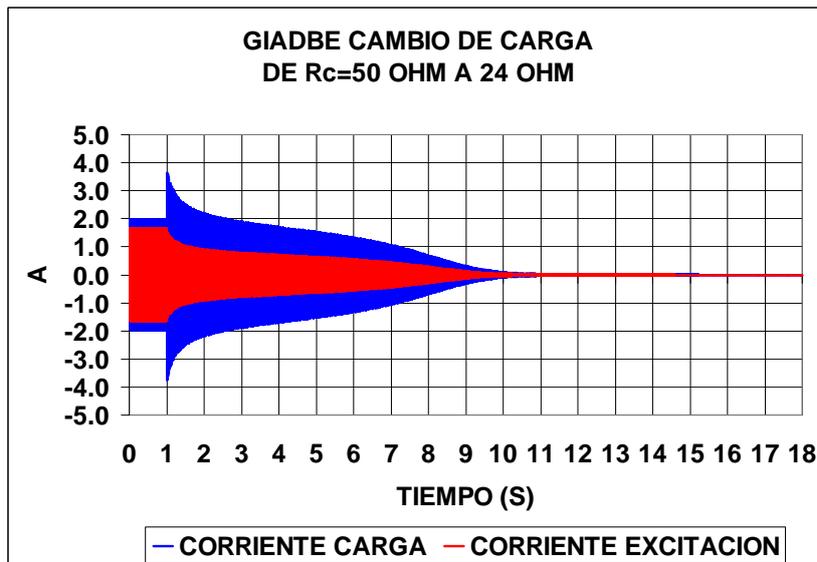
**Figura 4.8** Comportamiento transitorio de las corrientes  
Fuente: elaboración propia

#### 4.4.2 Cambios bruscos de carga mayores a la carga crítica

En las Figuras 4.10 y 4.11 se muestra la evolución en el tiempo antes y después del incremento de la carga. Se aprecia que la sobrecarga simulada desexcita al GIADBE y lleva al generador más allá de un punto de colapso de tensión.



**Figura 4.9** Comportamiento transitorio de las tensiones (desexcitación)  
Fuente: elaboración propia

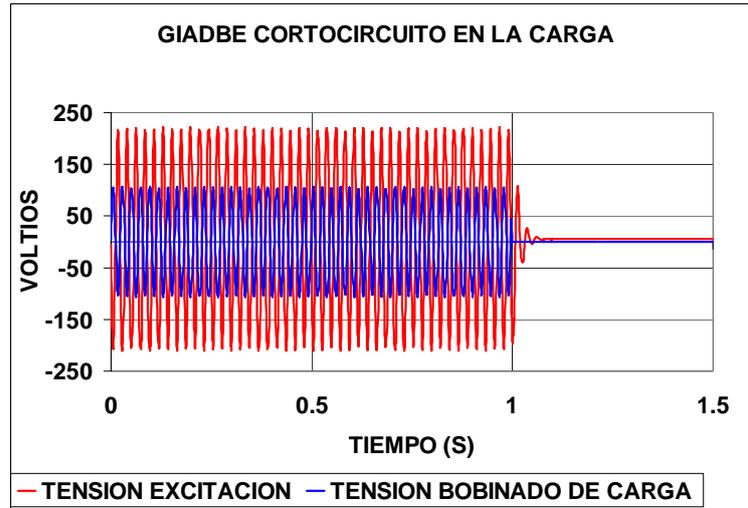


**Figura 4.10** Comportamiento transitorio de las corrientes (desexcitación)  
Fuente: elaboración propia

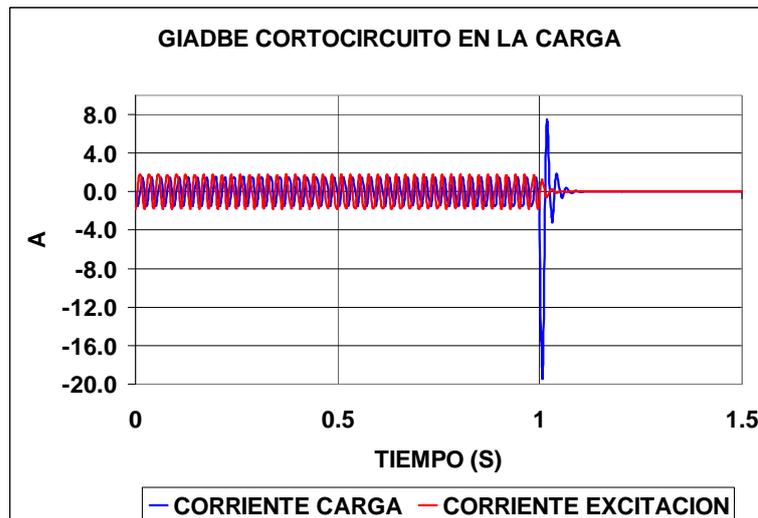
El punto de colapso existe y está dado por una condición de carga que representa una resistencia de carga menor a la resistencia de carga crítica de  $37.5 \Omega$ .

#### 4.5 Cortocircuito en la carga del GIADBE

Se utiliza la opción Otros de Análisis Transitorio Sin Capacitor Serie del PROGRAMA GIADBECSSE mostrado en el Anexo 1. Este evento se reproduce conectando bruscamente una resistencia de carga nula en el bobinado de carga.



**Figura 4.11** Comportamiento transitorio de las corrientes  
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 4.12** Comportamiento transitorio de las corrientes  
**Fuente:** elaboración propia

En las Figuras 4.12 y 4.13 se muestra que como consecuencia de este evento no se aprecia picos en la tensión en el bobinado de excitación del GIADBE, que colapsa desexcitándose en casi instantáneamente. En este evento la corriente del bobinado de carga presenta la típica evolución en el tiempo de la corriente de cortocircuito en las máquinas de inducción. En ese sentido en la Figura 4.13 se aprecia un pico de corta duración en la corriente de cortocircuito, que depende de la tensión existente en el banco de excitación en el instante del cortocircuito.

Aun cuando este comportamiento ante cortocircuitos puede ser considerado como una ventaja, este tipo de fallas puede provocar la incertidumbre de que la máquina pueda re-

excitarse después del evento sin requerir que los capacitores de excitación deban ser cargados previamente.

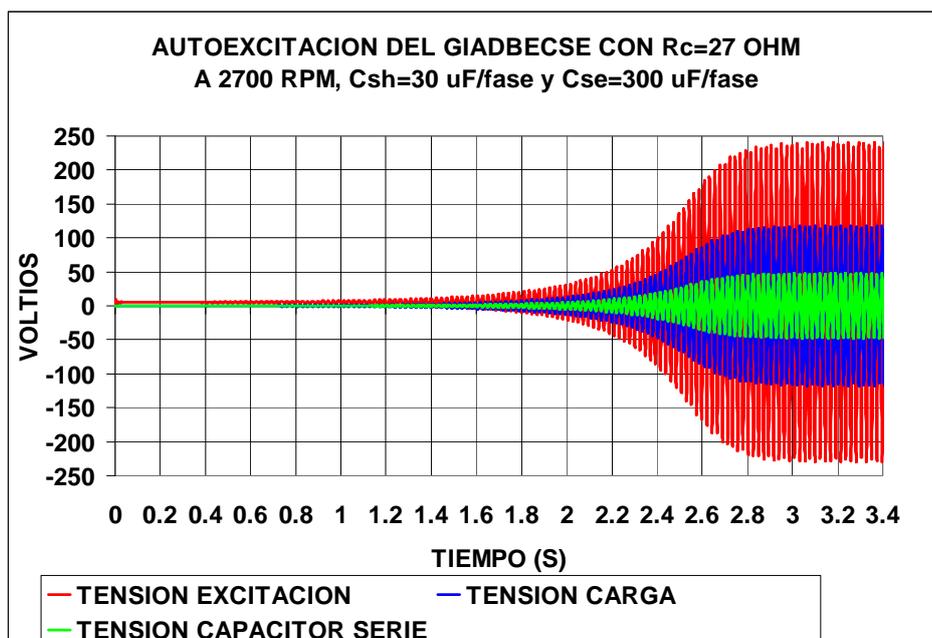
#### 4.6 Efecto de la adición de un capacitor en serie con la carga en el GIADBE

Luego se ha simulado el proceso de autoexcitación del GIADBE impulsado a 2700 rpm, con un capacitor  $C_{se}$  de 300 uF en serie con la carga resistiva y se le conecta al bobinado de excitación los capacitores  $C_{sh}$  de 30 uF/fase. Para las simulaciones se utiliza la opción Análisis Transitorio Con Capacitor Serie del PROGRAMA GIADBECESE mostrado en el Anexo 1.

##### 4.6.1 Efecto del valor de la resistencia de carga

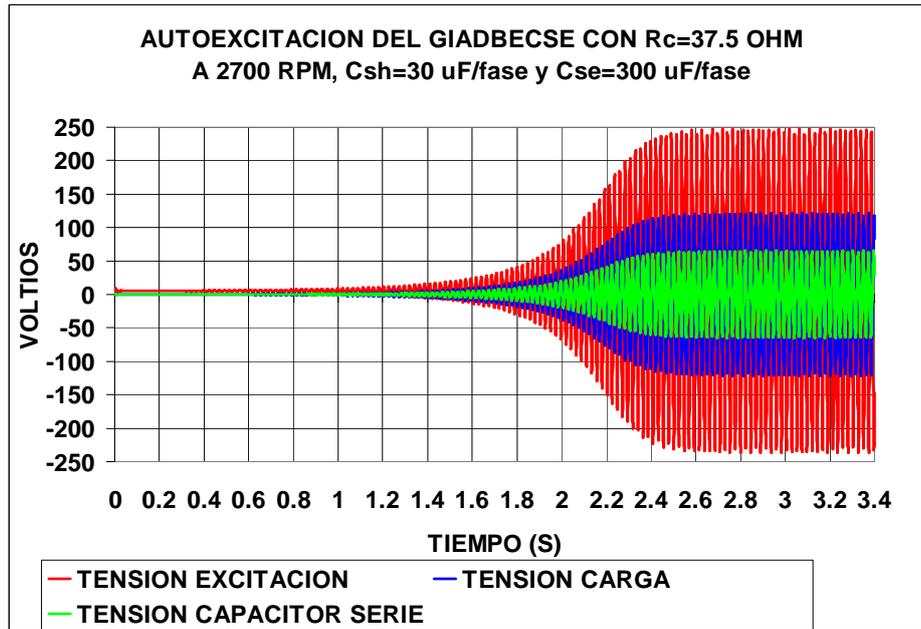
Se han efectuado simulaciones de autoexcitación con diferentes valores de carga resistiva desde 25  $\Omega$  hasta 70  $\Omega$ , cuyos resultados se presentan en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16.

En la Figura 4.14 se muestra la evolución en el tiempo de las tensiones de los bobinados de excitación y de carga, así como en el capacitor serie para una resistencia de carga menor al 37.5  $\Omega$  (valor crítico del GIADBE). Los resultados muestran que al incorporar capacitores de 300 uF/fase en serie con la carga, el generador de inducción puede autoexcitarse inclusive con resistencias de carga menores al valor crítico, superando la inflexibilidad encontrada en el acápite 4.3.2.

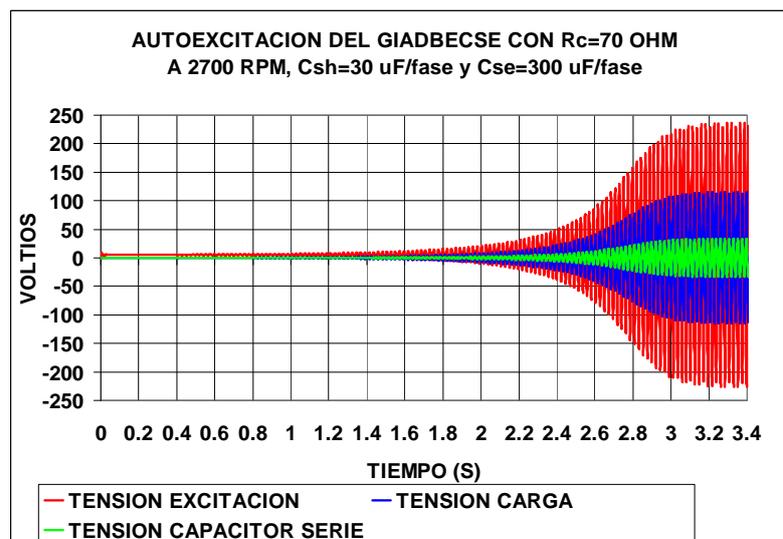


**Figura 4.13** Comportamiento de las tensiones-auto excitación con carga del GIADBECESE

**Fuente:** elaboración propia



**Figura 4.14** Comportamiento de las tensiones-auto excitación con carga del GIADBECE  
**Fuente:** elaboración propia

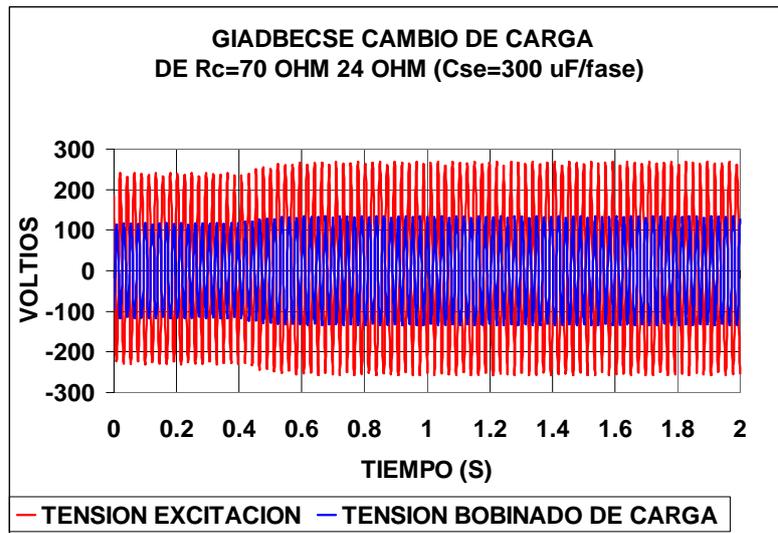


**Figura 4.15** Comportamiento de las tensiones-auto excitación con carga del GIADBECE  
**Fuente:** elaboración propia

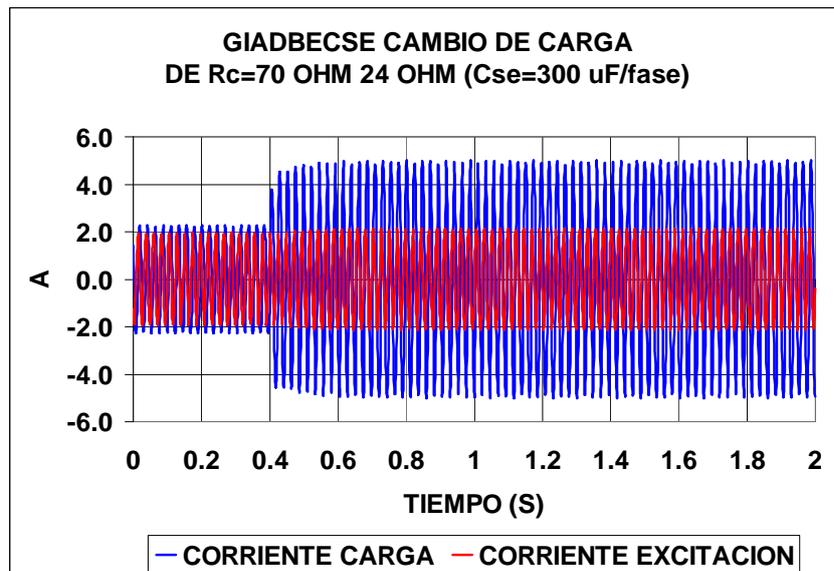
#### 4.7 Cambios bruscos de carga en el GIADBECE

En esta parte del trabajo se ha simulado transitorios en el GIADBECE (tiene capacitores de excitación de 30 uF/fase en el bobinado de excitación y capacitores de 300 uF/fase en serie con la carga del bobinado de carga) que esta impulsado a 2700 rpm y alimentando a una carga resistiva determinada y bruscamente se modifica este valor de carga. Para las simulaciones se utiliza la opción Otros de Análisis Transitorio Con Capacitor Serie del PROGRAMA GIADBECE mostrado en el Anexo 1.

