

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA GENERALIZADA MODELO CG3824 FABRICADA POR LA ASSOCIATED ELECTRICAL INDUSTRIES Ltd (A.E.I.)

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Delgado B., Héctor J.
para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2016

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA GENERALIZADA MODELO CG3824 FABRICADA POR LA ASSOCIATED ELECTRICAL INDUSTRIES Ltd (A.E.I.)

Tutor Académico: Prof. Julián Pérez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por el
Br. Delgado B., Héctor J.
para optar al Título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2016


CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 15 de junio de 2016

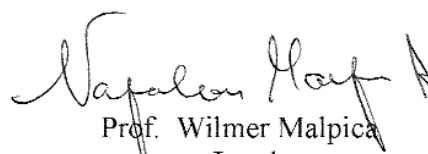
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Héctor J. Delgado B., titulado:

**“CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA GENERALIZADA
MODELO CG3824 FABRICADA POR LA ASSOCIATED ELECTRICAL
INDUSTRIES Ltd (A.E.I.)”**

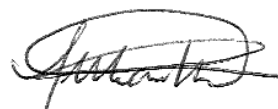
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Alexander Cepeda
Jurado



Prof. Wilmer Malpica
Jurado



Prof. Julián Pérez
Prof. Guía

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de estar en este mundo y la bendición para afrontar pruebas difíciles, además de ser el creador de todo lo que me rodea y quiero en esta vida.

A mi madre, por ser la mujer que me trajo al mundo y mi guía en todo momento, quien con sus llamados de atención a tiempo y sus valores inculcados hoy me hacen ser quien soy.

A mi padre, el hombre que me ha guiado por el camino del bien, y cuyas palabras de optimismo en todo momento me han permitido lograr las metas que hasta ahora me he propuesto.

A mis hermanos, a los cuales en mi posición de hermano mayor, he tratado de inculcarles un buen ejemplo y ser un guía en el largo trecho que les queda por vivir.

A mis familiares, quienes han inculcado en mí, valores de constancia y responsabilidad con al menos una palabra o consejo.

AGRADECIMIENTO

A mi Alma Mater, la Universidad Central de Venezuela, por inculcarme en sus aulas no solo los conocimientos teóricos y prácticos para afrontar y solucionar los problemas de las personas y comunidades, sino también los valores y herramientas humanas para ser mejor persona, para ser un profesional de la ingeniería integral que aplicará su intelecto y su conocimiento en pro de la humanidad.

A mis familiares y amistades que me han apoyado en todo momento de todas las maneras, incluyendo aquellos que con tan sólo una palabra o consejo han inspirado en mí el deseo de mejorar día a día y ser mejor persona, de prepararme y lograr mis metas propuestas.

A mi tutor, Profesor Julian Pérez, quien con su gran experiencia y nivel académico me ha permitido llevar a cabo mi trabajo y adquirir conocimientos de suma importancia para mi desempeño como profesional de la ingeniería.

RESUMEN

Delgado B., Héctor J.

**CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA GENERALIZADA
MODELO CG3824 FABRICADA POR LA ASSOCIATED ELECTRICAL
INDUSTRIES Ltd (A.E.I.)**

**Tutor Académico: Julian Pérez. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia.
Institución: U.C.V. 2016. 135 h. + anexos.**

Palabras Claves: Máquinas eléctricas; Máquina eléctrica generalizada; Máquina asincrónica; Máquina sincrónica; Máquina de corriente continua.

Resumen. Se plantea la caracterización de la máquina eléctrica generaliza modelo CG3824 fabricada por la Associated Electrical Industries Ltd (A.E.I.) que se encuentra en el Laboratorio de Máquinas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica “Melchor Centeno Vallenilla” de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (UCV), configurando la misma como máquina asincrónica trifásica, máquina sincrónica trifásica y máquina de corriente continua con excitación independiente aplicando las normativas IEEE e IEC según sea el caso de forma tal de obtener los parámetros de los circuitos equivalentes que son deducidos mediante el uso del método de cambio de coordenadas que permite simplificar los métodos numéricos e idealizar cualquier máquina en dos ejes ortogonales colocados en el rotor y en el estator por los cuales circularán corrientes que producen los campos magnéticos necesarios para el funcionamiento de la máquina.

ÍNDICE GENERAL

	pág.
• CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	iii
• DEDICATORIA.....	iv
• AGRADECIMIENTO.....	v
• RESUMEN.....	vi
• ÍNDICE GENERAL	vii
• LISTA DE FIGURAS.....	x
• LISTA DE TABLAS	xii
• LISTA DE GRÁFICAS	xiii
• INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
• PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
• OBJETIVO GENERAL.....	3
• OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
• ALCANCES.....	4
• LIMITACIONES.....	4
• METODOLOGÍA.....	5
CAPÍTULO II. Marco Teórico	7
2.1. Principio de funcionamiento de una máquina generalizada.....	7
2.2. Principio de funcionamiento y descripción de la máquina generalizada modelo CG3824 fabricada por la Associated Electrical Industries Ltd (A.E.I.).....	31
CAPÍTULO III. Determinación de los modelos analíticos de la máquina generalizada	40
3.1. Modelo de la máquina asincrónica generalizada.....	40
3.2. Modelo de la máquina sincrónica	51
3.3. Modelo de la máquina DC	55
CAPÍTULO IV. Caracterización de la Máquina Generalizada Modelo CG3824 Fabricada por la Associated Electrical Industries Ltd (A.E.I.)	58
4.1. Medición de resistencia de los diferentes devanados de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824.....	58
4.1.1. Descripción de la prueba de medición de resistencias según norma IEEE 118-1978 / IEC 60034-4 1995.....	58
4.1.1.1. Método de Voltímetro-Amperímetro.....	59

4.1.1.2. Efectos ambientales en la medición de resistencia.....	63
4.1.1.3. Efectos de autocalentamiento en la medición de resistencia.....	64
4.1.2. Medición de la resistencia del estator.....	64
4.1.3. Medición de la resistencia del rotor en estrella.....	66
4.1.4. Medición de la resistencia del rotor entre N1-N2.....	69
4.2. Caracterización de la máquina eléctrica generalizada modelos CG3824 como máquina asincrónica trifásica.....	71
4.2.1. Medición de resistencia de los devanados del rotor de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica.....	74
4.2.2. Prueba en vacío de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica.....	74
4.2.2.1. Descripción de la prueba de vacío para máquina asincrónica según norma IEEE-112 / IEC34-2	74
4.2.2.2. Medición de la curva de vacío para la máquina asincrónica.....	76
4.2.2.3. Determinación de las pérdidas mecánicas de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica mediante la prueba de vacío.....	77
4.2.3. Prueba de rotor trabado de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica.....	79
4.2.3.1. Descripción de la prueba de rotor trabado y con carga para la máquina asincrónica según norma IEEE 112.....	79
4.2.3.2. Resultados de la prueba de rotor trabado para la máquina asincrónica.....	82
4.2.3.3. Resultados de la prueba con carga para la máquina asincrónica.....	83
4.2.4. Determinación de los parámetros de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica.....	84
4.2.4.1. Descripción y aplicación de los métodos iterativos para la determinación de los parámetros de la máquina asincrónica.....	84
4.2.5. Modelo circuital de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina asincrónica trifásica.....	93
4.3. Caracterización de la máquina eléctrica generalizada modelos CG3824 como máquina sincrónica trifásica.....	94
4.3.1. Medición de resistencia de los devanados del rotor de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina sincrónica trifásica.....	97
4.3.2. Prueba de vacío de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina sincrónica trifásica.....	97

4.3.2.1. Descripción de la prueba de vacío para la máquina sincrónica según norma IEEE 115 / IEC 34-4.....	97
4.3.2.2. Resultados de la prueba de vacío para la máquina sincrónica.....	100
4.3.3. Prueba de cortocircuito de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina sincrónica trifásica.....	102
4.3.3.1. Descripción de la prueba de cortocircuito para la máquina sincrónica según norma IEEE 115/ IEC 34-4.....	103
4.3.3.2. Resultados de la prueba de cortocircuito para la máquina sincrónica.....	104
4.3.4. Curva o punto de carga con factor de potencia cero de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina sincrónica trifásica.....	105
4.3.4.1. Descripción de la prueba de carga para la máquina sincrónica según norma IEEE 115 / IEC 34-4.....	106
4.3.4.2. Resultados de la prueba de carga para la máquina sincrónica.....	107
4.3.5. Determinación de la reactancia sincrónica de la máquina sincrónica.....	108
4.3.5.1. Método de Behn-Eschemburg.....	108
4.3.5.2. Aplicación del método de Behn-Eschemburg.....	110
4.3.6. Modelo circuital de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina sincrónica trifásica.....	110
4.4. Caracterización de la máquina generalizada modelo CG3824 como máquina de corriente continua.....	111
4.4.1. Determinación de los parámetros de la máquina eléctrica generalizada trabajando como máquina de corriente continua independiente.....	114
4.4.2. Modelo circuital de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina de corriente continua.....	114
CONCLUSIONES	116
RECOMENDACIONES	118
REFERENCIAS	119
BIBLIOGRAFÍA	121
ANEXOS	123

LISTA DE FIGURAS

	pág
1. Esquema de la máquina generalizada.....	8
2. Distribución de campo magnético resultante bajo el efecto de un sistema trifásico de corrientes.....	9
3. Distribución de campo magnético resultante bajo el efecto de un sistema bifásico de corrientes.	10
4. Diagrama esquemático de una máquina elemental de corriente continua.	20
5. Transformación de coordenadas $\alpha\beta$ de del rotor a dq del rotor.	25
6. Modelo esquemático de la máquina generalizada.	29
7. Panel gráfico de la disposición de las bobinas del rotor y del estator de la máquina generalizada.	32
8. Disco ajustable del rotor de la máquina generalizada.	33
9. Estroboscopio de la máquina generalizada.	33
10. Partes que componen el conjunto de la máquina generalizada.	38
11. Máquina asincrónica con alimentación por el rotor en estrella y el estator cortocircuitado y en cuadratura.....	40
12. Circuito equivalente o modelo de la máquina asincrónica con alimentación por el rotor en estrella y el estator cortocircuitado.	49
13. Circuito equivalente o modelo de la máquina asincrónica con alimentación por el rotor en estrella y el estator cortocircuitado considerando las pérdidas en el núcleo y sin considerar el efecto de las escobillas en el rotor.	50
14. Modelo circuital de la máquina sincrónica convencional.....	54
15. Modelo circuital de la máquina sincrónica generalizada.....	54
16. Representación de la máquina de convencional.....	56
17. Circuito equivalente de la máquina de independiente.....	57
18. Método de medición voltímetro-amperímetro para valores bajo de resistencia.....	59
19. Configuración de la máquina eléctrica generaliza como máquina asincrónica trifásica.....	72
20. Diagrama de operación como motor de inducción trifásico.	73
21. Circuito equivalente de la máquina asincrónica en la prueba de rotor trabado.....	85
22. Circuito equivalente de la máquina asincrónica trifásica generalizada obtenido del método A.....	90
23. Circuito equivalente de la máquina generalizada modelo CG3824	93

configurada como máquina asincrónica trifásica.....	
24. Configuración de la máquina generalizada como máquina asincrónica trifásica.....	95
25. Diagrama de operación como generador sincrónico trifásico.....	96
26. Curvas de saturación estándar de máquinas sincrónicas.....	99
27. Curvas de vacío y cortocircuito para la aplicación del método de Behn-Eschemburg.....	109
28. Circuito equivalente de la máquina generalizada modelo CG3824 configurada como máquina sincrónica trifásica.....	110
29. Configuración de la máquina generalizada como máquina de corriente continua independiente.....	112
30. Diagrama de operación como motor D.C. con excitación independiente..	113
31. Circuito equivalente de la máquina generalizada modelo CG3824 configurada como máquina de corriente continua independiente.....	114

LISTA DE TABLAS

	Pág
1. Especificaciones de la máquina generalizada modelo CG3824.....	39
2. Resistencia del estator, bobinas entre H1-H8.....	65
3. Resistencia del estator, bobinas entre J1-J8.....	65
4. Resistencia del rotor en estrella, bornes azul-amarillo.....	66
5. Resistencia del rotor en estrella, bornes amarillo-rojo.....	67
6. Resistencia del rotor en estrella, bornes azul-rojo.....	67
7. Resistencia del rotor en estrella.....	68
8. Resistencia del rotor entre N1-N2.....	69
9. Resistencia corregida del rotor entre N1-N2.....	70
10. Resultados prácticos de la prueba de vacío para la máquina asincrónica..	77
11. Resultados teóricos de la prueba de vacío para la máquina asincrónica...	77
12. Resultados prácticos de las pruebas de rotor trabado para la máquina asincrónica.....	82
13. Resultados teóricos de la prueba de rotor trabado para la máquina asincrónica.....	82
14. Resultados prácticos de la prueba con carga para la máquina asincrónica.....	83
15. Resultados teóricos de la prueba con carga para la máquina asincrónica..	83
16. Parámetros calculados mediante el método A.....	90
17. Resultados obtenidos de la prueba de vacío para la máquina sincrónica...	101
18. Resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito para la máquina sincrónica.....	104
19. Resultados prácticos de la prueba de carga para la máquina sincrónica...	107

LISTA DE GRÁFICAS

	pág
1. Resistencia del rotor en estrella, bornes azul-amarillo.....	68
2. Resistencia del rotor entre N1-N2.....	70
3. Curva E_o^2 vs P_o para halla las pérdidas mecánicas de la máquina generalizada trabajando como máquina asincrónica trifásica.....	78
4. Curva $V_o=f(I_{exc})$ de la prueba de vacío para la máquina sincrónica generalizada.....	102
5. Curva $I_{cc}=f(I_{exc})$ de la prueba de cortocircuito para la máquina sincrónica generalizada.....	105

INTRODUCCIÓN

El concepto de máquina generalizada se refiere a un modelo de máquina eléctrica que permite representar el principio de funcionamiento de todos los tipos de motores y generadores a partir de una formulación común. Ello como un reflejo de la unidad del fenómeno físico en el que descansan todos ellos.

El Laboratorio de Máquinas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica “Melchor Centeno Vallenilla” de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (UCV), dispone de una máquina eléctrica generalizada real, modelo CG3824, la cual será el objeto de esta investigación. Esta máquina fue fabricada por la Associated Electrical Industries Ltd (A.E.I.), junto con la colaboración del Sr. A.J. Ellison del Queen Mary College, de la Universidad de Londres.

Esta máquina eléctrica generalizada puede funcionar, por ejemplo, como una máquina de corriente continua convencional, como una máquina asíncrona o sincrónica según la conexión que se haga, y su alcance a nivel académico, constituye una herramienta de aprendizaje para los estudiantes de las menciones Potencia e Industrial.

Este equipo ya fue objeto de un trabajo de investigación que concluyó en un Trabajo Especial de Grado, elaborado por el Br. Deniter Vásquez en el año 2011, el cual consistió, entre otras cosas, en la determinación de la operatividad de la máquina generalizada, basándose en pruebas de funcionamiento del conjunto y una descripción de las distintas formas de operación. Como producto de la investigación, se elaboró un informe con el diagnóstico del estado del equipo y las recomendaciones necesarias para trabajar con él.

El desarrollo del trabajo consta de cuatro capítulos en donde se llevará una secuencia que concluirá en la determinación de los parámetros que conforman los circuitos equivalentes de los diferentes tipos de máquinas convencionales que pueden ser configurados en la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824.

El capítulo I describe las características del trabajo comenzando con una descripción del planteamiento del problema para establecer los objetivos, y además se especifican las limitaciones y los alcances del trabajo. Por último, se explican los pasos de la metodología desarrollada para cumplir los objetivos.

El capítulo II se aborda lo referente al marco teórico, empezando con una breve descripción del principio de funcionamiento de una máquina generalizada, para luego explicar cómo funciona, así como los equipos y partes que conforman la máquina modelo CG3824. Seguidamente, se explica el método de transformación de coordenadas para lograr desarrollar los modelos analíticos de los diferentes tipos de máquinas eléctricas estudiadas en este trabajo.

En el capítulo III, se explican en detalles las ecuaciones que permiten desarrollar los modelos analíticos aplicando el método de cambio de coordenadas y por último se deducen los mismos para la máquina asincrónica, sincrónica y de corriente independiente que se obtienen con la máquina generalizada.

El capítulo IV, describe las pruebas realizadas a cada una de las configuraciones de la máquina generalizada modelo CG3824, es decir, funcionando como máquina asincrónica trifásica, sincrónica trifásica y de corriente continua independiente, mediante las normativas IEEE e IEC, así como los resultados obtenidos, y por último, para cada una se deducen los modelos circuitales a través del cálculo de los parámetros que conforman los mismos.

CAPÍTULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV se realizan los ensayos necesarios, como parte de las prácticas de laboratorio, para caracterizar las máquinas rotativas de corriente continua, asíncronas y síncronas trifásicas, siguiendo las pautas establecidas por las normas IEEE e IEC, en función del tipo de máquina. Los valores de los parámetros de las máquinas, almacenados en bases de datos particulares, pueden constituir una referencia para los resultados de las pruebas que se realizan en las prácticas y que luego son reflejados en los informes de laboratorio de los estudiantes.

La mayoría de las máquinas del laboratorio ya han sido caracterizadas, sin embargo, de la máquina eléctrica generalizada fabricada por la A.E.I., sólo se tienen los valores teóricos de algunos de sus parámetros, que se encuentran en el libro y manual de operación: Generalized Electric Machine Set. Instructions for Operation and Maintenance. (2nd edition 1967). [1]

La obtención y verificación de los parámetros de la máquina generalizada, constituye una base de información muy importante, para futuras investigaciones en el campo de las máquinas eléctricas.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824, fabricada por la Associated Electrical Industries Ltd (A.E.I.), que se encuentra en el Laboratorio de Máquinas de la EIE, Facultad de Ingeniería de la UCV, bajo condiciones de régimen permanente.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar el principio de funcionamiento de una máquina generalizada.
- Determinar analíticamente, los modelos de cada una de las configuraciones típicas de la máquina generalizada fabricada por A.E.I., modelo CG3824.
- Caracterizar la máquina generalizada, modelo CG3824, aplicando las pruebas normalizadas para cada una de las configuraciones.
- Calcular los parámetros aproximados de la máquina generalizada modelo CG3824, a partir de los modelos de cada una de las configuraciones y los ensayos realizados.

1.4. ALCANCE

El desarrollo de esta investigación consistió sólo en la caracterización de los diferentes tipos de máquinas más comunes los cuales son: máquina asincrónica y sincrónica trifásica, y máquina DC convencional, basado en normativas IEC e IEEE de acuerdo a la conveniencia de la aplicación de cada una de las normas según el caso. Además, previo a la caracterización, se realizó un trabajo de investigación donde se fundamenta el funcionamiento de este tipo de máquina, así como la determinación analítica de cada uno de los modelos objetos de este trabajo.

1.5. LIMITACIONES

La escasa información sobre el tema y el conjunto, más que el propio manual y el trabajo de grado sobre la operatividad de la máquina, además que en los programas de las asignaturas de la carrera de Ingeniería Eléctrica Mención Potencia no se abarca el tema de la máquina generalizada en forma específica, por lo que se

tuvo que investigar en bibliografías y como parte de los objetivos, todo lo referente a este tipo de máquinas.

Por otra parte, la falta de una pieza de ajuste, necesaria para habilitar la manivela que varía el valor de uno de los reóstatos incorporado al panel de control y operaciones, obligatoriamente debe mandarse a hacer ya que no se encuentra en el mercado nacional, lo que representa una inversión de tiempo y dinero que no son parte del desarrollo de este proyecto.

La falta de equipos actualizados y de alta precisión en el laboratorio de Máquinas Eléctricas imposibilitó en muchos casos la realización de las pruebas tal cual como lo recomendaban las diferentes normativas.

1.6. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos antes descritos, se desarrollaron las siguientes fases metodológicas:

- Fase 1: investigación y documentación del principio de funcionamiento de una máquina generalizada conceptual y real.
- Fase 2: Determinación analítica de los modelos de cada una de las configuraciones de las siguientes máquinas, que se obtienen en la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824:
 - Motor asincrónico trifásico alimentado por el rotor, con arrollado del estator cortocircuitado y en cuadratura.
 - Máquina sincrónica con el campo en el estator y arrollado trifásico en el rotor.
 - Máquina DC con arrollado de campo en derivación o independiente.

- Fase 3: Caracterización de la máquina generalizada modelo CG3824, aplicando los ensayos normalizados para cada una de las configuraciones típicas, utilizando las normas IEEE e IEC y comparación de los resultados con los datos teóricos que se tienen en la bibliografía de la máquina.
- Fase 4: Cálculo de los parámetros aproximados de los circuitos equivalentes de cada una de las configuraciones señaladas, a partir de los modelos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Principio de funcionamiento de una máquina generalizada

El concepto de *máquina generalizada* se refiere a una máquina ficticia que tiene dos grados de libertad que permite representar cualquiera de los tipos de máquinas existente. La misma es un modelo conceptual que permite derivar el principio de funcionamiento de todos los tipos de máquinas a partir de una formulación común. Ello como un reflejo de la unidad del fenómeno físico en el que descansan los distintos tipos de máquinas eléctricas. [1]

El concepto de máquina generalizada contempla que el flujo en una máquina rotativa puede ser descompuesto en dos componentes ortogonales α y β . Para representar el flujo producido en el rotor se inyectan corrientes en las bobinas α_r y β_r , fijas en el rotor. El flujo del estator se obtiene inyectando corrientes en las bobinas α_e y β_e fijas en el estator. Estos devanados no tienen necesariamente existencia física, pero pueden reproducir los campos en el interior de la máquina. La posición relativa entre el rotor y el estator queda determinada mediante el ángulo θ , medido entre los ejes magnéticos α_e y α_r respectivamente. [1]

La máquina eléctrica generalizada posee cuatro ejes eléctricos α_e , α_r , β_e y β_r por los cuales se inyectan las corrientes y un eje mecánico o eje de giro. El flujo en el entrehierro de la máquina cambia su distribución cuando varían las corrientes i_{α_r} , i_{β_r} , i_{α_e} e i_{β_e} . La figura 1 representa el esquema de las bobinas ortogonales de la máquina generalizada. [1]

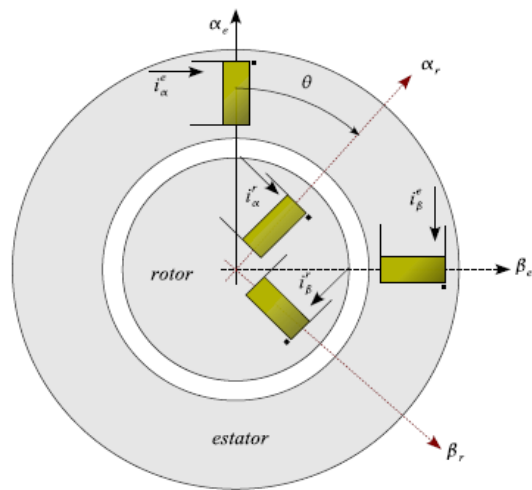


Figura 1. Esquema de la máquina generalizada. [1]

Por ende, una máquina generalizada es un equipo que permite modelar cualquier tipo de máquina eléctrica rotativa basándose en un mismo principio de funcionamiento, el cual consiste en la idealización de un modelo en cuadratura, que permita desarrollar ecuaciones a partir de un sistema ortogonal.