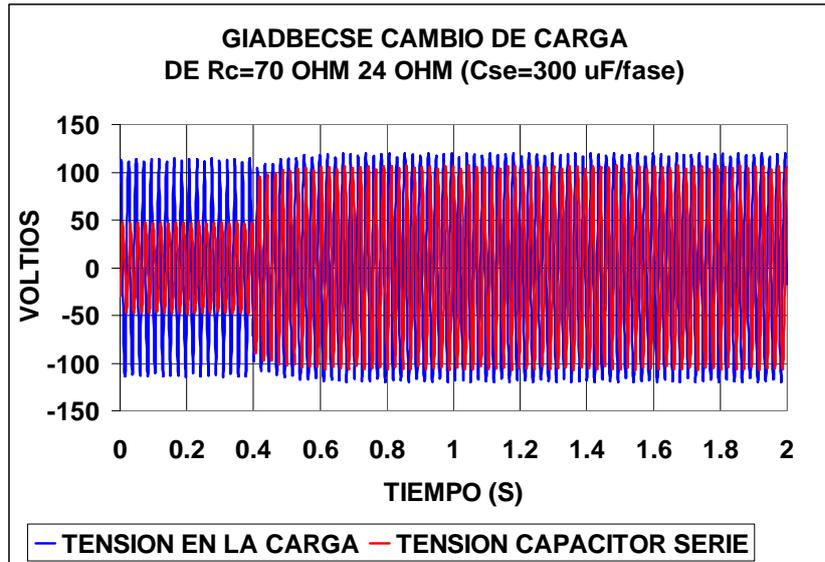
En las Figuras 4.17 y 4.18 se muestra la evolución en el tiempo del comportamiento del GIADBCSE ante el evento indicado.



**Figura 4.16** Comportamiento de las tensiones en los bobinados-cambio de carga GIADBCSE  
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 4.17** Comportamiento de las corrientes de los bobinados-cambio de carga GIADBCSE  
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 4.18** Comportamiento de las tensiones en la carga y capacitor serie-cambio de carga GIADBE  
**Fuente:** elaboración propia

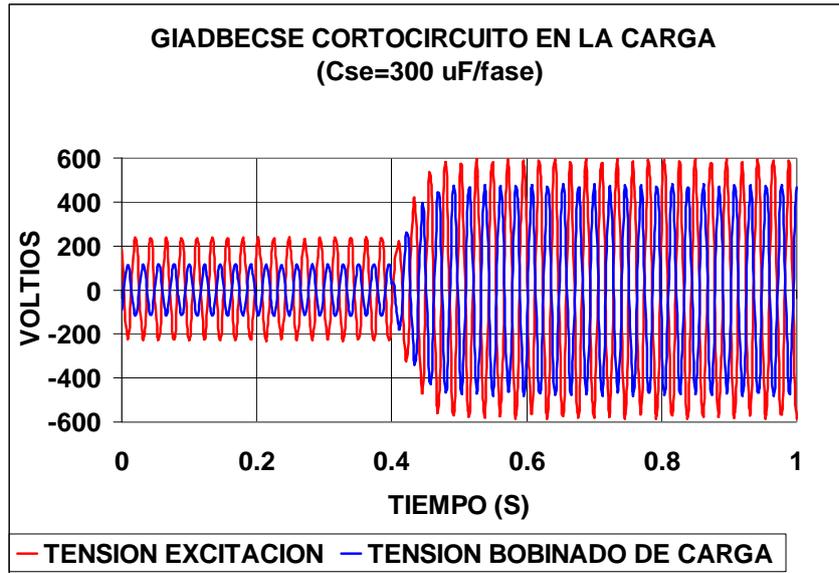
Los resultados ponen en evidencia un incremento en la capacidad y habilidad del GIADBE para soportar grandes eventos sin perder la estabilidad, propiedades ganadas por la incorporación de los capacitores serie.

#### 4.8 Cortocircuito en la carga del GIADBE

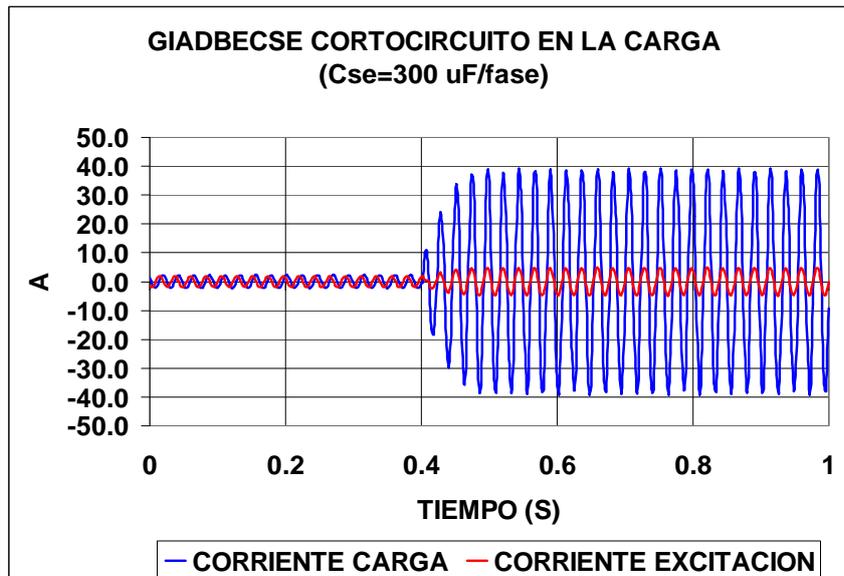
El cortocircuito en la carga es un evento que tiene gran probabilidad de ocurrencia. Para su simulación se utiliza la opción Otros de Análisis Transitorio Con Capacitor Serie del PROGRAMA GIADBE mostrado en el Anexo 1.

En las Figuras 40, 41, 42 y 43 se muestra la evolución en el tiempo de las principales variables de operación del GIADBE antes y después del evento indicado.

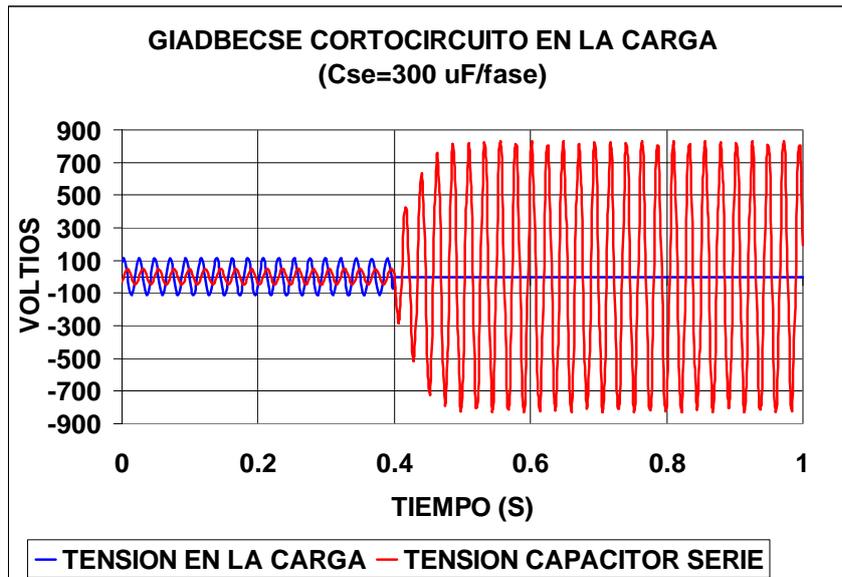
Debido a la falla simulada, la tensión en el bobinado de excitación experimenta un crecimiento de 100 % (de 375.6 V a 770 V). La sobreexcitación del GIADBE se explica ya que por efecto del cortocircuito queda operando en vacío, con el capacitor serie conectado en paralelo con los terminales del bobinado de carga de la máquina.



**Figura 4.19** Comportamiento de las tensiones en los bobinados-GIADBEBCSE-  
Cortocircuito en la carga  
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 4.20** Comportamiento de las corrientes en los bobinados-GIADBEBCSE-  
Cortocircuito en la carga  
**Fuente:** elaboración propia



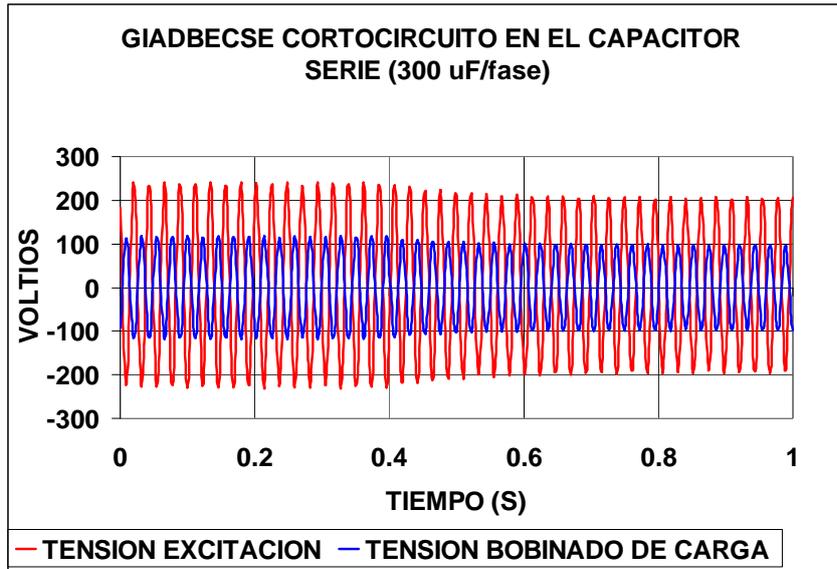
**Figura 4.21** Comportamiento de las tensiones en la carga y capacitor serie-GIADBECSSE-Cortocircuito en la carga  
**Fuente:** elaboración propia

La corriente en el capacitor serie se incrementa notablemente durante el cortocircuito. En contraste con el GIADBE que se desexcita por un cortocircuito sostenido, ahora existe una adecuada corriente que esta alimentando la falla y que va a operar los dispositivos de protección de sobrecorriente del generador. Asimismo una vez liberado el cortocircuito el GIADBECSSE no va a requerir la carga de los capacitores para el reinicio de la operación.

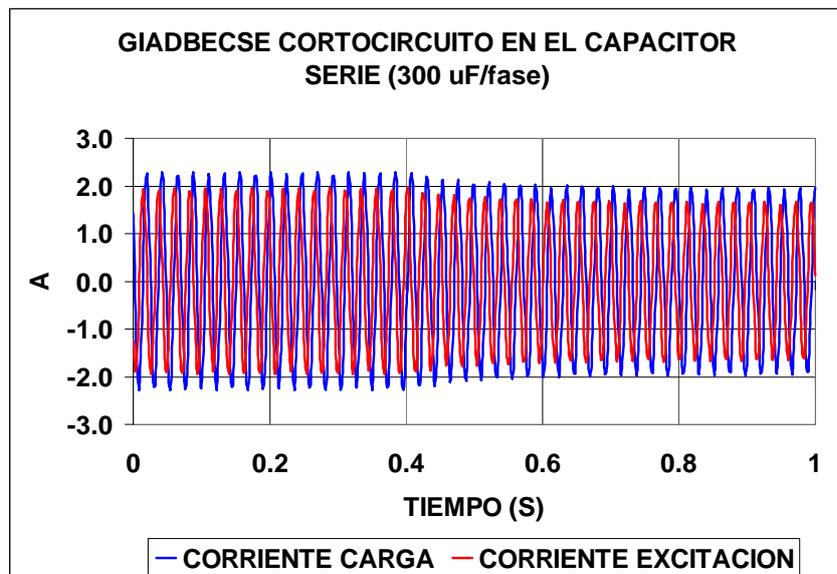
#### 4.9 Cortocircuito en el capacitor serie

Se ha simulado un cortocircuito en los capacitores serie a partir de una condición inicial de operación en la que el GIADBECSSE esta alimentado una carga resistiva de 50  $\Omega$ /fase. Se utiliza la opción Otros de Análisis Transitorio Con Capacitor Serie del PROGRAMA GIADBECSSE mostrado en el Anexo 1.