Para comprender mejor la idea, se tiene que el principio de funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa convencional es que la acción de las corrientes que circulan por sus arrollados genera una fuerza magnetomotriz que hace posible la presencia de un campo magnético el cual puede ser representado por un sistema trifásico de vectores que se superponen para generar un campo magnético resultante rotativo, es decir, que dichos vectores dependen tanto de la posición como del tiempo, por lo cual, se puede apreciar en el entrehierro de la máquina como un campo con una distribución espacial sinusoidal. [2]

En general, las máquinas eléctricas rotativas son construidas de forma tal que tengan simetría de media onda, con la finalidad de que solo existan componentes armónicas impares, por lo que la misma puede ser desarrollada o descompuesta en

series de Fourier. Cada componente existente de la onda va a poseer su representación vectorial asociada y estará determinada por su amplitud y posición en cualquier instante.

Para cada distribución de corrientes, ya sea de estator o de rotor, la distribución de campo en el entrehierro correspondiente a esas corrientes, se puede representar por medio de un vector asociado a la fundamental que tiene dos grados de libertad, ya que su frecuencia es conocida. La figura 2, muestra el caso en que una distribución trifásica de corrientes que generan sus propias componentes de campo F_a , F_b y F_c , impone una distribución de campo F_{res} a partir de corrientes circulando por 3 bobinados localizadas espacialmente a 120° . [2]

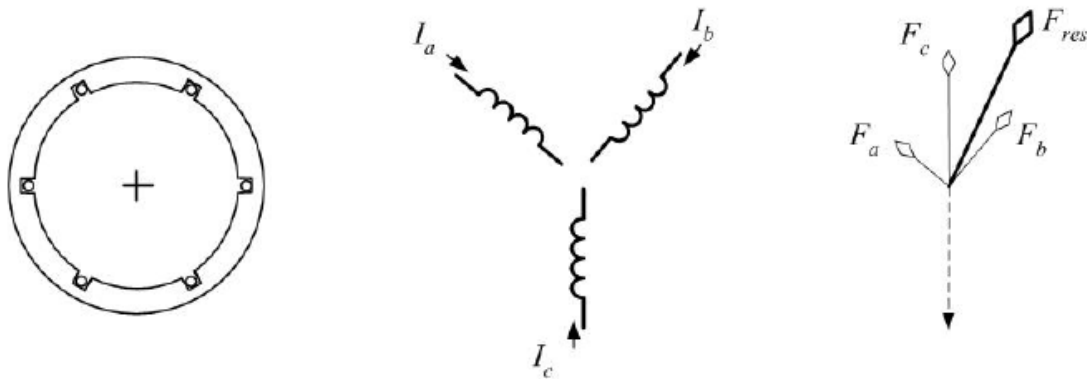


Figura 2. Distribución de campo magnético resultante bajo el efecto de un sistema trifásico de corrientes. [2]

La distribución resultante puede ser también representada en magnitud y fase por un sistema equivalente de dos bobinas localizadas en ejes ortogonales por la que circulan corrientes bifásicas, como se indica en la figura 3.

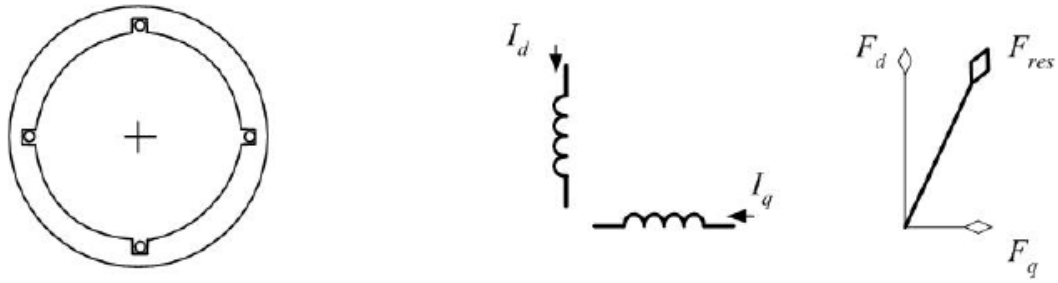


Figura 3. Distribución de campo magnético resultante bajo el efecto de un sistema bifásico de corrientes. [2]

De esta manera, con un adecuado valor de las corrientes en las bobinas ortogonales, se puede generar un campo magnético resultante que tenga la misma magnitud y fase del generado por las corrientes circulando por el estator y rotor.

Finalmente se llega a que la estructura de la máquina generalizada posee simetría cilíndrica, con dos sistemas de ejes ortogonales que permiten simular las distribuciones de flujo del estator y rotor ajustando las correspondientes corrientes. El ángulo θ , define la posición del rotor y por lo tanto el eje mecánico. Se define el par en el mismo sentido del ángulo.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de la máquina generalizada, se definen de la siguiente manera: [1]

$$[v] = [R][i] + \dot{\theta}[\tau(\theta)][i] + [L(\theta)] \frac{d}{dt} [i] \quad (1)$$

$$T_m = -\frac{1}{2} [i]^t [\tau(\theta)] [i] + J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (2)$$

Donde ρ es el coeficiente de fricción y J es la inercia del eje de rotación.

Para el sistema descrito se tienen variables de estado tema de ecuaciones diferenciales como las corrientes $[i]$, el ángulo θ y la velocidad angular $\frac{d\theta}{dt}$, denominada también ω_m .

Es necesario conocer la matriz de resistencias $[R]$ para solucionar el sistema planteado, además de la de inductancias en función del ángulo $[L(\theta)]$ y la derivada de la matriz de inductancias con respecto al ángulo θ , también denominada matriz de par $[\tau(\theta)]$.

La matriz de resistencias [1]

La matriz de resistencias definida en la ecuación (3), de la máquina eléctrica generalizada es diagonal, ya que todas las resistencias son propias de cada bobina y debido a que los devanados están aislados galvánicamente, no existen resistencias mutuas.

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{e\alpha} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{e\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{r\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La matriz de inductancias [1]

La inductancia propia del estator no depende de la posición del rotor ya que, si la máquina posee un rotor cilíndrico y homogéneo, al girar no se modifica la permeancia del camino magnético. Por lo tanto, la inductancia propia del estator es constante e independiente del ángulo θ y se puede calcular de la siguiente manera:

$$L = Ne^2Pe \quad (4)$$

Por otro lado, si el estator es cilíndrico, la inductancia propia del rotor es constante por el mismo razonamiento anterior. Si todos los devanados del estator poseen el mismo número de vueltas y lo mismo ocurre con las bobinas del rotor, los términos de la diagonal de la matriz de inductancia son:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_e & x & x & x \\ x & L_e & x & x \\ x & x & L_r & x \\ x & x & x & L_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

El hecho de que las bobinas sean ortogonales se traduce en que las inductancias mutuas entre los devanados α y β del estator son cero porque el flujo que se produce en una de ellas no puede enlazar a la otra. Con los devanados del rotor sucede lo mismo:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_e & 0 & x & x \\ 0 & L_e & x & x \\ x & x & L_r & 0 \\ x & x & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

Cuando las bobinas α del estator y α del rotor se encuentran alineadas, es decir, el ángulo θ es igual a cero, la inductancia mutua entre ambos devanados es máxima. Para representar este valor de la inductancia mutua se debe utilizar un término trigonométrico $\cos \theta$. Lo mismo ocurre entre el eje β del estator y el eje β del rotor. La inductancia mutua entre las bobinas α del rotor y β del estator es máxima cuando $\theta=90^\circ$; esto se representa mediante un término $\sin \theta$. La inductancia mutua entre el devanado β del rotor y α del estator es máxima cuando $\theta=-90^\circ$; por esta razón esta inductancia se puede representar mediante un término $-\sin \theta$. Como la matriz de inductancias es simétrica se tendrá de acuerdo a las consideraciones realizadas que:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_e & 0 & L_{er}\cos\theta & -L_{er}\sin\theta \\ 0 & L_e & L_{er}\sin\theta & L_{er}\cos\theta \\ L_{er}\cos\theta & L_{er}\sin\theta & L_r & 0 \\ -L_{er}\sin\theta & L_{er}\cos\theta & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

Matriz de par [1]

La matriz de torque $[\tau(\theta)]$ se define como la derivada con respecto al ángulo θ la matriz de inductancias de la máquina:

$$[\tau(\theta)] = \frac{d}{d\theta}[L] \quad (8)$$

De esta forma se obtiene:

$$[\tau(\theta)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_{er}\sin\theta & -L_{er}\cos\theta \\ 0 & 0 & L_{er}\cos\theta & -L_{er}\sin\theta \\ -L_{er}\sin\theta & L_{er}\cos\theta & 0 & 0 \\ -L_{er}\cos\theta & -L_{er}\sin\theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Cálculo del par eléctrico [1]

A partir de las matrices (7) y (9) se puede calcular el par eléctrico de la máquina como se muestra a continuación:

$$T_e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{\alpha e} \\ i_{\beta e} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} L_e & 0 & L_{er}\cos\theta & -L_{er}\sin\theta \\ 0 & L_e & L_{er}\sin\theta & L_{er}\cos\theta \\ L_{er}\cos\theta & L_{er}\sin\theta & L_r & 0 \\ -L_{er}\sin\theta & L_{er}\cos\theta & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha e} \\ i_{\beta e} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Efectuando los productos matriciales en la ecuación (10) se obtiene:

$$T_e = L_{er} \left\{ \sin \theta (-i_{e\alpha} * i_{r\alpha} - i_{e\beta} * i_{r\beta}) + \cos \theta (-i_{e\alpha} * i_{r\beta} + i_{e\beta} * i_{r\alpha}) \right\} \quad (11)$$

Si las corrientes del estator o del rotor son cero, todos los términos del par eléctrico en la ecuación (11) serán nulos y no se produce par en la máquina. Por otro lado, si se inyectan corrientes constantes en todas las bobinas del rotor y del estator, el torque eléctrico tendrá la siguiente forma:

$$T_e = L_{er} \{ \sin \theta A + \cos \theta B \} \quad (12)$$

En la ecuación (12) se observa que para cada valor de la posición del rotor θ existe un par eléctrico, pero el promedio de ese par en un giro completo de la máquina es cero. Esto demuestra el hecho de que una máquina eléctrica no puede funcionar en régimen permanente con corriente continua en todos sus devanados.