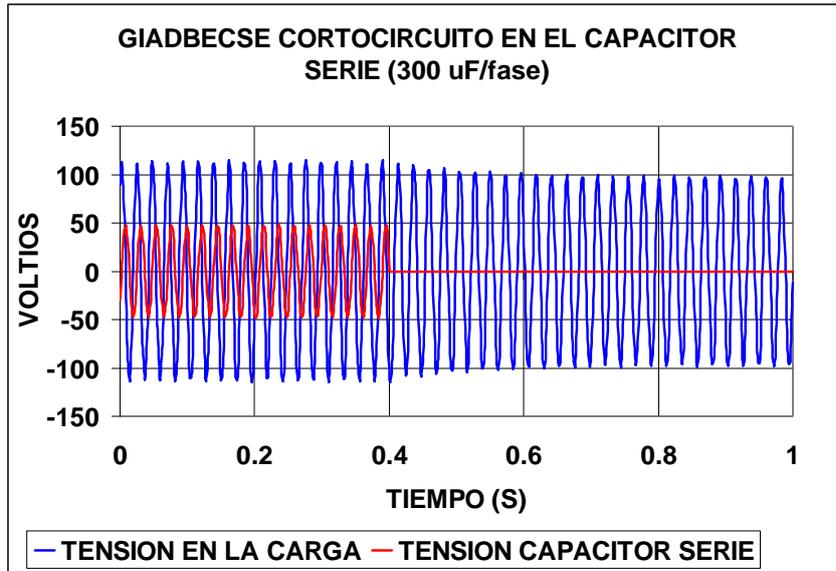
En las Figuras 4.23, 4.24 Y 4.25 se muestra la evolución en el tiempo antes y después de producirse el cortocircuito en los capacitores serie y se aprecia que al perderse la contribución de los capacitores serie el generador se convierte en un GIADBE alimentado una carga resistencia de carga de 50  $\Omega$ . Esta falla no provoca el colapso de la tensión del generador debido a que 50  $\Omega$  es una resistencia de carga mayor al valor crítico con el cual se desexcita cuando no tiene capacitores en serie.



**Figura 4.22** Comportamiento de las tensiones en los bobinados-GIADBECSE-  
Cortocircuito del capacitor serie  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.23** Comportamiento de las corrientes en los bobinados GIADBECSE-  
Cortocircuito del capacitor serie  
Fuente: elaboración propia



**Figura 4.24** Comportamiento de las tensiones en la carga y capacitor- GIADBE- Cortocircuito del capacitor serie  
**Fuente:** elaboración propia

Los resultados indican que si el GIADBE está operando con cargas, que representan resistencias mayores a la resistencia crítica ( $37.5 \Omega$ ) del GIADBE podrá reponerse a los efectos de la pérdida de los capacitores serie, debido a un cortocircuito.

#### 4.10 Conclusiones

Los resultados de las simulaciones muestran el proceso de autoexcitación del generador de inducción con doble bobinado en el estator (GIDBE), que posee un banco de capacitores en el bobinado de excitación, esta impulsado a una determinada velocidad y posee una carga resistiva en el bobinado de excitación. Se demuestra que es posible lograr la autoexcitación del GIDBE con magnitudes de resistencias de carga menores a un valor denominado resistencia crítica, con la cual aun se logra la autoexcitación. Con resistencias de carga menores a la resistencia crítica no es posible la autoexcitación.

Se ha simulado cambios bruscos de carga en el generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator (GIADBE), que está operando inicialmente con una determinada carga. Se demuestra que para cambios de carga que representen resistencias de carga mayores a la resistencia crítica, el GIADBE se repone al evento en tiempos del orden de los 250 ms. Sin embargo, si el cambio de carga significa pasar a una resistencia de carga que resulta menor a la resistencia crítica, el GIADBE se desexcita. Este resultado muestra la existencia de un punto de colapso por tensión que se da a una carga que representa una resistencia menor al valor de resistencia crítica.

Por lo tanto, cuando se produce un cortocircuito trifásico en la carga el GIADBE se desexcita instantáneamente. Aun cuando este comportamiento ante cortocircuitos puede

ser considerado como una ventaja, este tipo de fallas puede provocar la incertidumbre de que la máquina pueda re-excitarse después del evento sin requerir que los capacitores de excitación deban ser cargados previamente. De otro lado, la corriente del bobinado de carga presenta la típica evolución en el tiempo de la corriente de cortocircuito en las máquinas de inducción.

Al añadir capacitores en serie con la carga, los resultados de las simulaciones muestran que se logra la autoexcitación inclusive con resistencias de carga menores al valor crítico. De esta manera se elimina la inflexibilidad del GIADBE que lograba la autoexcitación con resistencias de carga menores a la resistencia crítica.

Asimismo, el generador de inducción autoexcitado, con capacitores en el bobinado de excitación y con capacitores en serie con la carga (GIADBECSE) muestra un apropiado comportamiento ante cambios bruscos de carga, que ponen en evidencia mejora de la capacidad y la habilidad para soportadas eventos de gran envergadura sin perder la estabilidad de tensión.

Los cortocircuitos en la carga muestran que el GIADBECSE no se desexcita, mas bien se sobreexcita ya que por efecto del cortocircuito el generador queda operando en vacío, con el capacitor serie conectado en paralelo con los terminales del bobinado de carga de la máquina. Se aprecia que ahora existe una adecuada corriente que a la falla y que va a operar los dispositivos de protección de sobrecorriente del generador. La corriente en el capacitor serie se incrementa notablemente durante el cortocircuito. Se debe añadir que una vez liberado el cortocircuito el GIADBECSE no va a requerir la carga de los capacitores de excitación para el reinicio de la operación.

También se ha simulado un cortocircuito en el capacitor serie, los resultados indican que si la carga antes de la falla representa una resistencia de carga mayor a resistencia crítica, la falla no provoca el colapso de la tensión del generador. Sin embargo, al perderse el banco de capacitores serie y la carga representa una resistencia de carga menor al valor crítico, el generador colapsará.

Los resultados de las simulaciones y otras que fueran requeridas utilizando el modelo desarrollado en el presente trabajo proveerán la información para realizar la coordinación de las protecciones del GIADBECSE.

## CAPITULO 5

### OPERACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

Las ecuaciones que describen la operación en estado estacionario del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator, que posee capacitores en el bobinado de excitación y capacitores en serie con la carga en el bobinado de carga (GIADBECSE) y que está impulsado a una velocidad constante  $\omega_r$  y que alimenta a una carga resistiva, conectada en el bobinado de carga, han sido obtenidas a partir de las ecuaciones diferenciales y algebraicas desarrolladas en el Capítulo 2 para esta máquina. Estas ecuaciones de estado estacionario resultan ecuaciones algebraicas del tipo no-lineal, para ello se plantea una estrategia de solución utilizando el método de Newton Raphson.

Mediante simulaciones se obtienen las características de operación en estado estacionario de este generador de inducción autoexcitado cuando solo posee capacitores  $C_{sh}$  en el bobinado de excitación (GIADBE).

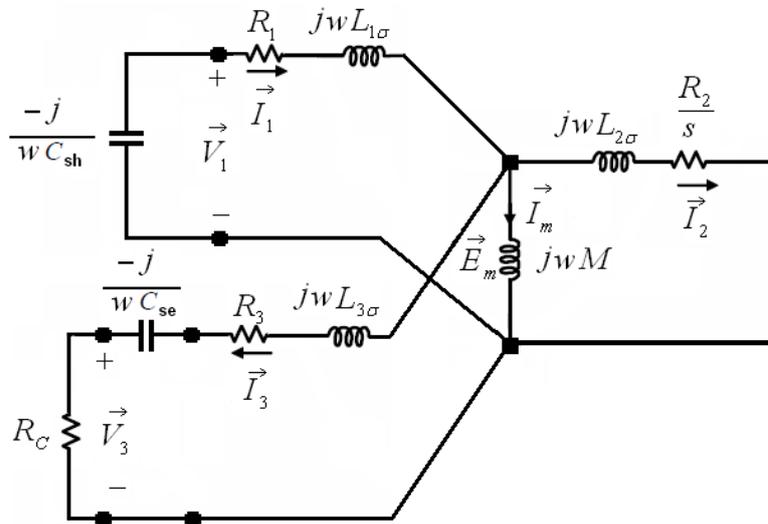
Después se obtiene el efecto sobre las características de operación en estado estacionario de este generador cuando se añaden capacitores en serie con la carga.

#### **5.1 Ecuaciones de estado estacionario del GIADBECSE**

Para obtener las ecuaciones de estado estacionario del GIADBECSE impulsado a una velocidad  $\omega_r$  constante se reemplaza en las ecuaciones diferenciales y algebraicas (2.41), (2.42), (2.43) y (2.44) del Capítulo 2 las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
p &= j\omega \\
s &= \frac{\omega - \omega_r}{\omega} \\
\vec{V}_1 &= (v_{d1}^s + jv_{q1}^s) / \sqrt{2} \\
\vec{V}_3 &= (v_{d3}^s + jv_{q3}^s) / \sqrt{2} \\
\vec{I}_1 &= (i_{d1}^s + ji_{q1}^s) / \sqrt{2} \\
\vec{I}_3 &= (i_{d3}^s + ji_{q3}^s) / \sqrt{2} \\
\vec{I}_2 &= (i_{d2}^s + ji_{q2}^s) / \sqrt{2}
\end{aligned}
\tag{5.1}$$

Interpretando las ecuaciones resultantes se llega al circuito equivalente para la operación en estado estacionario del GIADBECSE obtenido en [31], en el cual aparece el capacitor  $C_{se}$  en serie con la carga (Figura 5.1), que se propone en el presente trabajo como medio de regulación de la tensión en la carga.



**Figura 5.1** Circuito equivalente de estado estacionario del GIADBECSE  
**Fuente:** elaboración propia

Aplicando las Leyes de Kirchoff se obtienen las siguientes ecuaciones eléctricas de estado estacionario del GIADBECSE:

$$\begin{aligned}
(R_1 + j\omega L_{1\sigma} - \frac{j}{\omega C_{sh}}) \vec{I}_1 + \vec{E}_m &= 0 \\
(R_3 + j\omega L_{3\sigma} + R_c - \frac{j}{\omega C_{se}}) \vec{I}_3 - \vec{E}_m &= 0 \\
(\frac{R_2}{s} + j\omega L_{2\sigma}) \vec{I}_2 - \vec{E}_m &= 0
\end{aligned} \tag{5.2}$$

En las ecuaciones (5.2) las corrientes están dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
\vec{I}_1 &= -\frac{\vec{V}_1}{-\frac{j}{\omega C_{sh}}} \\
\vec{I}_3 &= \frac{\vec{V}_3}{R_c} \\
\vec{I}_2 &= \vec{I}_1 - (\vec{I}_3 + \vec{I}_m) \\
\vec{I}_m &= \frac{\vec{E}_m}{j\omega M}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

La fuerza electromotriz  $\vec{E}_m$  de (5.3) y el flujo concatenado magnetizante  $\vec{\psi}_m$  se relacionan mediante:

$$\vec{E}_m = j\omega \vec{\psi}_m / \sqrt{2} \tag{5.4}$$

Al reemplazar las relaciones (5.3) y (5.4) en (5.2) y al separar las partes reales e imaginarias de esta ecuación se obtienen 6 ecuaciones algebraicas. Para la solución de estas ecuaciones es necesario que existan solamente 6 incógnitas, por lo tanto, se ha definido los valores de  $C_{sh}$ ,  $C_{se}$ ,  $R_c$  y  $\omega_r$  y se ha definido 6 variables (incógnitas) en las ecuaciones (5.2) de modo tal que:

$$\begin{aligned}
\vec{V}_1 &= x_1 + jx_2 \\
\vec{V}_3 &= x_3 + jx_4 \\
\vec{\psi}_m / \sqrt{2} &= -jx_5 \\
s &= x_6
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Efectuando las operaciones se obtiene las ecuaciones de estado estacionario del GAADBCSE dadas por (5.6).

$$\begin{aligned}
0 &= wR_1C_{sh}x_2 + w^2L_{1\sigma}C_{sh}x_1 - x_1 + wx_5 \\
0 &= -wR_1C_{sh}x_1 + w^2L_{1\sigma}C_{sh}x_2 - x_2 \\
0 &= R_3x_3/R_c - wL_{3\sigma}x_4/R_c + x_3 + x_4/(wC_{se}R_c) - wx_5 \\
0 &= R_3x_4/R_c + wL_{3\sigma}x_3/R_c + x_4 - x_3/(wC_{se}R_c) \\
0 &= wC_{sh}x_2 - x_3/R_c - \frac{wx_5(R_2/x_6)}{((R_2/x_6)^2 + (wL_{2\sigma})^2)} \\
0 &= -wC_{sh}x_1 + (1/M)x_5 - x_4/R_c + \frac{w^2x_5(L_{2\sigma})}{((R_2/x_6)^2 + (wL_{2\sigma})^2)}
\end{aligned} \tag{5.6}$$

En (5.6) es necesario comentar que  $1/M$  es una función del flujo concatenado, que según la ecuación (3.19) se ha expresado mediante la relación empírica  $\frac{1}{M} = a_0 + a_1\psi_m + a_2\psi_m^2$ . Asimismo, la frecuencia angular  $w$  se expresa en función del deslizamiento  $s$  y de la velocidad del rotor mediante la relación  $w = w_r/(1 - x_6)$ .

Se aprecia que en (5.6) se tendrían 10 posibles incógnitas ( $R_c, w_r, C_{sh}, C_{se}, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  y  $x_6$ ), entonces para definir un punto de operación, como se ha mencionado, bastaría con asignar valores a  $R_c, w_r, C_{sh}$  y  $C_{se}$  quedando el resto de incógnitas definidas al resolver las ecuaciones.

## 5.2 Estrategia de solución de las ecuaciones de estado estacionario del GIADBECSE

La solución de las ecuaciones de estado estacionario del GIADBECSE (5.6) impulsado a una velocidad  $w_r$  constante, con capacitores  $C_{sh}$  conectados en paralelo con el bobinado de excitación, con capacitores  $C_{se}$  en serie con la carga resistiva  $R_c$  conectada en el bobinado de carga, presenta especiales dificultades matemáticas ya que son del tipo no lineal. Esto se debe a que el deslizamiento  $x_6$  esta en el denominador de algunos términos y a la inclusión de la inversa de la inductancia magnetizante ( $1/M$ ) como una función del flujo concatenado magnetizante, que a su vez es función de  $x_5$ .

### 5.2.1 Método numérico de solución

Para resolver las ecuaciones estado estacionario del GIADBECSE dadas por (5.6), estas ecuaciones pueden ser escritas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
F(1) &= wR_1C_{sh}x_2 + w^2L_{1\sigma}C_{sh}x_1 - x_1 + wx_5 \\
F(2) &= -wR_1C_{sh}x_1 + w^2L_{1\sigma}C_{sh}x_2 - x_2 \\
F(3) &= R_3x_3/R_c - wL_{3\sigma}x_4/R_c + x_3 + x_4/(wC_{se}R_c) - wx_5 \\
F(4) &= R_3x_4/R_c + wL_{3\sigma}x_3/R_c + x_4 - x_3/(wC_{se}R_c) \\
F(5) &= wC_{sh}x_2R_2/x_6 - R_2x_3/(x_6R_c) + w^2L_{2\sigma}C_{sh}x_1 + wL_{2\sigma}x_4/R_c - wL_{2\sigma}d_8 - wx_5 \quad (5.7) \\
F(6) &= -wC_{sh}x_1R_2/x_6 - R_2x_4/(x_6R_c) + w^2L_{2\sigma}C_{sh}x_2 - wL_{2\sigma}x_3/R_c + R_2d_8/x_6 \\
\text{donde :} \\
d_8 &= a_0x_5 + a_1x_5^2 + a_2x_5^3 \\
w &= w_r/(1 - x_6)
\end{aligned}$$

Las ecuaciones (5.7) pueden adoptar la siguiente forma matricial:

$$\bar{F}(\bar{X}) = 0 \quad (5.8)$$

Para utilizar el método iterativo de Newton-Raphson como técnica numérica de solución se escoge un vector de condiciones iniciales  $(\bar{X})^{(0)}$  y se aplica la expansión de Taylor alrededor de este vector. Si se deja de lado las derivadas parciales de orden superior, se obtiene:

$$\Delta \bar{X} = -[J^{-1}] \bar{F}(\bar{X}^{(0)}) \quad (5.9)$$

En (5.9), el término  $\Delta \bar{X}$  se denomina vector de incrementos y debe aplicarse al vector de valores iniciales  $\bar{X}^{(0)}$  para obtener otro juego de soluciones con mayor aproximación.

Si este proceso se realiza "k" veces y el vector de soluciones actual es  $\bar{X}^{(k)}$ , se cumplirá que:

$$\bar{X}^{(k+1)} = \bar{X}^{(k)} + \Delta \bar{X} \quad (5.10)$$

El proceso de (5.10) se repetirá hasta que los valores de los incrementos resulten menores a cierta tolerancia ( $10^{-15}$ ).

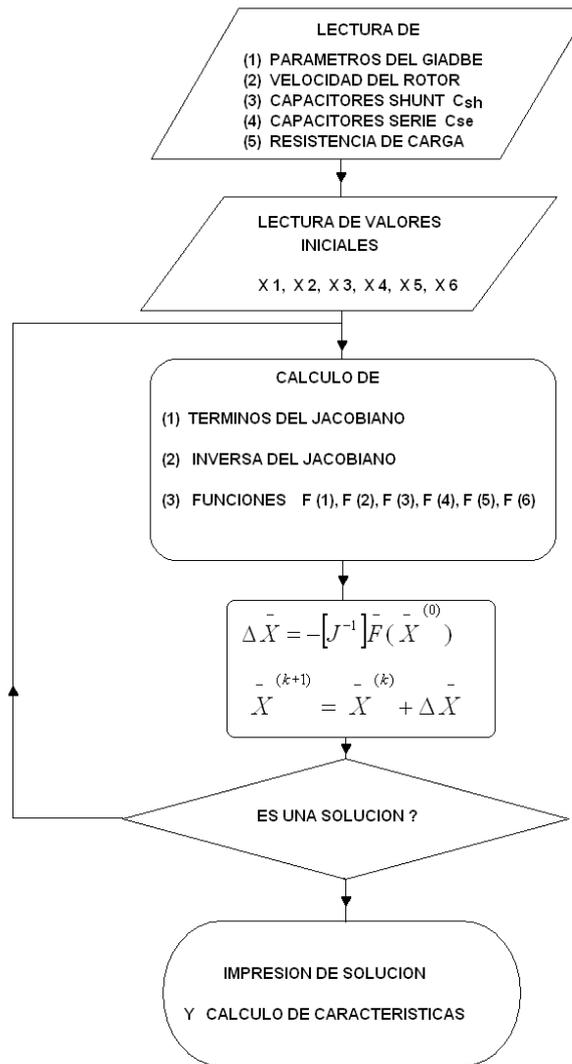
El término  $[J]$  de (5.9) es una matriz de derivadas parciales de primera orden, denominada Jacobiano, que tiene la siguiente forma:

$$A_{ij} = \left[ \frac{\partial \bar{F}_i(\bar{X})}{\partial x_j} \right]_{\bar{X}^{(0)}} \quad (5.11)$$

Aplicando la relación (5.11) a las funciones de (5.7) se obtienen los términos del Jacobiano resumidos en el Anexo 2.

### 5.2.2 Diagrama de flujo para la solución

En la Figura 5.2 se muestra el Diagrama de Flujo para la simulación de la operación En Estado Estacionario, implementada en Matlab en el PROGRAMA GIADBCSE cuya estructura se muestra en el Anexo 1.



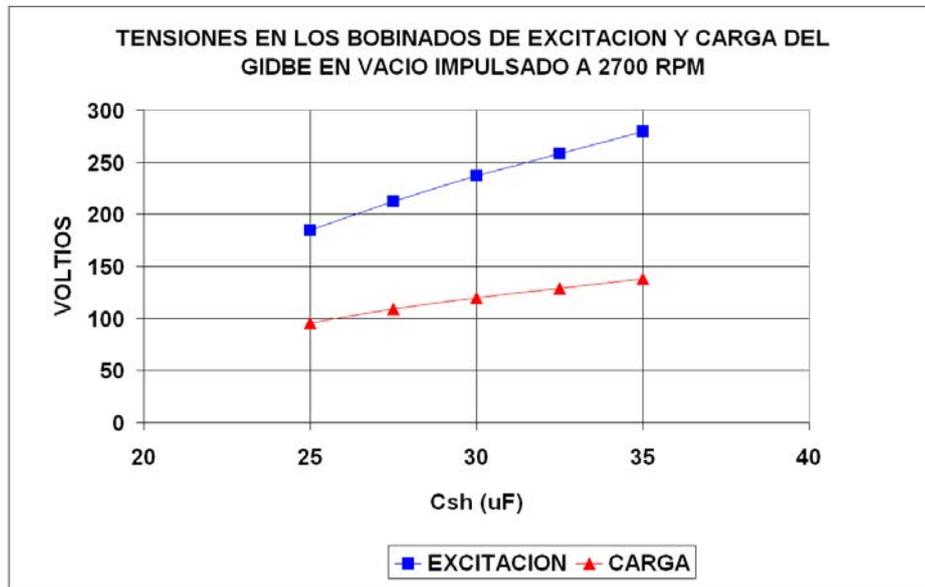
**Figura 5.2** Diagrama de Flujo para la solución de las ecuaciones de estado estacionario  
**Fuente:** elaboración propia

### 5.3 Operación en estado estacionario del GIADBE

#### 5.3.1 Selección del capacitor del bobinado de excitación (Csh) en el GIADBE

Se han realizado simulaciones de la operación en vacío del GIADBE, impulsado a velocidad constante (2700 rpm) con cinco magnitudes de capacitor de excitación  $C_{sh}$ . En

la Figura 5.3 se muestra la variación de la tensión de vacío en el bobinado de excitación  $V_1$  y en el bobinado de carga  $V_3$  en función del valor del capacitor *shunt*.



**Figura 5.3** Efecto del capacitor  $C_{sh}$  sobre la tensión en vacío

**Fuente:** elaboración propia

Se ha seleccionado 30 uF/fase como capacitor  $C_{sh}$ , para producir en vacío valores cercanos a las tensiones nominales de los bobinados de excitación y carga del generador implementado.

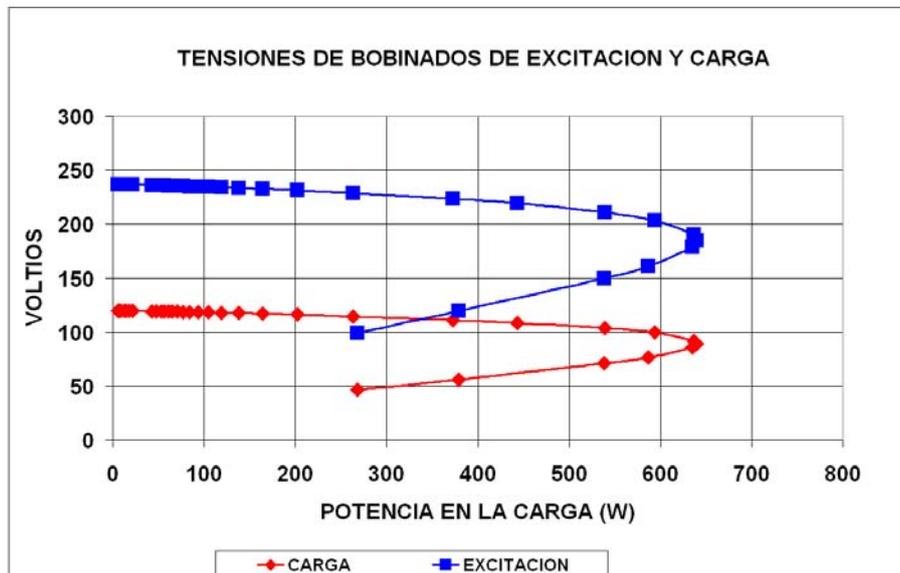
### 5.3.2 Característica externa del GIADBE

Luego de haber seleccionado el banco de capacitores  $C_{sh}$  de 30 uF/fase en el bobinado de excitación, se ha simulado la operación en estado estacionario del GIADBE impulsado a una velocidad constante de 2700 rpm y suministrando potencia a una carga puramente resistiva variable.

En la Figura 5.4 se muestra el comportamiento de las tensiones en los bobinados de excitación y de carga en función de la potencia consumida en la carga (característica externa ó característica P-V), que presentan la forma típica de los generadores autoexcitados, es decir, partiendo de la condición de vacío al incrementarse la carga la tensión disminuye y luego se alcanza una potencia máxima.

Se aprecia que en vacío las tensiones en estos bobinados son 240 y 120 V respectivamente y que al incrementarse en forma paulatina la potencia consumida por la carga, las tensiones disminuyen. La máxima potencia que puede entregar este GIADBE

por el bobinado de carga es 640 W a una tensión en la carga es 90 V, que representa una caída de tensión de 30 V (25 %) respecto de la tensión de vacío.



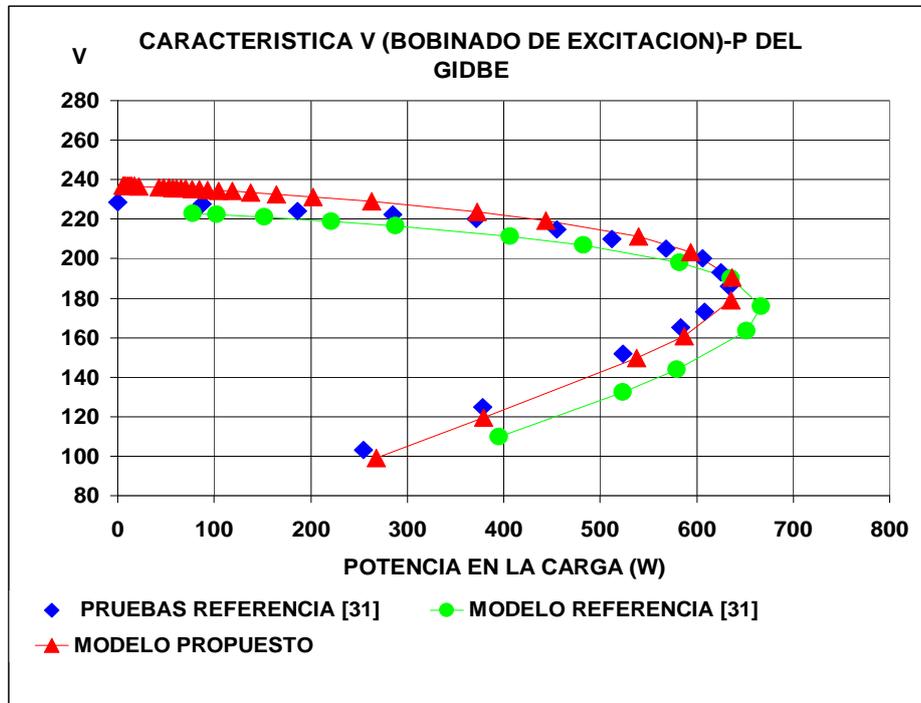
**Figura 5.4** Característica P-V del GIADBE impulsado a 2700 rpm  
**Fuente:** elaboración propia

A continuación se muestra una comparación de los resultados obtenidos mediante las simulaciones utilizando el modelo propuesto en el presente trabajo con los obtenidos en las simulaciones y los correspondientes resultados experimentales de la referencia [31].

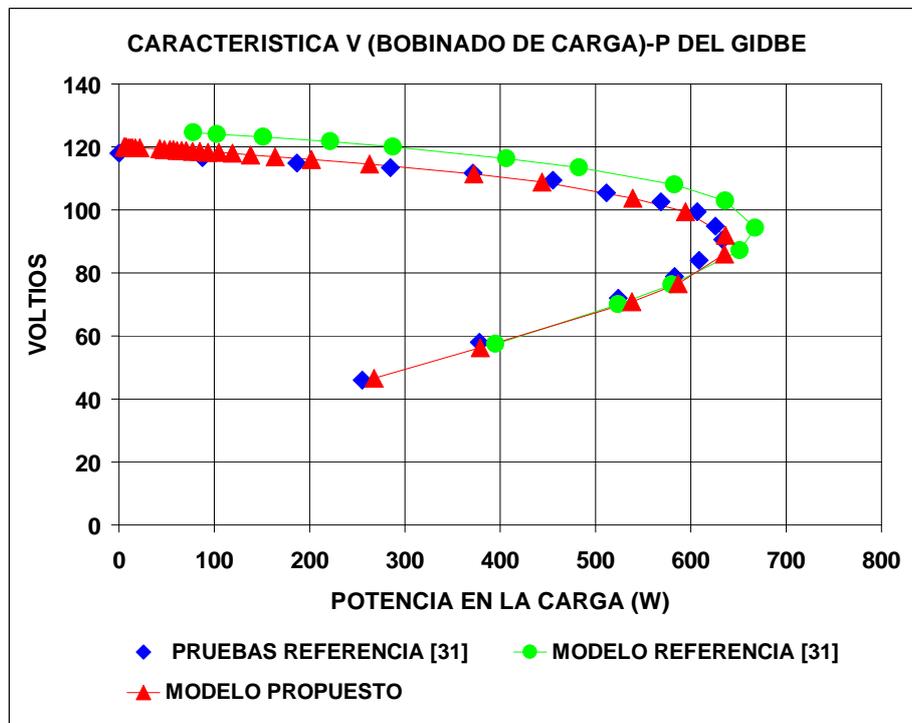
En la Figura 5.5, que muestra el comportamiento de la tensión en el bobinado de excitación en función de la potencia consumida en la carga, se aprecia que los resultados del modelo propuesto en el presente trabajo tienen una mejor aproximación a los resultados experimentales de [31]. La explicación es que en [31] la saturación fue modelada mediante una representación de la inductancia magnetizante  $M$  en función de la corriente magnetizante utilizando tres tramos lineales, mientras que en el presente trabajo se modela la saturación mediante la función  $\frac{1}{M} = a_0 + a_1\psi_m + a_2\psi_m^2$  de la referencia [30], presenta mejor ajuste a los puntos experimentales de la pruebas para determinar la inductancia magnetizante.