El par eléctrico promedio de la máquina bifásica en un período se calcula de la siguiente expresión:

$$\langle T_e \rangle = \frac{L_{er}}{T} \int_0^T \left\{ \sin \theta (-i_{e\alpha} * i_{r\alpha} - i_{e\beta} * i_{r\beta}) + \cos \theta (-i_{e\alpha} * i_{r\beta} + i_{e\beta} * i_{r\alpha}) \right\} d\theta \quad (13)$$

El ángulo θ en la expresión (13), considerando que el rotor gira a velocidad angular constante ω_m , se puede expresar como:

$$\theta = \omega_m t + \theta_o \quad (14)$$

Por lo tanto, sustituyendo la expresión (14) en (13) se obtiene:

$$\begin{aligned} \langle T_e \rangle = \frac{L_{er}}{T} \int_0^T \{ & \sin(\omega_m t + \theta_o) (-i_{e\alpha} * i_{r\alpha} - i_{e\beta} * i_{r\beta}) \\ & + \cos(\omega_m t + \theta_o) (-i_{e\alpha} * i_{r\beta} + i_{e\beta} * i_{r\alpha}) \} d\omega_m t \end{aligned} \quad (15)$$

Si las corrientes se expresan en forma de cosenos resulta:

$$i_{e\alpha} = \sqrt{2} I_{e\alpha} \cos(\omega_{e\alpha} t + \theta_{e\alpha}) \quad (16)$$

$$i_{e\beta} = \sqrt{2} I_{e\beta} \cos(\omega_{e\beta} t + \theta_{e\beta}) \quad (17)$$

$$i_{r\alpha} = \sqrt{2} I_{r\alpha} \cos(\omega_{r\alpha} t + \theta_{r\alpha}) \quad (18)$$

$$i_{r\beta} = \sqrt{2} I_{r\beta} \cos(\omega_{r\beta} t + \theta_{r\beta}) \quad (19)$$

Por otro lado, se tiene que:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sin \theta * \cos \theta d\theta = 0 \quad (20)$$

Entonces, los únicos términos que pueden producir par promedio diferente de cero son los productos de cosenos, por lo tanto:

$$\langle T_e \rangle = \frac{L_{er}}{T} \int_0^T \{ \cos(\omega_m t + \theta_o) (-i_{e\alpha} * i_{r\beta} + i_{e\beta} * i_{r\alpha}) \} d\omega_m t \quad (21)$$

Si las corrientes estáticas y rotóricas son periódicas, es posible expresarlas mediante series de Fourier en cosenos:

$$i_e = \sum_{k=1}^{\infty} I_{ke} \cos(k\omega_e t - \gamma_e) \quad (22)$$

$$i_r = \sum_{j=1}^{\infty} I_{jr} \cos(j\omega_r t - \gamma_r) \quad (23)$$

Los términos del par son de la forma:

$$\cos(\omega_m t + \theta_o) * \sum_{k=1}^{\infty} I_{ke} \cos(k\omega_e t - \gamma_e) * \sum_{j=1}^{\infty} I_{jr} \cos(j\omega_r t - \gamma_r) \quad (24)$$

Del conocimiento de las propiedades trigonométricas se sabe que:

$$\begin{aligned} \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma \equiv \frac{1}{4} [\cos(\alpha + \beta + \gamma) + \cos(\alpha + \beta - \gamma) + \cos(\alpha - \beta + \gamma) \\ + \cos(-\alpha + \beta + \gamma)] \end{aligned} \quad (25)$$

Luego, dicha propiedad se puede aplicar al término genérico de par eléctrico (24) quedando de la siguiente forma:

$$\cos(\omega_m t + \theta_o \pm k\omega_e t \pm \gamma_e \pm j\omega_r t \pm \gamma_r) \quad (26)$$

Para que un término igual a la ecuación (26) tenga un promedio diferente de cero en un período, es necesario que se anule la dependencia del tiempo en el argumento de la función coseno, es decir,

$$\omega_m \pm k\omega_e \pm j\omega_r = 0 \quad (27)$$

La ecuación (27) es fundamental en el análisis de las máquinas eléctricas rotativas y se conoce como condición necesaria de par promedio. En la ecuación (27), ω_m es la velocidad mecánica del sistema, ω_e representa la frecuencia angular de las

corrientes inyectadas en las bobinas del estator y ω_r es la frecuencia angular de las corrientes inyectadas en el rotor.

Los tipos más comunes de máquinas eléctricas convencionales se diferencian por el mecanismo que utilizan para dar cumplimiento a la ecuación (27) como se explicará a continuación. A pesar de que las máquinas sincrónicas, de inducción y de corriente continua, utilizan diferentes mecanismos de excitación de sus bobinas rotóricas y estatóricas, siempre deben satisfacer la condición necesaria de par promedio para permitir la conversión de energía.

La máquina de inducción [1]

En la máquina de inducción se permite un grado de libertad adicional. En esta máquina, para un amplio rango de velocidades se puede obtener par promedio diferente de cero, es decir, a diferencia de la máquina sincrónica, este tipo de máquina no tiene como condición primordial girar a velocidad sincrónica. Las corrientes que circulan por el rotor se ajustan por el fenómeno de inducción electromagnética y cumplen la condición dada por la ecuación (27).

Para este tipo de máquina, la frecuencia de las corrientes en el estator ω_e es fijada y se produce un campo electromagnético en el entrehierro de la máquina que gira mecánicamente con la frecuencia angular de estas corrientes.

Como el rotor gira a la velocidad mecánica ω_m , los conductores del rotor cortan el campo magnético producido en el estator con una velocidad que es la diferencia entre ω_e y ω_m . La diferencia porcentual entre estas dos velocidades se conoce como *deslizamiento* de la máquina:

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} * 100\% \quad (28)$$

La velocidad angular ω_e se conoce como velocidad sincrónica de la máquina de inducción y depende únicamente de la frecuencia de la red y de la cantidad de polos de la misma.

La máquina sincrónica [1]

A las máquinas sincrónicas se les inyecta corriente continua en las bobinas rotóricas en las máquinas convencionales, por esta razón:

$$\omega_r = 0 \quad (29)$$

Si se aplica la condición necesaria de par promedio (27) con la restricción (29) para las máquinas sincrónicas, se obtiene:

$$\omega_m \pm k\omega_e = 0 \quad (30)$$

La ecuación (30) justifica el nombre de estas máquinas, ya que las máquinas sincrónicas sólo pueden producir par promedio diferente de cero cuando la velocidad mecánica coincide con la velocidad angular de las corrientes inyectadas en el estator, es decir, que la máquina debe girar en sincronismo con las corrientes estáticas.

La máquina de corriente continua [1]

La máquina de corriente continua es un caso particular de máquina sincrónica, donde la igualdad de frecuencias entre las corrientes rotóricas en este caso y la velocidad mecánica se obtiene mediante un inversor mecánico constituido por un colector y un juego de carbones que conmuta las corrientes en las bobinas del rotor con una frecuencia igual a la velocidad mecánica de giro.

Esta máquina posee un devanado estatórico por el cual se inyecta corriente continua y una armadura en el rotor alimentada mediante una fuente de corriente continua además de un colector que permite la inversión de las corrientes en la armadura. En la figura 4 se muestra una máquina de corriente continua simplificada.

Para calcular el par eléctrico que produce esta máquina se utiliza la siguiente expresión para los sistemas lineales: [1]

$$T_e = \frac{1}{2} [i]^t [\tau(\theta)] [i] \quad (31)$$

Al desarrollar la ecuación (31) se obtiene:

$$T_e = \frac{1}{2} [i_e \ i_r] \begin{bmatrix} 0 & -M \sin \theta \\ -M \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_r \end{bmatrix} \quad (32)$$

Donde, M es la inductancia mutua entre el estator y el rotor. Por lo tanto, al realizar las operaciones matriciales en la ecuación (32):

$$T_e = -M * i_e * i_r * \sin \theta \quad (33)$$

En la máquina de corriente continua el colector o conmutador mecánico permite alternar la polaridad de la tensión de alimentación de la bobina del rotor V_r al mismo tiempo que gira el rotor. En la figura 4 se observa también la corriente que circula por el rotor de la máquina.

El par promedio en el eje de la máquina es calculado de la siguiente manera:

$$\langle T_e \rangle = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_0^\pi -M I_e I_r \sin \theta d\theta + \int_\pi^{2\pi} M I_e I_r \sin \theta d\theta \right\} \quad (34)$$

Cuyo resultado es el siguiente:

$$\langle T_e \rangle = -\frac{2M}{\pi} I_e I_r = k I_e I_r \quad (35)$$

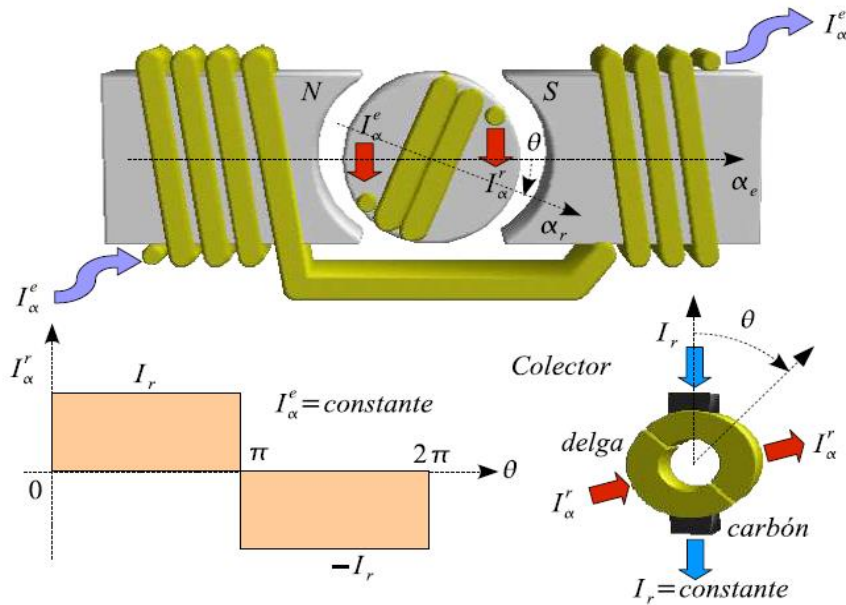


Figura 4. Diagrama esquemático de una máquina elemental de corriente continua. [1]

Transformación de Coordenadas [1]

El sistema de ecuaciones diferenciales formado por las ecuaciones (1) y (2), que modela el comportamiento de la máquina eléctrica, no es lineal. El hecho de que en dichas ecuaciones exista una dependencia del ángulo θ dificulta la solución del sistema por lo que se procede a realizar una transformación de las ecuaciones diferenciales a nuevos sistemas de coordenadas para la simplificación del mismo.

Mediante una matriz de transformación aplicada a las variables en coordenadas primitivas α y β , se puede definir un nuevo sistema de coordenadas. Las tensiones y corrientes en el nuevo sistema transformado son:

$$[v_{\alpha e \beta e, \alpha r \beta r}] = [A_{wxyz}][v_{wxyz}] \quad (36)$$

$$[i_{\alpha e \beta e, \alpha r \beta r}] = [A_{wxyz}][i_{wxyz}] \quad (37)$$

Donde:

A_{wxyz}	es la matriz de transformación.
$v_{\alpha e \beta e, \alpha r \beta r}$	son las tensiones en coordenadas primitivas.
v_{wxyz}	son las tensiones en las nuevas coordenadas.
$i_{\alpha e \beta e, \alpha r \beta r}$	son las corrientes en coordenadas primitivas.
i_{wxyz}	son las corrientes en las nuevas coordenadas.

Para calcular la potencia en coordenadas primitivas se utiliza la siguiente expresión:

$$p = [i_{\alpha e \beta e, \alpha r \beta r}]^{*t} [v_{\alpha e \beta e, \alpha r \beta r}] \quad (38)$$

En la expresión (38), el asterisco (*) indica que el vector de corrientes se debe conjugar en caso de ser complejo y el superíndice "t" representa una trasposición del vector de corrientes para que el producto matricial con el vector de tensiones sea posible.

Si se sustituye en la ecuación (38) las definiciones (36) y (37), se obtiene:

$$p = [i_{wxyz}]^{*t} [A_{wxyz}]^{*t} [A_{wxyz}][v_{wxyz}] \quad (39)$$

Para que la transformación utilizada $[A_{wxyz}]$ sea invariante en potencia es necesario que:

$$[A_{wxyz}]^{*t} [A_{wxyz}] = [I] \quad (40)$$

Donde $[I]$ es la matriz identidad y por lo tanto resulta que:

$$[A_{wxyz}]^{*t} = [A_{wxyz}]^{-1} \quad (41)$$

Una matriz que satisface la condición (41) se denomina hermitiana o hermítica.

La transformación es conservativa en potencia siempre y cuando la conjugada traspuesta de la matriz de transformación de coordenadas sea idéntica a la matriz inversa tal como lo indica la ecuación (41). En otras palabras, una transformación hermitiana permite calcular las potencias en las variables transformadas sin necesidad de regresar a las coordenadas primitivas.

Las ecuaciones de los ejes eléctricos de la máquina se pueden escribir como:

$$[v_{\alpha\beta,\alpha\beta}] = \left[[R_{\alpha\beta,\alpha\beta}] + [L_{\alpha\beta,\alpha\beta}]p + \dot{\theta}[\tau_{\alpha\beta,\alpha\beta}] \right] [i_{\alpha\beta,\alpha\beta}] \quad (42)$$

Aplicando transformación de coordenadas a la ecuación (42):

$$[A_{wxyz}][v_{wxyz}] = \left[[R_{\alpha\beta,\alpha\beta}] + [L_{\alpha\beta,\alpha\beta}]p + \dot{\theta}[\tau_{\alpha\beta,\alpha\beta}] \right] [A_{wxyz}][i_{wxyz}] \quad (43)$$

Y al despejar de (43) el vector de tensiones, se obtiene:

$$\begin{aligned}
[v_{wxyz}] = & \left\{ [A_{wxyz}]^{-1} [R_{\alpha\beta,\alpha\beta}] [A_{wxyz}] + [A_{wxyz}]^{-1} [L_{\alpha\beta,\alpha\beta}] [A_{wxyz}] p \right. \\
& + [A_{wxyz}]^{-1} [L_{\alpha\beta,\alpha\beta}] \frac{d}{dt} [A_{wxyz}] \\
& \left. + \dot{\theta} [A_{wxyz}]^{-1} [\tau_{\alpha\beta,\alpha\beta}] [A_{wxyz}] \right\} [i_{wxyz}]
\end{aligned} \tag{44}$$

La ecuación (44) se puede escribir utilizando las siguientes definiciones:

$$[R_{wxyz}] = [A_{wxyz}]^{-1} [R_{\alpha\beta,\alpha\beta}] [A_{wxyz}] \tag{45}$$

$$[L_{wxyz}] = [A_{wxyz}]^{-1} [L_{\alpha\beta,\alpha\beta}] [A_{wxyz}] \tag{46}$$

$$[\tau_{wxyz}] = [A_{wxyz}]^{-1} [\tau_{\alpha\beta,\alpha\beta}] [A_{wxyz}] \tag{47}$$

Como la matriz de transformación puede depender en general de la posición angular θ , se obtiene:

$$\frac{d}{dt} [A_{wxyz}] = \frac{d}{dt} [A_{wxyz}] * \frac{d\theta}{dt} \tag{48}$$

y definiendo:

$$[H_{wxyz}] = [A_{wxyz}]^{-1} p [L_{\alpha\beta,\alpha\beta}] [A_{wxyz}] \tag{49}$$

Se puede escribir de una mejor manera la ecuación (44) como:

$$[v_{wxyz}] = \left[[R_{wxyz}] + [L_{wxyz}] p + \dot{\theta} \left[[\tau_{wxyz}] + [H_{wxyz}] \right] \right] [i_{wxyz}] \tag{50}$$

El segundo término de la sumatoria en la ecuación (50), corresponde a las fuerzas electromotrices de transformación y el tercer término a las fuerzas electromotrices de generación. Este último término se descompone en dos partes, por un lado la matriz de par $[\tau_{wxyz}]$ y por otro la matriz $[H_{wxyz}]$ que reproduce los términos de generación originados por el movimiento relativo de los ejes transformados con respecto a los ejes reales.

La matriz $[H_{wxyz}]$ determina los términos no-holonómicos debidos a la transformación de coordenadas.

La ecuación dinámica de la máquina se expresa como:

$$T_m = -\frac{1}{2} [i_{\alpha\beta, \alpha\beta}]^{*t} [\tau_{\alpha\beta, \alpha\beta}] [i_{\alpha\beta, \alpha\beta}] + J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (51)$$

La cual a través de una transformación a las nuevas coordenadas resulta:

$$T_m = -\frac{1}{2} [i_{wxyz}]^{*t} [A_{wxyz}]^{*t} [\tau_{\alpha\beta, \alpha\beta}] [A_{wxyz}] [i_{wxyz}] + J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (52)$$

y sustituyendo la ecuación (47) en (52):

$$T_m = -\frac{1}{2} [i_{wxyz}]^{*t} [\tau_{wxyz}] [i_{wxyz}] + J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (53)$$

Las ecuaciones (50) y (53) representan a la máquina eléctrica en un nuevo sistema de coordenadas. Mediante una selección apropiada de la matriz de transformación $[A_{wxyz}]$, es posible encontrar una solución más simple al sistema de ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento de la máquina.

Transformación de coordenadas $\alpha\beta - dq$ [1]

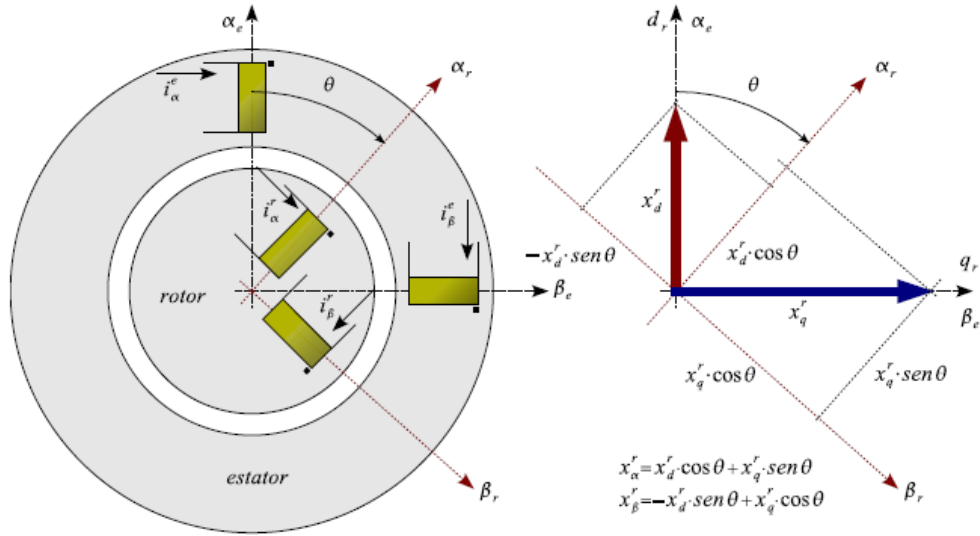


Figura 5. Transformación de coordenadas $\alpha\beta$ de del rotor a dq del rotor. [1]

En el análisis de las máquinas eléctricas rotativas, es útil llevar a cabo una transformación que consiste en proyectar las coordenadas del rotor en ejes colineales con los ejes del estator denominados *eje directo dr* y *eje en cuadratura qr*, los cuales permiten anular el movimiento de las bobinas del rotor y hacer que las inductancias entre el estator y el rotor sean constantes en el sistema de coordenadas transformadas. En la figura 5 se ha representado un diagrama con la transformación propuesta.

En esta transformación, las tensiones y corrientes correspondientes a las coordenadas primitivas del rotor son referidas a nuevas tensiones y corrientes inyectadas en bobinas fijas en el espacio. Los ejes del estator, en las nuevas coordenadas permanecen inalterados. La matriz de transformación de coordenadas se puede distribuir o dividir de la siguiente forma:

$$[A_{\alpha\beta dq}] = \begin{bmatrix} [A_{ee}] & [0] \\ [0] & [A_{ee}] \end{bmatrix} \quad (54)$$

La submatriz $[A_{ee}]$ debe ser unitaria, ya que las coordenadas del estator no cambian en la transformación, es decir,

$$[A_{ee}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (55)$$

Para determinar $[A_{rr}]$ se debe recordar que:

$$[i_{ar\beta r}] = [A_{rr}][i_{drqr}] \quad (56)$$

La matriz $[A_{rr}]$ corresponde a la proyección de los ejes ar y βr sobre los ejes dr y qr solidarios con el estator. Esta transformación es una rotación inversa que anula la rotación del rotor de la máquina.

Por otro lado, de la figura 5 se deduce que la transformación de coordenadas es:

$$[A_{rr}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (57)$$

La matriz obtenida en la ecuación (57) es hermitiana, es decir, como se explicó antes, que su traspuesta conjugada es igual a su inversa:

$$[A_{rr}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\cos^2\theta + \sin^2\theta} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} = [A_{rr}]^{*t} \quad (58)$$

Definida la transformación de coordenadas $[A_{rr}]$, es posible determinar las matrices transformadas $[R_{\alpha\beta dq}]$, $[L_{\alpha\beta dq}]$, $[\tau_{\alpha\beta dq}]$ y $[H_{\alpha\beta dq}]$.

Una vez explicado el método de transformación de coordenadas, se deben hallar las matrices necesarias para el análisis de la máquina generalizada.

Matriz de resistencias en coordenadas $\alpha\beta dq$ [1]

La matriz de resistencia $[R_{\alpha\beta dq}]$ en las nuevas coordenadas es:

$$\begin{aligned} [R_{\alpha\beta dq}] &= [A_{\alpha\beta dq}]^{-1} [R_{\alpha\beta, \alpha\beta}] [A_{\alpha\beta dq}] \\ &= \begin{bmatrix} [I] & [0] \\ [0] & [A_{rr}]^t \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_e [I] & [0] \\ [0] & R_r [I] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] & [0] \\ [0] & [A_{rr}] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (59)$$

Efectuando el triple producto matricial de la ecuación (59) se obtiene:

$$[R_{\alpha\beta dq}] = \begin{bmatrix} R_e [I] & [0] \\ [0] & R_r [I] \end{bmatrix} \quad (60)$$

Como se observa en la ecuación (60), y debido a que las resistencias no dependen de la posición del rotor y además no existe acoplamiento galvánico entre las bobinas, la transformación aplicada no modifica la matriz original de resistencias.

Matriz de inductancias en coordenadas $\alpha\beta dq$ [1]

Si se aplica la transformación a la matriz de inductancia $[L_{\alpha\beta\alpha\beta}]$, se obtiene:

$$\begin{aligned} [L_{\alpha\beta dq}] &= [A_{\alpha\beta dq}]^{-1} [L_{\alpha\beta, \alpha\beta}] [A_{\alpha\beta dq}] = \begin{bmatrix} L_e [I] & L_{er} [I] \\ L_{er} [I] & L_r [I] \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_e & 0 & L_{er} & 0 \\ 0 & L_e & 0 & L_{er} \\ L_{er} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_{er} & 0 & L_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (61)$$

La matriz de inductancias transformadas es independiente de la posición angular del rotor como se aprecia en la ecuación (61). Esto es debido, a la rotación en sentido inverso de la transformación, que convierte las inductancias solidarias con los

ejes del rotor en inductancias que giran en contra de la posición angular del rotor y por tanto mantienen una posición constante con respecto a los ejes α y β del estator.