En la Figura 5.6 se muestra la curva de cargabilidad del bobinado de carga obtenida mediante simulación comparada con los resultados de pruebas [31]. Se aprecia que la predicción teórica del comportamiento de la tensión de este bobinado en función de la potencia consumida en la carga, utilizando el modelo del presente trabajo muestra una mejor aproximación, reproduciendo los puntos experimentales.

Estos resultados muestran la validez del modelo desarrollado para las predicciones del comportamiento en estado estacionario del GIADBE.



**Figura 5.5** Característica P-V del bobinado de excitación del GIADBE  
**Fuente:** elaboración propia, [31]

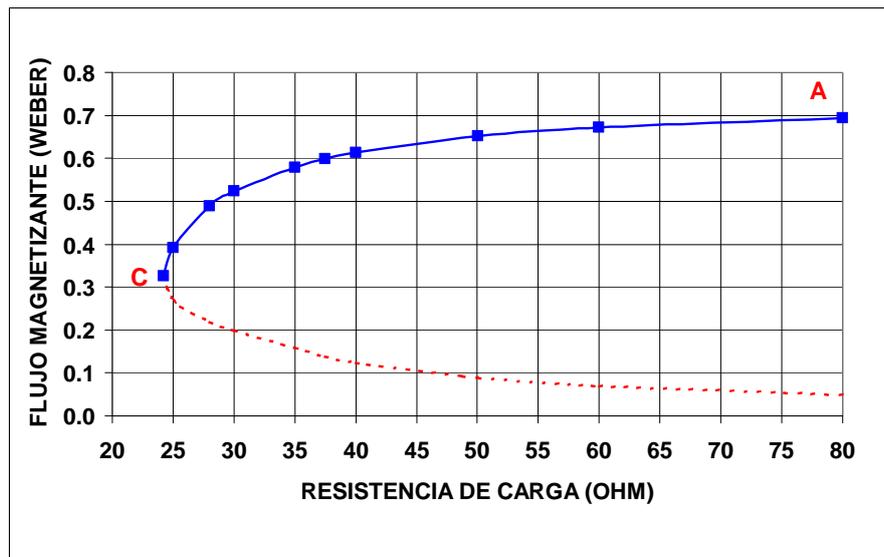


**Figura 5.6** Característica P-V del bobinado de carga del GIADBE  
**Fuente:** elaboración propia, [31]

### 5.3.3 Característica Resistencia-Flujo

En la Figura 5.7 se muestra la característica Flujo Concatenado Magnetizante versus Resistencia del GIADBE operando en estado estacionario, impulsado a una velocidad constante de 2700 rpm, con un banco de capacitores  $C_{sh}$  de 30 uF/fase en el bobinado de excitación y con una carga resistiva variable. Se muestran los puntos de equilibrio en estado estacionario que existen para resistencias de carga mayores al valor en C, para las condiciones de operación indicadas.

En [30], que analiza al generador de inducción convencional, se muestra que más allá del punto C, matemáticamente existen dos posibles puntos de operación por cada valor de resistencia de carga. Uno de ellos con un flujo magnetizante bajo y el otro con un flujo magnetizante alto. En la realidad solamente existen los puntos de operación estacionarios con flujos magnetizantes altos ubicados en la característica CA, ya que pueden ser registrados experimentalmente [31].

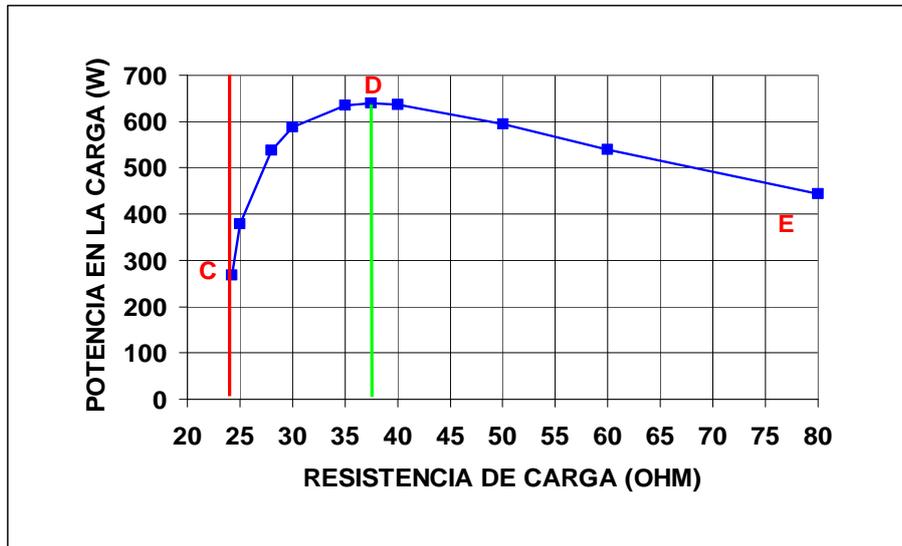


**Figura 5.7** Característica Resistencia-Flujo Magnetizante del GIADBE  
**Fuente:** elaboración propia

### 5.3.4 Característica Resistencia-Potencia

De manera similar en la Figura 5.8 se observa que al disminuir la resistencia de carga a partir de un punto de operación estable (E), la potencia en la carga se incrementa hasta que en el punto D se alcanza la máxima potencia. Más allá de este punto, una disminución de la resistencia de la carga provoca una disminución de la potencia. La condición crítica de operación correspondiente a la máxima potencia representa el límite de operación satisfactoria del generador. Para demandas mayores, el control de potencia

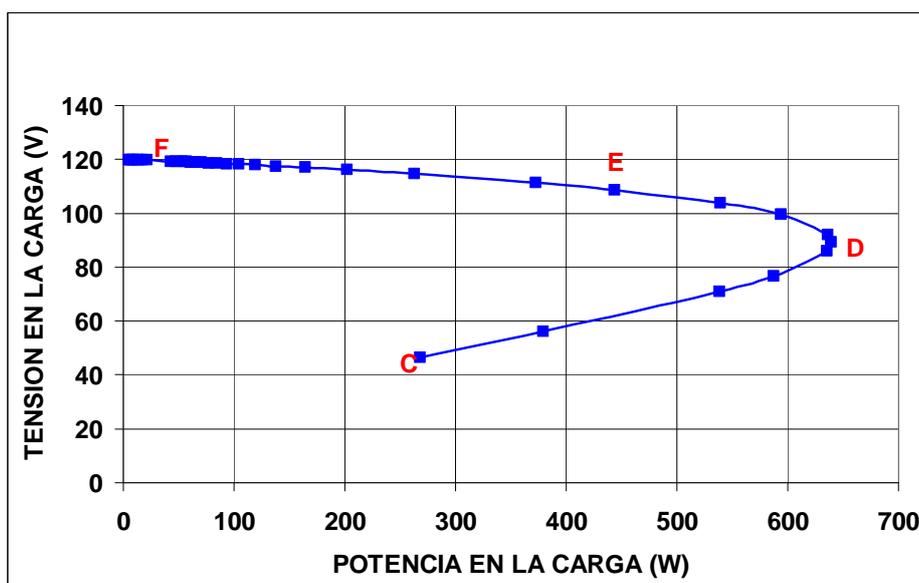
variando la resistencia de carga se hace inestable, es decir una disminución de la resistencia de carga provoca una disminución de la potencia en la carga. Este fenómeno constituye un evento catastrófico, ya que el generador se desexcita y la tensión en terminales del generador disminuye sostenidamente hasta el valor remanente.



**Figura 5.8** Característica Resistencia-Potencia del GIADBE

**Fuente:** elaboración propia

Por lo tanto el valor crítico de resistencia de carga es 37.5 ohm. Este resultado explica porque el GIADBE no pudo autoexcitarse con una carga resistiva representada por una resistencia menor a este valor.



**Figura 5.9** Característica Potencia-tensión del GIADBE

**Fuente:** elaboración propia

La explicación anterior puede hacerse también en la Figura 5.9. Se aprecia que al incrementar la potencia desde la condición de vacío (punto F: 0 W, 120 V) hasta condiciones de mayor carga (punto E: 450 W, 110 V) la tensión disminuye y la potencia solo podrá incrementarse hasta un valor máximo (punto D: 640 W, 90 V). Esta condición crítica de operación que corresponde a la máxima potencia, representa el límite de la operación estable del GIADBE.

Más allá del punto D, la carga tiende a disminuir la potencia del GIADBE, es decir, al reducir la resistencia de la carga a partir del punto de operación F, la tensión disminuye gradualmente pasando por E y llegando hasta el punto D. En el camino de F hacia D, la pendiente de la tensión es negativa y se va incrementando en magnitud, hasta que en el punto D alcanza un valor negativo infinito. Más allá del punto D la pendiente cambia de signo y presenta altos valores. Se puede decir que todos los puntos de operación desde D hasta C son inestables y el generador en esta zona se desexcitará ante cualquier pequeña perturbación.

El punto de máxima potencia D es de gran importancia porque permite dividir la característica P-V en dos partes: la estable, que es la zona superior por encima del punto D y la zona inestable (la parte inferior) o zona de desexcitación.

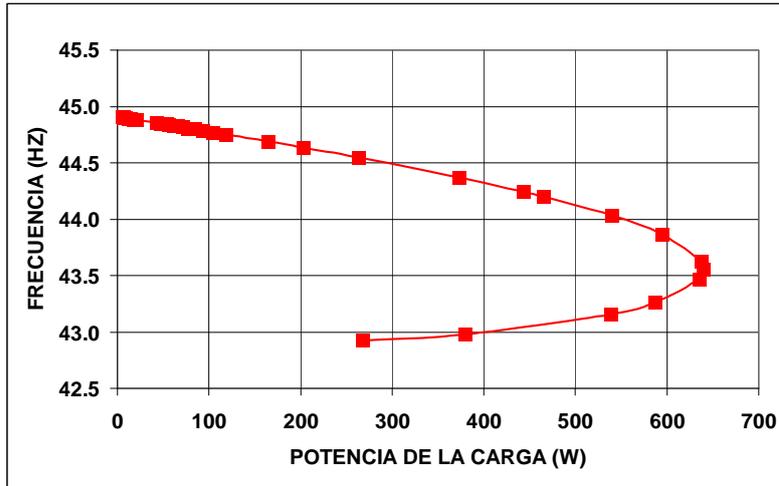
Con respecto a la operación en estado estacionario del GIADBE se puede resumir las siguientes desventajas:

- (1) Presenta una pobre regulación de tensión, en vacío la tensión en la carga es 120 V y a la potencia máxima de 640 W, la tensión es solo 90 V, que representa 0.75 p.u. de la tensión de vacío. Esta inflexibilidad que le impide aprovechar a plenitud la estructura magnética de la máquina y la capacidad de corriente de sus bobinados, es una característica que identifica a los generadores autoexcitados.

Desarrolla una potencia máxima. Si el generador es cargado por encima de este valor se vuelve inestable y se desexcita.

### **5.3.5 Característica Frecuencia -Carga**

El comportamiento de la frecuencia en función de la carga se muestra en la Figura 5.10. Se aprecia que en la condición de vacío, en la cual el deslizamiento es casi cero, la frecuencia es cerca de 45 Hz y que al incrementarse la carga hasta la máxima potencia la frecuencia disminuye hasta 43.5 Hz. Pasado de este nivel máximo de carga y camino a la desexcitación la frecuencia disminuye por debajo de este valor.



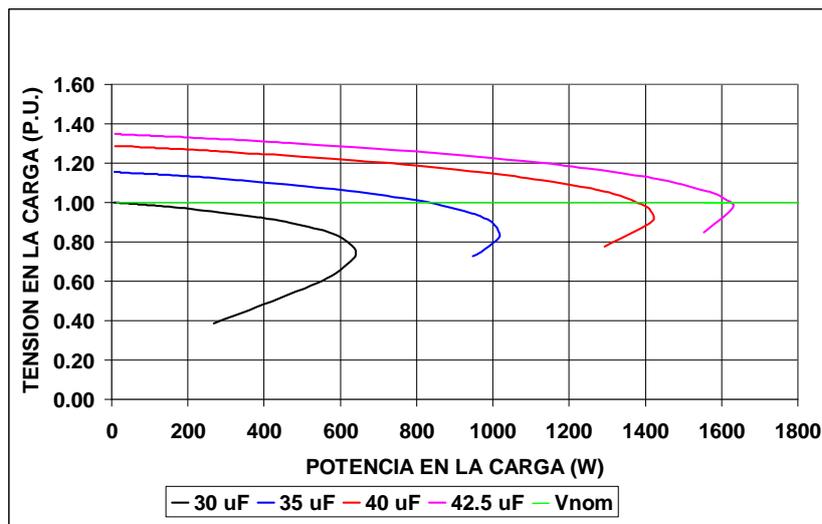
**Figura 5.10** Frecuencia-carga del GIADBE

**Fuente:** elaboración propia

### 5.3.6 Estimación de la potencia nominal del GIADBE impulsado a 2700 rpm

Para estimar una magnitud de potencia nominal del GIADBE impulsado a la velocidad de 2700 rpm, se ha buscado el valor de  $C_{sh}$  conectado en el bobinado de excitación de modo tal que, en el bobinado de carga se tenga la condición de máxima potencia a la tensión de vacío (120 V).

En la Figura 5.11 se muestran las características P-V del bobinado de carga cuando en el bobinado de excitación se ha conectado 30 uF, 35 uF, 40 uF y 42.5 uF. Del análisis de estos resultados se puede asumir que la potencia nominal del GIADBE es 1630 W.



**Figura 5.11** Características P-V del GIADBE impulsado a 2700 rpm con diferentes valores de  $C_{sh}$

**Fuente:** elaboración propia

## 5.4 Operación en estado estacionario del GIADBECSE

Para compensar la caída de tensión en el bobinado de carga y aprovechar la potencia nominal de la máquina de inducción utilizada, se ha conectado un capacitor en serie con cada fase del bobinado de carga. Este capacitor  $C_{se}$  ha sido dimensionado de modo tal que la potencia nominal de 1630 W se entregue a la carga resistiva a la tensión nominal (120 V).

### 5.4.1 Característica externa del GIADBCSE

Para tal fin se ha simulado la operación en estado estacionario del GIADBE impulsado a una velocidad constante de 2700 rpm con el banco de capacitores  $C_{sh}$  de 30 uF/fase en el bobinado de excitación, asimismo, con un capacitor serie  $C_{se}$  en cada fase del bobinado de carga y suministrando potencia a una carga puramente resistiva variable. En la Figura 5.12 se muestra como evoluciona la tensión en la carga en función de la potencia suministrada a la carga resistiva, que esta expresada en p.u. con una potencia base de 1630 W. Asimismo se aprecia que la máxima potencia del GIADBE es 0.40 p.u., mientras que al utilizar un capacitor en serie con la carga se puede obtener potencia mayores que se acercan a la potencia nominal y con la cual se aprovecha plenamente a la máquina de inducción utilizada.

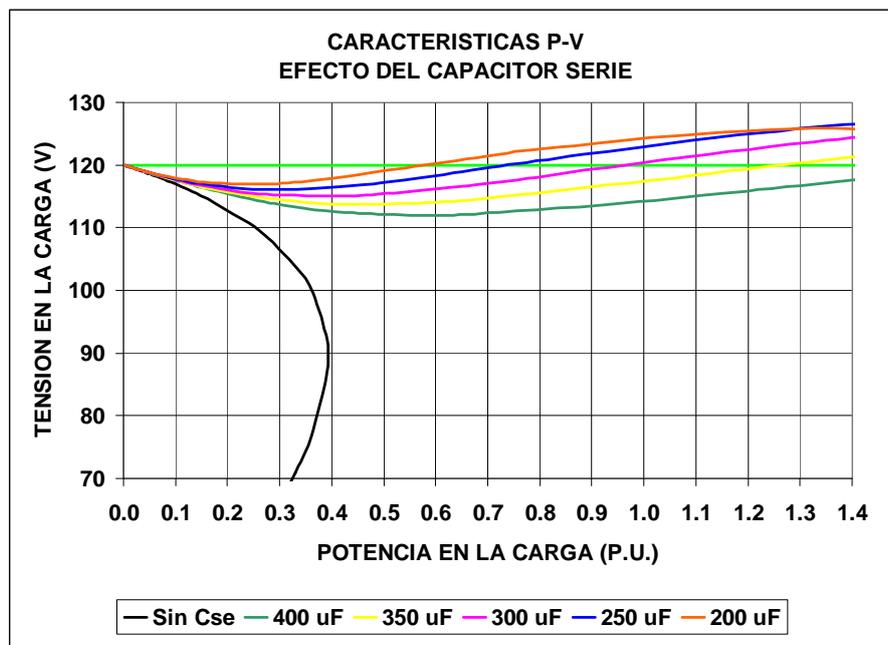


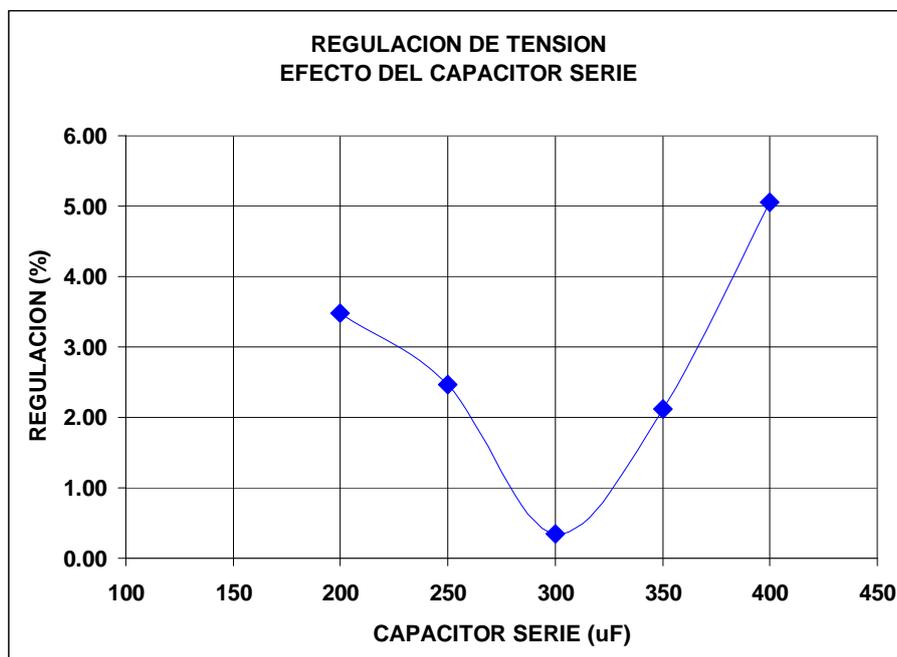
Figura 5.12 Efecto del capacitor serie sobre la característica P-V  
Fuente: elaboración propia

#### 5.4.2 Selección del capacitor serie

Para seleccionar la magnitud de capacitor serie se ha utilizado el concepto de regulación, que ha sido definida como el porcentaje de cambio de la tensión en la carga a medida que el generador entrega potencia desde cero hasta el valor nominal.

La Figura 5.13 muestra como evoluciona la regulación de tensión en la carga, al utilizar un capacitor  $C_{se}$  en serie con cada fase del bobinado de carga igual a los valores de  $C_{se}$  de la Figura 5.12. Se aprecia que si se acepta  $\pm 5\%$  como rango de variación permisible de la tensión en la carga, el rango para seleccionar el valor del capacitor serie es de 200 a 400  $\mu\text{F}$ .

Se considera que resulta pertinente escoger capacitores serie entre 250 y 350  $\mu\text{F}$ , que significa aceptar un rango aproximado de  $\pm 2.5\%$  de variación de la tensión en la carga. Por ello se puede concluir que con un capacitor serie de 300  $\mu\text{F}$  entregará la potencia nominal de 1630 W a la carga a una tensión que sería prácticamente el valor nominal. Se puede decir que el capacitor serie flexibilizará la operación del GIADBE ya que puede permitirle operar cerca de su límite térmico, logrando el máximo aprovechamiento de la máquina.



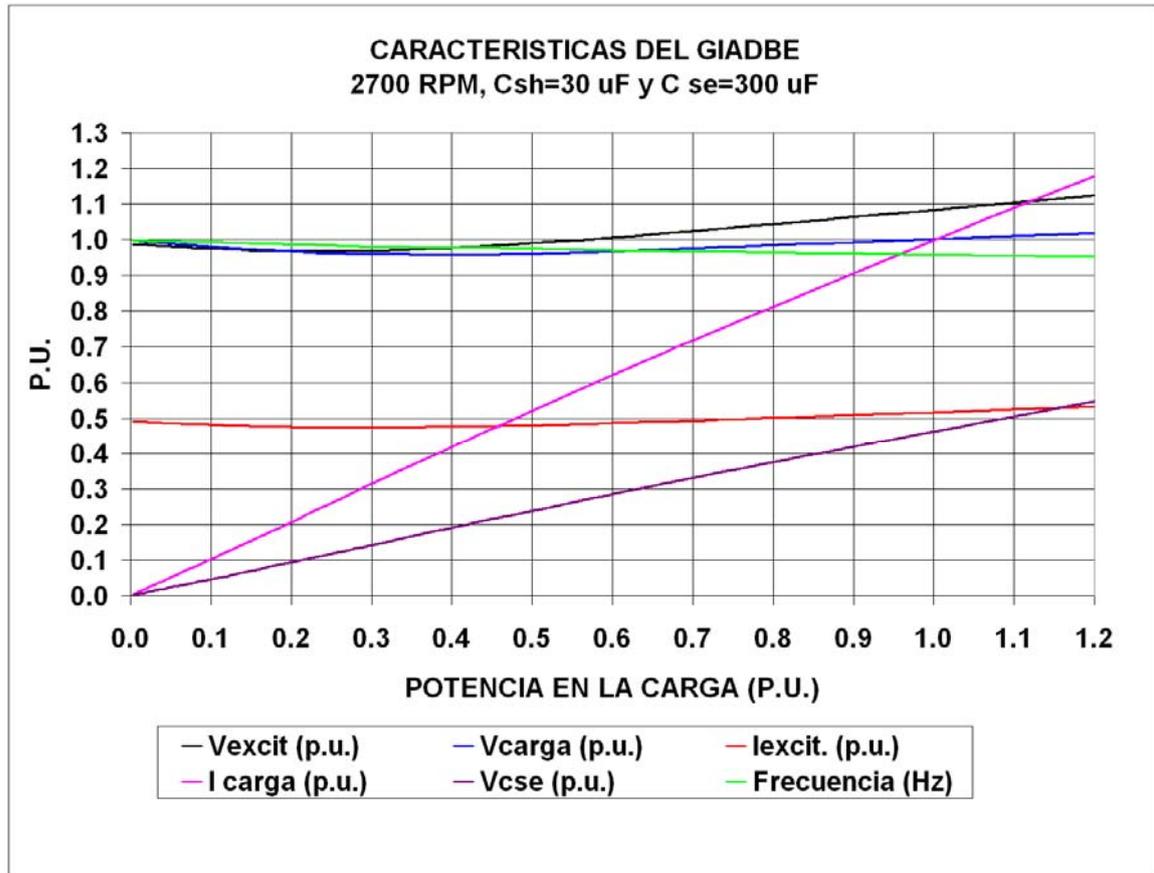
**Figura 5.13** Regulación de tensión en función del capacitor serie  
**Fuente:** elaboración propia

### 5.4.3 Características de operación del GIADBCSE

Se ha calculado el comportamiento en estado estacionario del GIADBE, con el capacitor serie seleccionado de 300 uF en cada fase del bobinado de carga y los resultados han sido resumidos en la Figura 5.14.

Se aprecia que:

- Entre la condición de vacío y la que corresponde a la potencia nominal (1630 W), la tensión en la carga se mantiene en el rango de 0.95 a 1.00 p.u., debido al efecto autoregulante del capacitor serie conectado en los terminales del bobinado de carga.
- La frecuencia generada se mantiene en el rango de 0.95 a 1.00 p.u. respecto de la frecuencia de vacío (45 Hz).
- La tensión en el bobinado de excitación se mantiene en el rango anterior de 0.95 a 1.00 p.u., desde vacío hasta una condición de carga cercana al 60 % de la carga nominal. Para potencias superiores al 60 % esta tensión experimenta un crecimiento, alcanzando una sobretensión de 8 % a la potencia nominal. Se puede decir que esta sobretensión no debe ser considerada como un serio problema, ya que esta dentro de los rangos aceptables para máquinas normales. Asimismo, es necesario remarcar que las máquinas pueden ser diseñadas para soportar en forma continua tales sobretensiones.
- La tensión en el capacitor serie  $V_{Cse}$  muestra un comportamiento casi lineal con la carga; a la potencia nominal resulta alrededor de 0.46 p.u. que representa 55.2 V.
- La corriente de excitación correspondiente al banco de capacitores “shunt”, se mantiene sensiblemente constante, siguiendo el comportamiento de la tensión de excitación. Mientras que la corriente de la carga evoluciona en forma proporcional a la potencia consumida, en virtud a la aproximada constancia de la tensión de la carga.



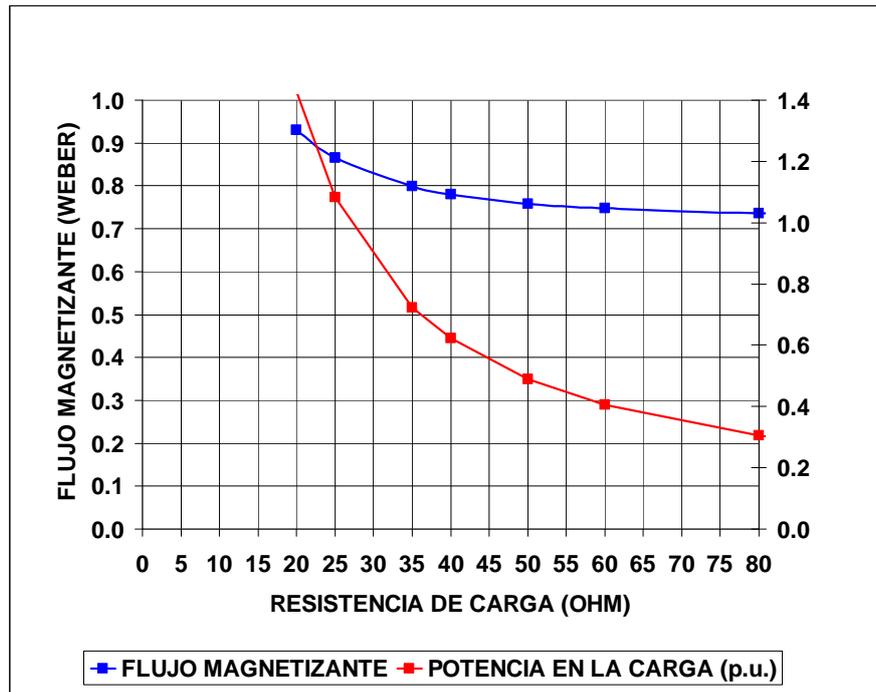
**Figura 5.14** Características de operación de GIDBECSE

**Fuente:** elaboración propia

Los resultados indican que el GIADBECSE presenta bajos valores de regulación de tensión, que lo hacen atractivo cuando es comparado con un generador síncrono, ya que el alternador convencional, además de ser mucho más caro, requiere de un sistema de excitación y regulación de la tensión, que presenta gran complejidad al ser comparado con el esquema de regulación estudiado en el presente trabajo.

#### 5.4.4 Características Resistencia-Potencia y Resistencia-Flujo Magnetizante

Se ha construido estas características y se muestran en la Figura 5.15 se observa que al disminuir la resistencia de carga, el flujo magnetizante aumenta y han desaparecido las restricciones para la autoexcitación con carga y para cada valor de resistencia de carga existe un único valor de flujo magnetizante. Por lo tanto, la zona de inestabilidad ha sido desplazada mas allá de la condición de operación a carga nominal de la maquina.



**Figura 5.15** Característica Resistencia-Potencia del GIADBECSE impulsado a 2700 rpm  
**Fuente:** elaboración propia

## 5.5 Conclusiones

A partir de las ecuaciones diferenciales y algebraicas del generador de inducción autoexcitado con capacitores *shunt* en el bobinado de excitación y capacitores en serie con la carga del bobinado de carga se ha obtenido las ecuaciones para la predicción del comportamiento en estado estacionario del GIADBECSE impulsado a una velocidad constante. Por el carácter no-lineal de las ecuaciones algebraicas obtenidas, se ha planteado una estrategia de solución utilizando el método de Newton-Raphson como técnica numérica de solución.