Matrices de generación en coordenadas $\alpha\beta dq$ [1]

Aplicando el mismo procedimiento a la matriz de par $[\tau_{\alpha\beta\alpha\beta}]$, se obtiene:

$$[\tau_{\alpha\beta dq}] = [A_{\alpha\beta dq}]^{-1} [\tau_{\alpha\beta,\alpha\beta}] [A_{\alpha\beta dq}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -L_{er} \\ 0 & 0 & L_{er} & 0 \\ 0 & L_{er} & 0 & 0 \\ -L_{er} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

Igual que con la matriz de inductancia, la matriz de par es independiente del ángulo θ . La matriz de términos de generación no holonómicos $[H_{\alpha\beta dq}]$ puede ser calcular como:

$$[H_{\alpha\beta dq}] = [A_{\alpha\beta dq}]^{-1} [\tau_{\alpha\beta,\alpha\beta}] \frac{d}{d\theta} [A_{\alpha\beta dq}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -L_{er} \\ 0 & 0 & -L_{er} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_r \\ 0 & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (63)$$

Por último, la matriz de generación se define de la siguiente forma:

$$[G_{\alpha\beta dq}] = [\tau_{\alpha\beta dq}] + [H_{\alpha\beta dq}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{er} & 0 & L_r \\ -L_{er} & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (64)$$

Ecuaciones generales en coordenadas $\alpha\beta dq$ [1]

Las ecuaciones de tensión para la máquina en coordenadas transformadas $\alpha\beta dq$ son:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha e} \\ v_{\beta e} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + L_e p & 0 & L_{er} p & 0 \\ 0 & R_e + L_e p & 0 & L_{er} p \\ L_{er} p & \dot{\theta} L_{er} & R_r + L_r p & \dot{\theta} L_r \\ -\dot{\theta} L_{er} & L_{er} p & -\dot{\theta} L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha e} \\ i_{\beta e} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (65)$$

La ecuación (65) representa a la máquina eléctrica en coordenadas $\alpha\beta dq$. La construcción de una máquina como esta es posible físicamente, mediante la incorporación de un par de conmutadores como los que se ilustran en la figura 6. El colector permite que las inductancias propias y mutuas vistas desde el estator sean independientes de la posición del rotor. Las escobillas o carbones que recolectan la corriente, neutralizan el efecto del giro, de forma análoga a lo que realiza la transformación $[A_{\alpha\beta dq}]$.

Los términos de la ecuación (65) se pueden identificar fácilmente en el modelo de la figura 6.

Es necesario destacar que los signos negativos, tienen su origen en el sentido de giro de la máquina, las convenciones de polaridad y la posición relativa de los ejes α , β , d y q .

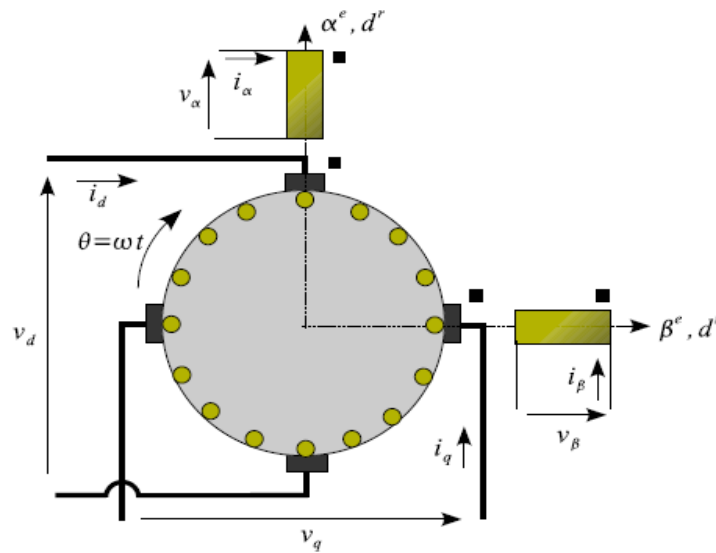


Figura 6. Modelo esquemático de la máquina generalizada. [1]

Es necesario calcular el par eléctrico para completar las ecuaciones que definen el comportamiento de la máquina eléctrica en las coordenadas $\alpha\beta dq$:

$$T_e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{\alpha e} \\ i_{\beta e} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -L_{er} \\ 0 & 0 & L_{er} & 0 \\ 0 & L_{er} & 0 & 0 \\ -L_{er} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha e} \\ i_{\beta e} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = L_{er}(i_{\beta e}i_{dr} - i_{\alpha e}i_{qr}) \quad (66)$$

La ecuación de balance del par mecánico es:

$$T_m = (i_{\beta e}i_{dr} - i_{\alpha e}i_{qr}) + J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (67)$$

La condición necesaria para la existencia de par eléctrico requiere que, al menos existan dos corrientes, una en el estator y otra en el rotor, y que esas corrientes se encuentren en ejes en ortogonales del modelo de la máquina generalizada [1]

Por lo tanto, los beneficios de aplicar este método de transformación son que las ecuaciones de la máquina generalizada en coordenadas primitivas son dependientes de la posición angular θ del rotor con respecto al estator y al aplicar esta transformación se independizan las matrices de parámetros del modelo de dicho ángulo. De esta forma es posible obtener un sistema de ecuaciones diferenciales no lineal, pero con coeficientes constantes en el tiempo cuya solución numérica es mucho más simple que el modelo original y la solución analítica es posible considerando como hipótesis que la velocidad mecánica es aproximadamente constante.

2.2. Principio de funcionamiento y descripción de la máquina generalizada modelo CG3824 fabricada por la Associated Electrical Industries Ltd (A.E.I.) [3]

El conjunto que conforma la máquina generalizada en su totalidad consta básicamente de:

- Máquina generalizada CG3824.
- Máquina de carga D.C. DY2215.
- Transductor de par.
- Torquímetro tipo MTM2.
- Tacómetro generador A.C. tipo JA.
- Motor de accionamiento de escobillas BD2508B.
- Tacómetro generador D.C. tipo PA.
- Instrumentos y equipos auxiliares.

Todos los bobinados de las maquinas del conjunto, se pueden ver en detalle en los anexos, donde por simplicidad y de acuerdo con la convención usual, se dibujan como si la máquina generalizada tuviese dos polos, aunque en realidad tenga cuatro.

El estator de la máquina generalizada está conformado por dos bobinas distribuidas en espacios en cuadratura, es decir, separadas a 90° entre sí, cada una dividida en cuatro secciones idénticas como se puede observar en la figura 7. Es posible, por lo tanto, realizar conexiones en serie, serie-paralelo, o paralelo. Además, tiene cinco cables de búsqueda o exploración, dispuestos en las ranuras 1, 2, 6, 8 y 10 y conectados cada uno a dos terminales en el panel de control y operaciones.

Por su parte, el rotor tiene un solo cable de exploración que recorre la ranura 1, y está conectado en un extremo, entre el eje y el interior del anillo colector más cercano al rotor y en el otro extremo unido en serie a un fusible removible de 10 mA ubicado en el disco de conexión del rotor. También tiene un contacto metálico que

cuando el cable de búsqueda del rotor no está en uso, debe ser removido de la ranura para prevenir un desgaste innecesario y el fusible retirarse de su agarradera.

Estos cables de búsqueda en la máquina generalizada, que recorren de extremo a extremo las ranuras del estator y el rotor, están dispuestos para poder apreciar la magnitud del vector inducción con los equipos adecuados para ello, así como también se pudiera llegar a observar la forma del vector de inducción.

El rotor de la máquina generalizada también tiene en sus ranuras, un bobinado cerrado (colector) con cuatro tomas a 90° y tres a 120° dejando una toma común a ambas disposiciones y un bobinado trifásico en estrella. Como se ve en la figura 7, el colector tiene dos juegos de escobillas, (cada uno con cuatro escobillas a 90° entre sí), y uno de estos juegos tiene la particularidad de ser continuamente rotatorio y está conectado a cuatro anillos colectores. También se puede bloquear en cualquier posición angular que se desee, pues se provee una escala en grados.

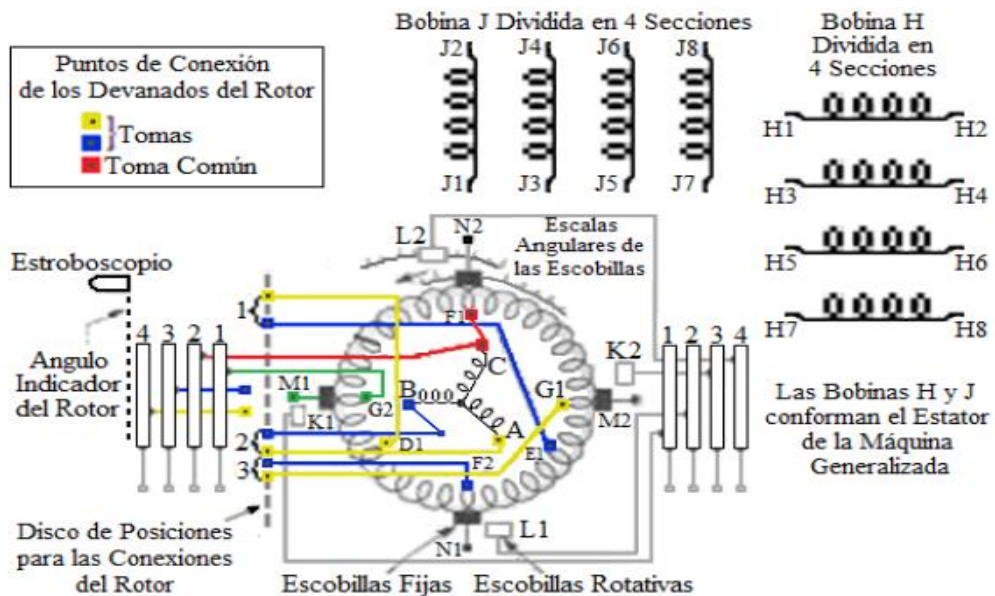


Figura 7. Panel gráfico de la disposición de las bobinas del rotor y del estator de la máquina generalizada. [4]

Para llevar a cabo cualquiera de las tres configuraciones posibles en las que se permite conectar la máquina, según el manual, existe un disco con tres posiciones ajustables mecánicamente por medio de dos (2) pernos, que se encarga de establecer internamente en la máquina generalizada las conexiones a estos devanados como se aprecia en figura 8.



Figura 8. Disco ajustable del rotor de la máquina generalizada. [4]

Una de las particularidades del conjunto que conforma la máquina generalizada, es la existencia de un estroboscopio, el cual permite observar el ángulo de carga de la misma cuando esta se encuentra funcionando, por ejemplo, como máquina sincrónica. Este equipo está compuesto por una lámpara de neón, una escala y un disco fijo al rotor con cuatro flechas marcadas ubicado en el extremo de acoplamiento de la máquina como se puede apreciar en la figura 9.



Figura 9. Estroboscopio de la máquina generalizada. [4]

Además, la maquina generalizada puede ser encendida fijando el rotor en una posición específica, por medio de un volante de mano de manera que la bobina del rotor este a cualquier ángulo deseado respecto al bobinado del estator.

La Máquina de Carga D.C. DY2215

La máquina D.C. que maneja o carga la máquina generalizada es del tipo convencional. Un bobinado reversible serie, está incluido y es a menudo útil para mejorar la estabilidad cuando está conectada a un motor o generador de inducción, síncrono o de otros modos y cuando, tanto la máquina generalizada como la de carga, están conectadas a una corriente A.C y D.C. respectivamente.

El Transductor de Par

El transductor de par tiene como finalidad obtener una tensión proporcional al par que se está aplicando a través de este y para ello consta de ciertos elementos encargados de detectar la torsión y realizar este proceso de conversión a un valor medible de tensión. Estos elementos básicamente son, un tubo de acero rodeado por dos arrollados aislados entre sí, uno es toroidal (bobina 1) y rodea al otro (bobina 2), y los cables dispuestos para poder realizar la medición.

Torquímetro Tipo MTM2 y sus Características Constructivas

El medidor de par hace uso para su operación el “efecto Wiedemann” en el transductor que está basado en la influencia de la torsión en el hierro y que, debido a la diferencia en permeabilidad de tensión y compresión cuando el par es aplicado, las líneas de flujo tienden a seguir rutas espirales a lo largo del eje en vez de seguir circunferencialmente y que como resultado se genera una componente longitudinal del flujo tal como se explicó en el punto anterior. Entonces, por medio de la tensión inducida, el torquímetro MTM2 es capaz de dar una lectura directa del par, pero está

diseñado para darlo en porcentaje. Por otra parte, este instrumento tiene la opción de conectarse a un osciloscopio digital logrando registrar el par.

El equipo consta de una caja de control, un tubo de torsión y un cable de interconexión. El par es indicado por un medidor en la caja de control con escala de 0 a 100%. El par máximo medible en este equipo, indicado en el manual de la máquina, es de 15 lb.ft ó 20,337 N.m con transitorios no superiores a 36 lb.ft ó 48,8088 N.m. Para una deflexión a plena escala el par se puede ajustar a cualquier valor menor de 15 lb.ft = 20,337 N.m, con el ajuste de “sensibilidad” ubicado en el panel de la caja de control. Dicha caja incluye una fuente de alimentación de corriente constante, un oscilador de ondas cuadradas de 1000Hz y un circuito rectificador de fase sensible para manejar el medidor de salida. (Ver el diagrama de este circuito en los anexos).

Tacómetro Generador

El conjunto de la máquina generalizada está conformado por dos tipos de tacómetro generadores, una con una salida D.C. y el otro con una salida A.C. Ambas tienen salidas de tensión proporcionales a la velocidad y tienen fines específicos:

- Tacómetro Generador A.C.

Es un instrumento de corriente alterna montando en el extremo de la máquina de carga, con el que se puede obtener la velocidad del conjunto. La razón principal de proveer este tacómetro generador AC, es permitir que el ángulo de carga bajo condiciones transitorias sea obtenido y registrado cuando la máquina generalizada está funcionando como máquina sincrónica en paralelo con el sistema alimentador, considerando que las condiciones transitorias pueden incluir pérdida de sincronismo.

También es útil para obtener un registro continuo del ángulo de carga durante el funcionamiento sincronizado de la maquina generalizada, incluyendo periodos de pérdida del sincronismo o re sincronismo.

El tacómetro generador AC tiene cuatro polos y al estar acoplado sólidamente al rotor de la máquina generalizada, se produce una forma de onda de voltaje de salida con una fase que varía con el ángulo de carga de la máquina generalizada. La tensión del sistema alimentador y la del tacómetro generador pueden ser dispuestas para proveer, junto con un osciloscopio digital, un registro continuo del ángulo de carga durante condiciones transitorias en un periodo tan largo como se desee. La salida del tacómetro generador A.C. tipo JA es de 26 V r.m.s a 1000 rev/min.

- **Tacómetro Generador DC**

El tacómetro generador DC tipo PA es de 24 V a 1000 rev/min y está perfectamente acoplado al engranaje de las escobillas rotatorias e indica la velocidad de rotación de estas en una de las escalas apropiadas que indica el instrumento.

Motor de Escobillas BD2508B

El pequeño motor en derivación D.C. de 0,3 hp y 220 V controla las escobillas rotatorias llevándolas a cualquier velocidad entre cero y 500 rev/min que es el máximo permitido para la escobilla, y cuya velocidad es indicada por el tacómetro generador D.C. tipo PA ubicado en el panel de control y operaciones.

Las bobinas de campo se pueden conectar directamente a una fuente de tensión nominal y la armadura convenientemente suministrada a través de un reóstato adecuado.

Otros Instrumentos y Equipos Auxiliares

El conjunto de la máquina generalizada cuenta con un panel de control provisto con interruptores y un diagrama mímico con terminales en los puntos adecuados donde los elementos del conjunto están conectados. Estos terminales o conectores tienen dispuestos, tomas listas para la inserción de amperímetros por medio de los “C.T.’s” dentro de los circuitos y también tiene conectores para voltímetros. Además incluye resistores y reóstatos para el control del suministro de la corriente continua a las máquinas y a la carga.

De acuerdo al fabricante, los instrumentos que se utilicen deben cubrir aproximadamente los siguientes rangos:

D.C: Bajo voltaje; 100 V y 250 V \rightarrow 5 A, 10 A y 50 A.

A.C: Bajo voltaje hasta 250 V \rightarrow 10 A y 40 A (con C.T).

Potencia hasta 3 kW.

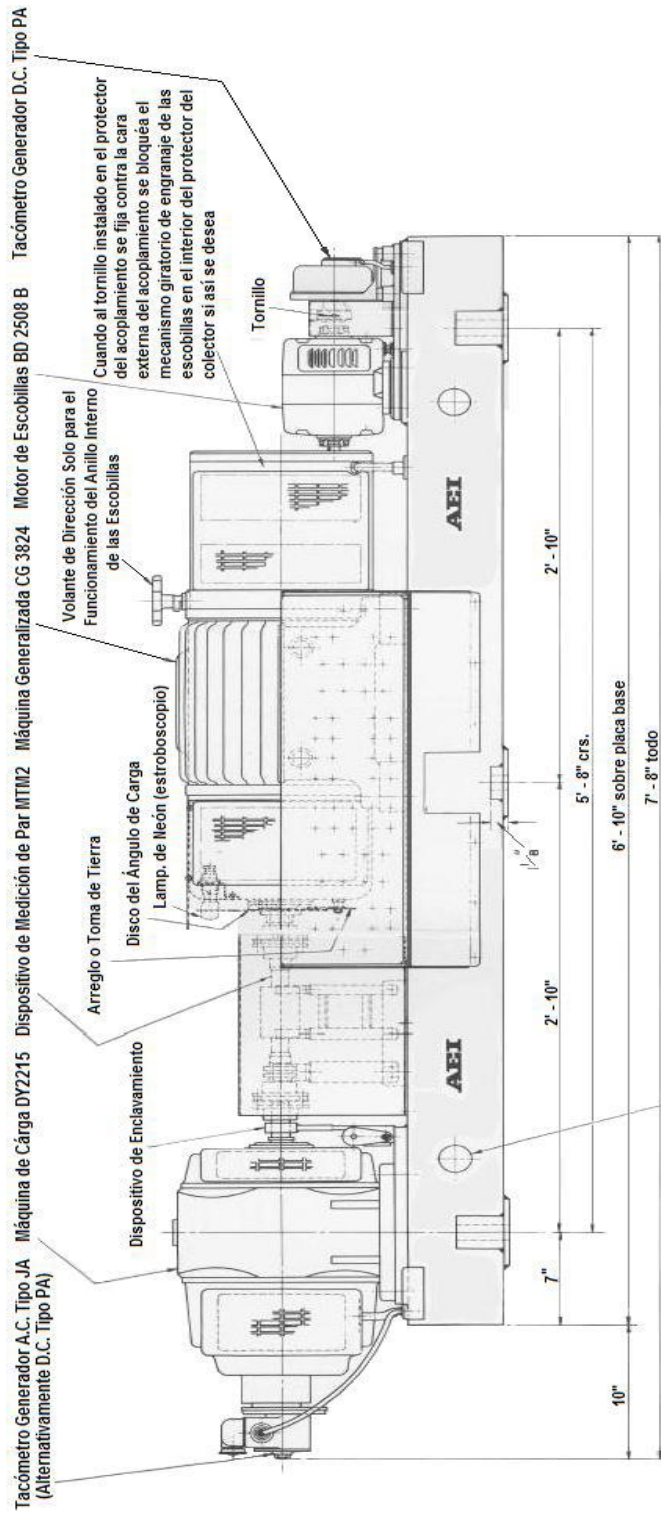


Figura 10. Partes que componen el conjunto de la máquina generalizada. [4]

Tabla 1. Especificaciones de la máquina generalizada modelo CG3824. [4]

DETALLES DE DISEÑO Y BOBINADO			
Maquina Generalizada:	4 polos	Diámetro del Núcleo Exterior: 24,13 cm.	
Longitud total del conjunto:	2,3368 m	Diámetro del Núcleo del Entrehierro: 17,78 cm	
Peso del conjunto:	585,144 kg	Longitud del Núcleo: 15,24 cm.	
		Longitud Radial del Entrehierro: 0,66 mm.	
		Diámetro del Colector: 12,7 cm 95 segmentos	
	Devanado del Estator	Devanados del Rotor	
Tipo	Bifásico 2 ejes distribuidos	Trifásico Conectado en Estrella	Onda Cerrada
N° de Ranuras	32	24	24
Paso de Bobinas	75%	83,3%	100%
N° de Caminos Paralelos	1, 2, 4	1	2
Ranuras Efectivas	10	28	8
Resistencia en Frio (aprox.)	0,21 ohm (4 secciones en serie)	0,47 Ohm por fase	0,10 ohm
Inductancia Total (aprox.)	0,027 H (4 secciones en serie)	0,10 H por fase	0,0054 H
Máx. Corriente Continua (aprox.)	27 A / sección	14A	45 ^a
Tensión a 50 Hz con Flujo Normal	21 V / sección	220V línea	40V
Tensión D.C. a Flujo Normal	-	-	60V a 1500 rev/min
Inductancia mutua entre el estator bobinado en un eje (cuatro secciones en serie) y el rotor bobinado cerrado (con tomas eléctricas a 180°) con un ángulo eléctrico θ entre ejes es $\approx 0.011 \cos\theta$ H			
Momento de Inercia del Rotor		Suministros Eléctricos Necesarios	
Maquina Generalizada 1630.822276 kg cm ² Máquina de Carga 463.541215 kg cm ² Tacómetro 14,749038 kg cm ²		D.C. de 0 a 220V, 27A (45A pico) A.C. de 0 a 220V, 1/3 ph. 50 Hz. 14 ^a	

CAPITULO III

DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS ANALÍTICOS DE LA MÁQUINA GENERALIZADA

Los modelos analíticos de las máquinas eléctricas convencionales y la máquina generalizada, pueden ser notablemente simplificados cuando se realizan las hipótesis apropiadas y se utilizan transformaciones de las coordenadas de las variables de estado, a sistemas de coordenadas donde el comportamiento de estos convertidores se independiza de la posición angular del rotor.

3.1. Modelo de la máquina asincrónica generalizada [5]

Partiendo del modelo circuital de una máquina generalizada real configurada como motor asincrónico, alimentado por el rotor en estrella y con el estator cortocircuitado y en cuadratura tal como trabaja la maquina generalizada modelo CG3824 objeto de este estudio, se plantean las ecuaciones características de tensiones de la fase A del rotor y tensiones del estator del motor asincrónico con las consideraciones del párrafo anterior como se muestra en la figura 11.

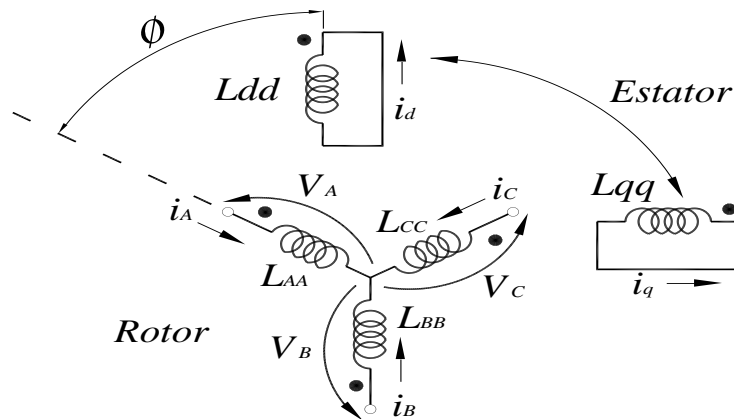


Figura 11. Máquina asincrónica con alimentación por el rotor en estrella y el estator cortocircuitado y en cuadratura. [5]

La tensión en la fase A del rotor viene dada por la siguiente ecuación diferencial:

$$V_A = R_A i_A + \frac{d\lambda_A}{dt} \quad (68)$$

$$V_A = R_A i_A + L_{A\sigma} \frac{di_A}{dt} + L_{AA} \frac{di_A}{dt} + M_{AB} \frac{di_B}{dt} + M_{AC} \frac{di_C}{dt} + \frac{d}{dt} (M_{Ad} i_d + M_{Aq} i_q) \quad (69)$$

Donde:

R_A es la resistencia de la bobina de la fase A del rotor,

$L_{A\sigma}$ es la inductancia de dispersión de la misma fase, y

L_{AA} es la inductancia propia de la fase A,

M_{AB}, M_{AC} es la inductancia mutua entre la fase A del rotor y las fases B y C respectivamente del rotor.