Los resultados del comportamiento en estado estacionario muestran que cuando este generador de inducción autoexcitado se opera solamente con los capacitores  $C_{sh}$  en el bobinado de excitación presenta las siguientes desventajas:

- Presenta una pobre regulación de tensión, en vacío la tensión en la carga es 120 V y a la potencia máxima de 640 W, la tensión es solo 90 V, que representa 0.75 p.u. de la tensión de vacío.
- Desarrolla una potencia máxima. Si el generador es cargado por encima de este valor se vuelve inestable y se desexcita. Esta inflexibilidad que le impide aprovechar a plenitud la estructura magnética de la máquina y la capacidad de corriente de sus bobinados, es una característica que identifica a los generadores autoexcitados.

Sin embargo, cuando se añaden capacitores en serie con la carga se logra mejorar notablemente la regulación de tensión en la carga. Asimismo, se ha incrementado la capacidad de utilización del generador, la potencia nominal del GIADBECSE es aproximadamente el doble de la potencia máxima que puede entregar a las mismas condiciones de velocidad y capacitor *shunt*. La explicación es que debido a la utilización del capacitor serie el punto de colapso de tensión ha sido trasladado a zonas en las cuales nunca va a operar esta máquina por las limitaciones propias de la capacidad de corriente de sus bobinados.

Por lo tanto, la apropiada selección del capacitor serie permite que el generador de inducción autoexcitado tenga una mínima regulación asimismo, permite que la máquina entregue la potencia necesaria a los niveles de tensión deseados sin exceder sus condiciones magnéticas y térmicas nominales de diseño.

## CONTRIBUCIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE FUTUROS TRABAJOS

### Contribuciones

En la literatura recopilada y revisada no se ha encontrado publicaciones en las que se estudie un generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator (GIADBE). En el presente trabajo se desarrolla el modelo matemático, se estudian los transitorios de mayor interés y se muestra la operación en estado estacionario del GIADBE.

Se muestra que con la incorporación de capacitores en serie con la carga, se elimina las inflexibilidades del GIADBE que posee solamente capacitores de excitación *shunt*, logrando incrementar su capacidad de sobrecarga y por lo tanto se le dota de mayores márgenes de estabilidad para la operación en estado estacionario y para hacer frente a un conjunto de eventos de gran envergadura.

### Conclusiones generales

Se ha logrado los siguientes hitos, que también pueden ser considerados como contribuciones:

- (a) Utilizando un sistema de referencia d-q fijo al estator, se ha desarrollado las ecuaciones del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator, con un capacitor *shunt* en el devanado de excitación y un capacitor en serie con la carga, conectados al bobinado de carga (GIADBECSE) en términos de flujos concatenados. De esta manera la saturación del circuito magnético del generador se representa incorporando la saturación mediante la utilización de un polinomio que describe la variación de la inversa de la inductancia magnetizante ( $1/M$ ) con el flujo concatenado magnetizante de la máquina  $\psi_m$ .
- (b) Para el análisis del proceso de autoexcitación del generador de inducción autoexcitado con doble bobinado en el estator con un capacitor shunt en el devanado de excitación (GIADBE), se ha particularizado el modelo del GIADBECSE. De esta manera se dispone del modelo y se ha analizado la

excitación en vacío del GIADBE con un capacitor shunt, y en otro caso, con un capacitor en serie adicional (GIADBECSE) para la autoexcitación con una carga determinada. Con estos modelos se muestra el proceso transitorio de autoexcitación del generador de inducción con doble bobinado en el estator impulsado a velocidad constante, en vacío, con carga y se han definido las posibles condiciones críticas para la excitación.

- (c) Utilizando el Modelo desarrollado se ha simulado transitorios de interés en el GIADBECSE, tales como cambios bruscos de carga, cortocircuitos en la carga y cortocircuito en el capacitor serie. Mediante estas simulaciones se ha mostrado las ventajas de la incorporación del capacitor en serie con la carga.
- (d) A partir del modelo dinámico del GIADBECSE, se han obtenido las ecuaciones algebraicas para obtener sus características de operación en estado estacionario, impulsado a velocidad constante y alimentando cargas resistivas, mostrando el efecto autorregulador del capacitor serie.
- (e) Se ha logrado establecer conclusiones técnicas sobre el GIADBECSE y mostrar un camino para futuros trabajos en el tema.

### **Conclusiones técnicas**

El GIADBE que posee solamente capacitores de excitación *shunt*, al igual que el GIA convencional, no solamente tiene una pobre regulación de tensión y una inadecuada utilización de su potencia máxima disponible, sino que puede desexcitarse cuando es sobrecargado por encima del punto de colapso de tensión o ante un cortocircuito en la carga. Como consecuencia de estos eventos se desexcita y puede requerir la carga de los capacitores para la re-excitación. Esta inflexibilidad que le impide aprovechar a plenitud la estructura magnética de la máquina y la capacidad de corriente de sus bobinados, es una característica que identifica a los generadores autoexcitados.

Sin embargo, el GIADBECSE que además de los capacitores de excitación shunt, posee capacitores en serie con la carga muestra una buena regulación de la tensión en la carga, ha incrementado notablemente la capacidad de utilización del generador, sin exceder sus condiciones magnéticas y térmicas nominales de diseño. Estas características han mejorado debido a que el capacitor serie compensa parte de la reactancia de dispersión del devanado de carga para cualquier condición de operación.

Asimismo, si se presenta un cortocircuito en la carga, el generador se sobreexcita y presenta una corriente de falla que puede ser detectada por dispositivos de protección de

sobrecorriente. Un cortocircuito en los capacitores serie no desexcita a la máquina si esta operando a condiciones nominales.

Por lo tanto el GIADBECSSE al tener un excelente comportamiento en estado estacionario con una buena respuesta transitoria se convierte en una alternativa simple, de bajo costo y autorregulada para sistemas de generación autónomos.

### **Recomendaciones de futuros trabajos**

Darle mayor formalidad al análisis del problema de la autoexcitación y desexcitación (colapso de tensión) en el GIADBE, mediante la utilización de la teoría de la bifurcación utilizada en el análisis de estabilidad de tensión en los sistemas eléctricos de potencia.

La operación en estado estacionario y los transitorios de interés cuando el GIADBECSSE suministra energía eléctrica a una carga cuyo componente mayor es un motor de inducción. El objetivo sería definir las restricciones de potencia de ambas máquinas y los requerimientos de compensación reactiva adicionales para esta carga R-L dinámica. Asimismo, definir las condiciones de eventuales resonancias subsincronas al alimentar estas cargas dinámicas.

Extender el análisis al caso en que la velocidad esta definida por el viento (central eólica) e incorporar el modelo del sistema de rectificación alimentando un banco de baterías con una determinada carga resistiva flotante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. J. Nagrath and D.P. Kothari, *Electrical Machines*, New York, Tata Mc Graw-Hill, 1997.
- [2] Kostenko Piotrosky, "Máquinas Eléctricas, Tomo II, Editorial MIR
- [3] P.K.S. Khan and J.K.Chatterjee, "Three-phase induction generators: A discussion on performance", *Elect. Mach. Power Sist.*, vol 27, pp. 813-832, Nov. 1976.
- [4] R.C. Bansal, T.S. Batí, and D.P. Kothari, "Some aspects of grid connected wind electric energy conversion systems", *Interdisciplinary J. Inst. Eng. (India)*, vol 82, pp. 25-28, may 2001.
- [5] R.C. Bansal, T.S. Batí, and D.P. Kothari, "Some aspects of grid connected wind electric energy conversion systems", in *Proc. 24<sup>th</sup> Nat. Renewable Energy Conversion*, Bombay, India, Nov-Dec. 30-2, 2000, pp. 410-414.
- [6] R.C. Banzal, "Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 80, No 2, June 2005.
- [7] CIRCE-SISENER INGENIEROS S.L., "Sistemas de Conversión-Aerogeneradores Actuales".
- [8] R. Leidhold, G. Bossi, C. De Angelo, D. Forchetti, G. Garcia, "Generador de Inducción autoexcitado con capacitores paralelo – serie, *Anales de la VII RPIC*, San Juan Argentina, 1997.
- [9] Wagner, C. (1937). *Self-Excitation of Induction Motors AIEE Trans.*, Vol. 58, pp 47-51., 1937.
- [10] Simões G., Bose B., Spiegel R. *Design and Performance Evaluation of a Fuzzy-Logic-Based Variable Speed Wind Generation System IEEE Trans. on Ind Appl.* Vol. 33 No. 4 Jul./Aug., 1997.
- [11] R. Galindo del Valle, M. Cotorogea P. and D. Biel Solé, "Dos familias de controladores en modo de deslizamiento para un generador de inducción doblemente alimentado en un sistema aislado", *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 5, NO. 2, MAY 2007.

- [12] R.C. Bansal, T. S. Bhatti and D.P. Kothari, "A bibliographical survey on induction generators for application of nonconventional energy systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No 3, Sep. 2003
- [13] Guerra, J., Ramírez, R., Castro, J. y Alvarez, C., "Operación de una Central Eólica con Generador Asíncrono de 600 kW en la localidad de Malabrigo, Trujillo", Ministerio de Energía y Minas, 1994.
- [14] Bassett, E. y Potter, F., "Capacitive Excitation for Induction Generators", AIEE Trans-PAS Vol. 54, pp 540-545, 1935.
- [15] Doxey, B., "Theory and application of the capacitor-excited induction generator", The Engineer, Vol. 216, pp 893-897, 1963.
- [16] Milner, I. and Watson, D., "An autonomous wind energy converter using a self-excited induction generator for heating purposes", Wind Engineering, Vol. 6, No 1, pp 19-23, 1982.
- [17] Raina, G. and Malik, O.P., "Wind energy conversion using a self excited induction generator", IEEE Trans. Vol. PAS-102, No 12, pp 3933-3936, 1983.
- [18] Tandon, A.K., Murthy S.S. and Berg G.J., "Steady state analysis of capacitor self-excited induction generators", IEEE Tran., Vol. PAS-103, No 3, pp 612-618, 1984.
- [19] Malik, N.H. and Hague, S.E., "Steady state analysis and performance of an isolated sel-excited induction generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. EC-1, No 3, pp 134-139, September 1986.
- [20] Malik, N., "Capacitance Requirements for Isolated Self Excited Induction Generators", IEEE Transactions on Energy conversion, Vol. EC-2, No 1, March 1987.
- [21] Murthy, S.S., Singh, B.P., Nagamani, C. and Satyanarayama, K.V.V., "Studies on the use of conventional induction motor as self-excited induction generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 3, No 4, pp 842-848, Dec. 1988.
- [22] Novotny, D.W., Gritter D.J. and Studtmann,G.H., "Self excitation in inverter driven induction machine", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, No 4, pp 1117-1125, July-August, 1977.
- [23] Breenen, M.B. and Abbondati, A., "Static exciter for induction generators", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol IA-13, No 5, pp 133-139, September, 1977.
- [24] Chan, T.F., "Steady state analysis of self-excited induction generators", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 9, No 2, pp 288-296, June, 1994.

- [25] Shridhar, L., Singh, B., Jha, C.S., Murthy, S.S. and Singh, B.P., "Selection of capacitors for the self regulated short "shunt" self excited induction generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 10, No 1, pp 10-17, March , 1995.
- [26] Hallenius, P., Vas, P. and Grown, J.E., "The analysis of a saturated self excited asynchronous generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 6, No 2, pp 336-345, June, 1991.
- [27] Brown, J.E., Kovacs, K.P. and Vas, P., "A method of including the effects of main flux saturation in the generalized equations of a.c. machines", IEEE Trans. on PAS, 1983, 102, pp. 96-103.
- [28] Vas, P., Hallenius, P., and Grown, J.E., "Cross-saturation in smooth air gap electrical machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 6, No 2, pp 336-345, June, 1991.
- [29] Shridhar, L., Singh, B. and Jha, C.S., "Transient Performance of the self regulated short "shunt" self excited induction generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 10, No 2, pp 261-267, June, 1995.
- [30] Ojo, O., "Dynamics and System Bifurcation in autonomous Induction Generators", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol 31, No 4, pp918-924, July/August, 1995.
- [31] Ramírez, R., "Modelo matemático de un generador asíncrono autoexcitado con doble bobinado en el estator", Tesis de Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1981.
- [32] Proyecto de Investigación, "Desarrollo de Generadores Asíncronos para Plantas de Generación Eólica", Delcrosa S.A.- ITINTEC, 1981.
- [33] Krause, P., Wasynczuk, O. and Sudhoff, S., "Analysis of Electric Machinery", IEEE PRESS, 1995.
- [34] P.C. Krause and C.H. Thomas, "Simulation of Symmetrical Induction Machinery", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol 84, November 1965.
- [35] N.N. Hancock, "Matrix Analysis of Electrical Machinery, 2<sup>nd</sup> Edition, Pergamon Press, 1988.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### PROGRAMA GIADBECSE

#### I. Partes

##### I.1 En estado estacionario

Para analizar la operación en estado estacionario del Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el Estator, impulsado a una velocidad constante, en las siguientes opciones:

- I.1.1 Autoexcitado con capacitores *shunt* en el bobinado de excitación y con una carga resistiva conectada en el bobinado de carga.
- I.1.2 Autoexcitado con capacitores *shunt* en el bobinado de excitación, con una carga resistiva conectada en el bobinado de carga y con capacitores serie conectados con la carga.

##### I.2 Transitorio

Considera las siguientes opciones:

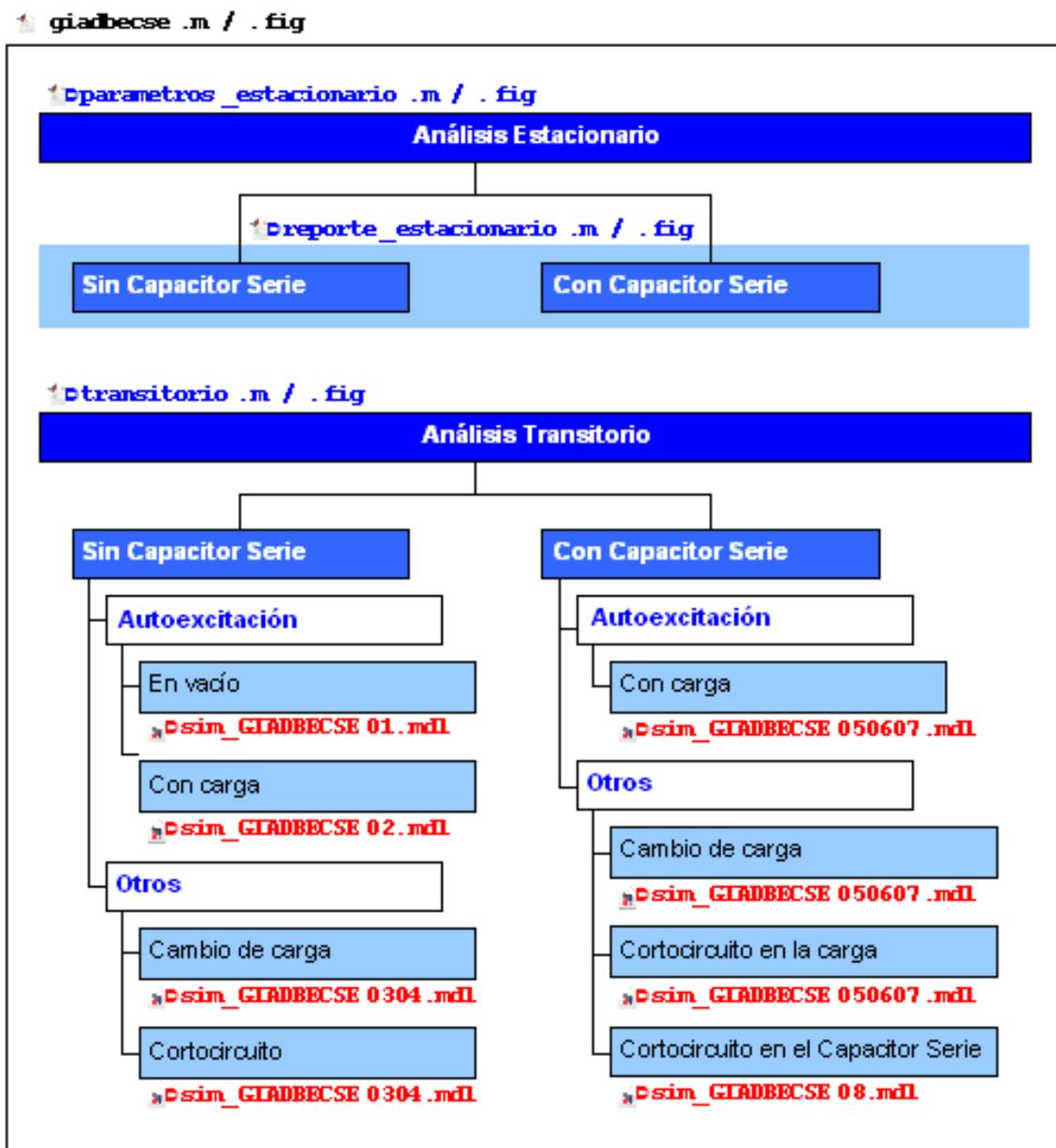
- I.2.1 Del Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el Estator, autoexcitado con capacitores *shunt* en el bobinado de excitación (GIADBE). Que muestra los casos:
  - a. Autoexcitación del GIADBE, en vacío y con carga.
  - b. Otros transitorios, tales como cambios de carga y cortocircuito en la carga.
- I.2.2 Del Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el Estator, autoexcitado con capacitores *shunt* en el bobinado de excitación y autorregulado con capacitores en serie con la carga (DGIADBECSE).  
Que muestra los siguientes:
  - a. Autoexcitación del GIADBECSE con carga.
  - b. Otros transitorios del GIADBECSE, tales como cambios de carga, cortocircuito en la carga y cortocircuito en el capacitor serie.

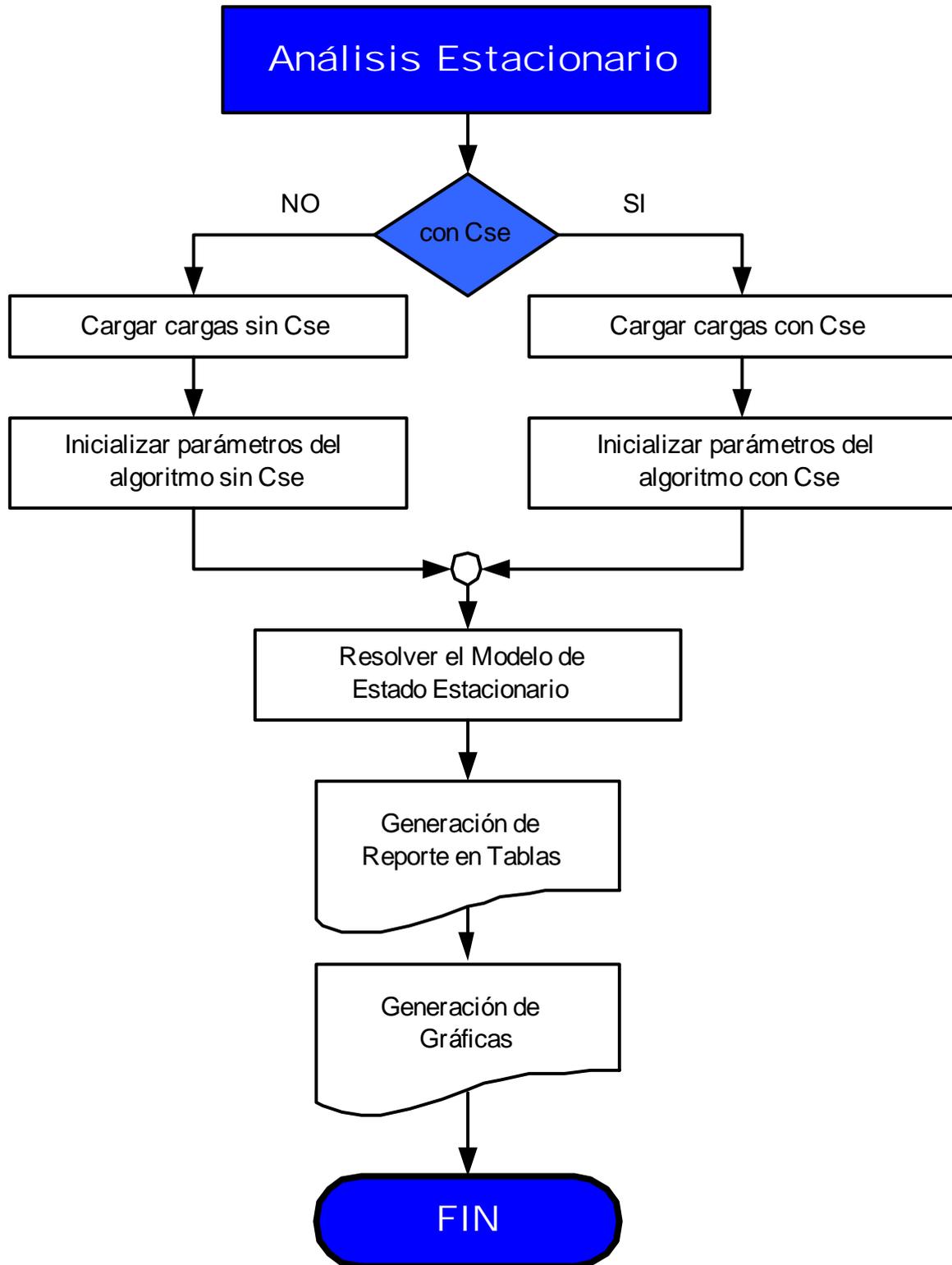
## II. Estructura

El programa GIADBECSE ha sido desarrollado utilizando interfaces gráficas MATLAB a través de la herramienta GUIDE (archivos de extensión.fig). La estructura del programa (archivos que la componen) es la que se muestra a continuación.

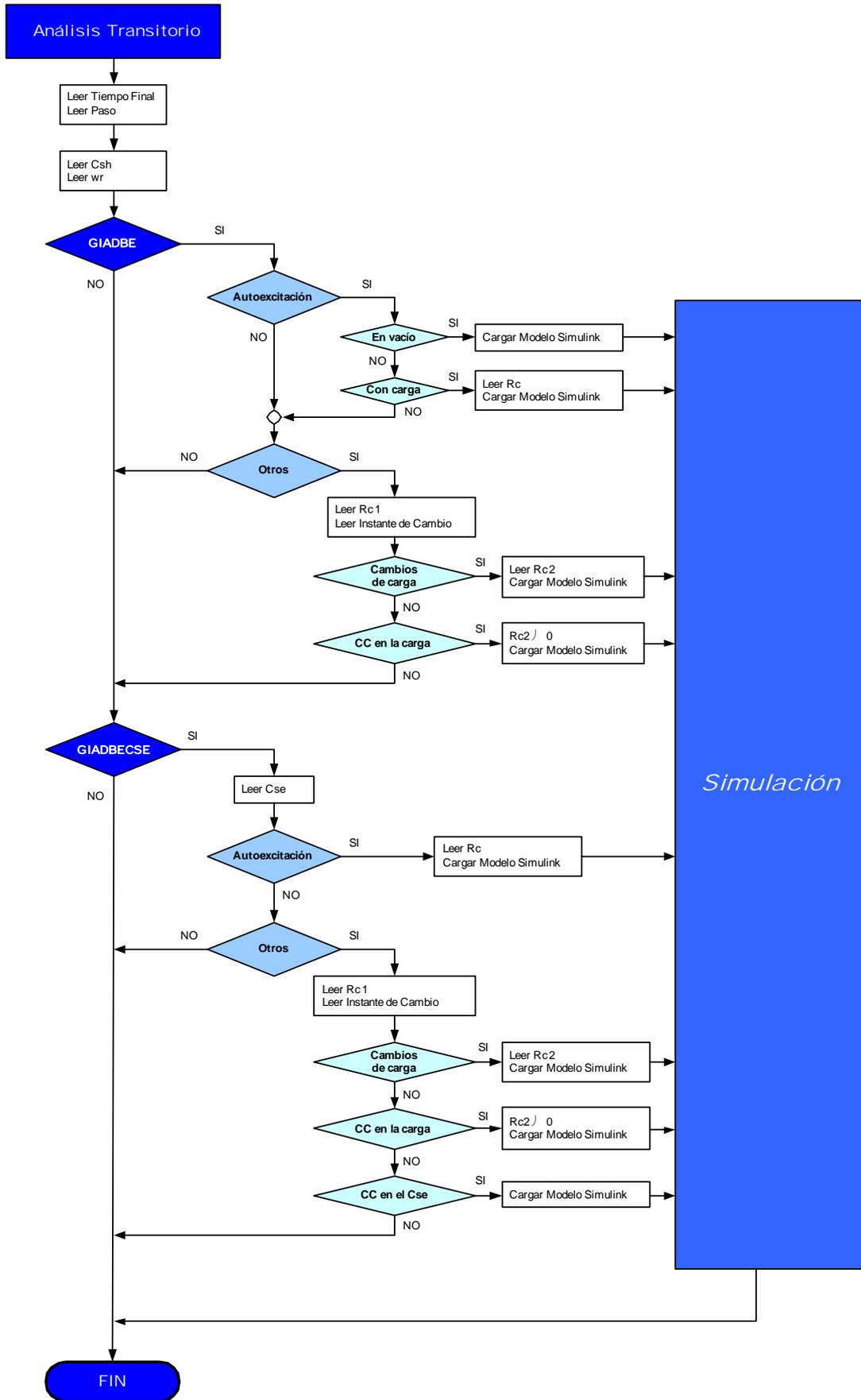
El paradigma de programación utilizado ha sido el estructurado y orientado por eventos.

El algoritmo para el Análisis Estacionario fue implementado en el lenguaje de programación MATLAB (archivos de extensión.m) y en el diagrama siguiente se muestra su estructura general.





Las ecuaciones diferenciales de los modelos dinámicos propuestos para el Análisis Transitorio, están implementadas en Simulink (archivos de extensión.mdl) los cuales son ejecutados internamente por la aplicación. En el diagrama siguiente se muestra la estructura general de la opción Análisis Transitorio.



## ANEXO 2

### TERMINOS DEL JACOBIANO

#### Cálculos previos

$$w = (p / 2) * w_m / (1 - x_6); wx = w / (1 - x_6); d_2 = (a_0 + 2 * a_1 * x_5 + 3 * a_2 * x_5^2); d_3 = (a_0 + a_1 * x_5 + a_2 * x_5^2); d_4 = r_2 / x_6^2 * (x_4 / rc + w * csh * x_1); d_5 = wx * (2 * l_2 * csh * x_2 * w - l_2 * x_3 / rc); d_6 = -wx * r_2 * csh * x_1 / x_6; d_7 = -r_2 * (x_5 * d_3) / x_6^2; d_8 = d_3 * x_5$$

#### Términos del Jacobiano

$$a(1, 1) = -1 + w^2 * l_1 * csh; a(1, 2) = w * r_1 * csh; a(1, 3) = 0; a(1, 4) = 0; a(1, 5) = w; a(1, 6) = wx * (x_5 + 2 * x_1 * w * l_1 * csh + r_1 * csh * x_2)$$

$$a(2, 1) = -w * r_1 * csh; a(2, 2) = -1 + w^2 * l_1 * csh; a(2, 3) = 0; a(2, 4) = 0; a(2, 5) = 0; a(2, 6) = wx * (2 * x_2 * w * l_1 * csh - r_1 * csh * x_1)$$

$$a(3, 1) = 0; a(3, 2) = 0; a(3, 3) = r_3 / rc + 1; a(3, 4) = -w * l_3 / rc + 1 / (w * rc * cse); a(3, 5) = -w; a(3, 6) = -wx * (x_5 + l_3 * x_4 / rc) - x_4 / (rc * cse * p / 2 * w_m)$$

$$a(4, 1) = 0; a(4, 2) = 0; a(4, 3) = w * l_3 / rc - 1 / (w * rc * cse); a(4, 4) = 1 + r_3 / rc; a(4, 5) = 0; a(4, 6) = wx * l_3 * x_3 / rc + x_3 / (rc * cse * p / 2 * w_m)$$

$$a(5, 1) = w^2 * l_2 * csh; a(5, 2) = r_2 * w * csh / x_6; a(5, 3) = -r_2 / (x_6 * rc); a(5, 4) = w * l_2 / rc; a(5, 5) = -w * l_2 * d_2 - w; a(5, 6) = r_2 * csh * x_2 * wx / x_6 + r_2 * (x_3 / rc - w * csh * x_2) / x_6^2 + wx * (2 * l_2 * csh * x_1 * w + l_2 * x_4 / rc - x_5 - l_2 * x_5 * d_3)$$

$$a(6, 1) = -w * r_2 * csh / x_6; a(6, 2) = w^2 * l_2 * csh; a(6, 3) = -w * l_2 / rc; a(6, 4) = -r_2 / (x_6 * rc); a(6, 5) = r_2 * d_2 / x_6; a(6, 6) = d_4 + d_5 + d_6 + d_7$$