M_{Ad}, M_{Aq} son las inductancias mutuas entre la fase A del rotor y las fases d y q del estator.

Tensiones de los circuitos que conforman el estator:

$$0 = R_d i_d + L_{dd} \frac{di_d}{dt} + L_{d\sigma} \frac{di_d}{dt} + \frac{d}{dt} (M_{dA} i_A + M_{dB} i_B + M_{dC} i_C) \quad (70)$$

$$0 = R_q i_q + L_{qq} \frac{di_q}{dt} + L_{q\sigma} \frac{di_q}{dt} + \frac{d}{dt} (M_{qA} i_A + M_{qB} i_B + M_{qC} i_C) \quad (71)$$

Donde:

R_d es la resistencia de la bobina de la fase d del estator,

R_q es la resistencia de la bobina de la fase q del estator,

$L_{d\sigma}$ es la inductancia de dispersión de la misma fase, y

L_{dd} es la inductancia propia de la fase d

L_{qq} es la inductancia propia de la fase q

M_{dA}, M_{dB}, M_{dC} son las inductancias mutuas entre la fase d del estator y las fases A, B y C del rotor.

M_{qA}, M_{qB}, M_{qC} son las inductancias mutuas entre la fase q del estator y las fases A, B y C del rotor.

Si se tiene en cuenta que las inductancias mutuas entre las bobinas del rotor vienen dadas por:

$$M_{AB} = M_{AC} = M_{BC} = L_{AA} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}L_{AA} \quad (72)$$

Donde:

$$L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = \frac{(n_{rot}m_{rot})^2 \mu_0 l r \pi}{4\delta} = (n_{rot}m_{rot})^2 k' \quad (73)$$

Y además: $k' = \frac{\mu_0 l r \pi}{4\delta} \quad (74)$

Por otro lado se tiene que:

$$M_{dA} = M'_{dA} \cos(p\theta) \quad (75)$$

$$M_{qA} = M'_{dA} \cos(p\theta - \pi/2) \quad (76)$$

$$M_{dB} = M'_{dA} \cos(p\theta - 2\pi/3) \quad (77)$$

$$M_{qB} = M'_{dA} \cos(p\theta - (2\pi/3 + \pi/2)) \quad (78)$$

$$M_{dC} = M'_{dA} \cos(p\theta - 4\pi/3) \quad (79)$$

$$M_{qC} = M'_{dA} \cos(p\theta - (4\pi/3 + \pi/2)) \quad (80)$$

Donde:

$$M'_{dA} = (n_{est}m_{est})(n_{rot}m_{rot})k' \quad (81)$$

p = pares de polos

$n_{est}; n_{rot}$ = número de espiras del estator y rotor, respectivamente.

Las corrientes que circulan por el circuito del rotor de la máquina en régimen permanente se asumen balanceadas, por lo tanto:

$$i_A = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t) \quad (82)$$

$$i_B = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (83)$$

$$i_C = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t - 4\pi/3) \quad (84)$$

Donde I_1 es el valor eficaz de la corriente y ω es la frecuencia angular.

Sustituyendo (75), (76), (77), (82), (83) y (84) en lo que se encuentra dentro del paréntesis de (70), queda:

$$M'_{dA}I_1(\cos(p\theta) \cos(\omega t) + \cos(p\theta - 2\pi/3) \cos(\omega t - 2\pi/3) + \cos(p\theta - (4\pi/3 + \pi/2)) \cos(\omega t - 4\pi/3)) \quad (85)$$

Si: $\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta \quad (86)$

Al aplicar la propiedad (86) en la ecuación (85) se tiene que:

$$\frac{3}{2}M'_{dA}I_1 \cos(\omega t - p\theta) \quad (87)$$

Al sustituir (87) en (70) queda:

$$0 = R_d i_d + L_{dd} \frac{di_d}{dt} + L_{d\sigma} \frac{di_d}{dt} + \frac{3}{2} M'_{dA} \frac{d}{dt} (I_1 \cos(\omega t - p\theta)) \quad (88)$$

Por otro lado, sustituyendo (75), (76), (77), (82), (83) y (84) en lo que se encuentra dentro del paréntesis de (71), queda:

$$\begin{aligned} M'_{dA} I_1 & \left(\cos\left(p\theta - \frac{\pi}{2}\right) \cos(\omega t) \right. \\ & + \cos(p\theta - (2\pi/3 + \pi/2)) \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ & \left. + \cos(p\theta - (4\pi/3 + \pi/2)) \cos(\omega t - 4\pi/3) \right) \end{aligned} \quad (89)$$

Aplicando la propiedad trigonométrica (86) en (89) queda:

$$\frac{3}{2} M'_{dA} I_1 \cos(\omega t - p\theta + \pi/2) \quad (90)$$

Luego, al sustituir (90) en (71) queda:

$$0 = R_q i_q + L_{qq} \frac{di_q}{dt} + L_{q\sigma} \frac{di_q}{dt} + \frac{3}{2} M'_{dA} \frac{d}{dt} (I_1 \cos(\omega t - p\theta + \pi/2)) \quad (91)$$

Por otro lado se sabe que en un sistema balanceado de corrientes $i_A + i_B + i_C = 0$, entonces:

$$i_A = -(i_B + i_C) \quad (92)$$

Al sustituir (92) en (69), y además teniendo en cuenta (72), La ecuación de la tensión en la fase A del rotor se reduce a:

$$V_A = R_A i_A + L_{1\sigma} \frac{di_A}{dt} + \frac{3}{2} L_{AA} \frac{di_A}{dt} + \frac{d}{dt} (M_{Ad} i_d + M_{Aq} i_q) \quad (93)$$

Relación entre las corrientes i_d e i_q . Usando (88) y (91) en el dominio de la frecuencia:

$$0 = R_d \bar{I}_d + j(\omega - p\omega_{mec})(L_{dd} + L_{d\sigma})\bar{I}_d + j(\omega - p\omega_{mec})\frac{3}{2}M'_{dA}\bar{I}_A \quad (94)$$

$$0 = R_q \bar{I}_q + j(\omega - p\omega_{mec})(L_{dd} + L_{d\sigma})L_{qq}\bar{I}_q + j(\omega - p\omega_{mec})\frac{3}{2}M'_{dA}\bar{I}_A e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (95)$$

Si por otro lado se tiene que $R_d = R_q$ y $L_{dd} = L_{qq}$, al dividir (95) entre (94) queda:

$$\bar{I}_q = \bar{I}_d e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (96)$$

De (96), se propone que las corrientes del estator sean las siguientes:

$$i_d = \sqrt{2}I_2 \cos((\omega - p\omega_{mec})t + \varphi) \quad (97)$$

$$i_q = \sqrt{2}I_2 \cos((\omega - p\omega_{mec})t + \varphi + \pi/2) \quad (98)$$

Al sustituir (97), (98), (75) y (76) en (93) queda:

$$\begin{aligned}
 V_A = R_A i_A + L_{1\sigma} \frac{di_A}{dt} + \frac{3}{2} L_{AA} \frac{di_A}{dt} \\
 + \sqrt{2} I_2 M'_{Ad} (\cos(p\omega_{mec}t) \cos((\omega - p\omega_{mec})t + \varphi)) \\
 + \cos(p\omega_{mec}t - \pi/2) \cos((\omega - p\omega_{mec})t + \varphi + \pi/2))
 \end{aligned} \quad (99)$$

Usando la propiedad (86) en la ecuación (99) queda:

$$V_A = R_A i_A + L_{1\sigma} \frac{di_A}{dt} + \frac{3}{2} L_{AA} \frac{di_A}{dt} + M'_{Ad} \frac{d}{dt} (\sqrt{2} I_2 \cos(\omega t + \varphi)) \quad (100)$$

La ecuación (100), junto con (94) y (95) forman un sistema de ecuaciones que permiten obtener el circuito equivalente de una fase de la máquina y en el dominio de la frecuencia quedan:

$$\bar{V}_A = R_A \bar{I}_A + j\omega L_{1\sigma} \bar{I}_A + j \frac{3}{2} \omega L_{AA} \bar{I}_A + j\omega M'_{Ad} \bar{I}_d \quad (101)$$

$$0 = R_d \bar{I}_d + j(\omega - p\omega_{mec})(L_{dd} + L_{d\sigma}) \bar{I}_d + j(\omega - p\omega_{mec}) \frac{3}{2} M'_{dA} \bar{I}_A \quad (102)$$

$$0 = R_q \bar{I}_q + j(\omega - p\omega_{mec})(L_{dd} + L_{d\sigma}) L_{qq} \bar{I}_q + j(\omega - p\omega_{mec}) \frac{3}{2} M'_{dA} \bar{I}_A \quad (103)$$

Con (101) y (102) se obtiene el circuito equivalente.

Al multiplicar (102) por:

$$\left(\frac{n_{rot} m_{rot}}{n_{est} m_{est}} \right) = k \quad (104)$$

Queda:

$$0 = kR_d\bar{I}_d + j(\omega - p\omega_{mec})(L_{dd} + L_{d\sigma})k\bar{I}_d + j(\omega - p\omega_{mec})\frac{3}{2}M'_{dA}k\bar{I}_A \quad (105)$$

La corriente \bar{I}_d se refiere al rotor:

$$\bar{I}_d = k\bar{I}'_d \quad (106)$$

Donde \bar{I}'_d es la corriente i'_d del estator referida al rotor. Al sustituir (106) en (105) queda:

$$0 = k^2R_d\bar{I}'_d + j(\omega - p\omega_{mec})(L_{dd} + L_{d\sigma})k^2\bar{I}'_d + j(\omega - p\omega_{mec})\frac{3}{2}M'_{dA}k\bar{I}_A \quad (107)$$

Donde $M'_{dA}k = L_{AA}$ (108)

Si: $L_{dd}k^2 = L_{AA}$ (109)

Entonces (107) se transforma en lo siguiente:

$$0 = R'_d\bar{I}'_d + j(\omega - p\omega_{mec})(L_{AA} + L_{d\sigma})\bar{I}'_d + j(\omega - p\omega_{mec})\frac{3}{2}L_{AA}\bar{I}_A \quad (110)$$

Donde: $R'_d = R_dk^2$, $I'_d = \frac{I_d}{k}$ y $L'_{d\sigma} = L_{d\sigma}k^2$

Si el deslizamiento se define como: $s = \frac{\omega - p\omega_{mec}}{\omega}$ (111)

Al dividir (110) entre el deslizamiento s (111) queda:

$$0 = \frac{R'_d}{s} \bar{I}'_d + j\omega(L_{AA} + L_{d\sigma}) \bar{I}'_d + j\omega \frac{3}{2} L_{AA} \bar{I}_A \quad (112)$$

Al pasar \bar{I}'_d en el dominio del rotor en (101) queda:

$$\bar{V}_A = R_A \bar{I}_A + j\omega L_{A\sigma} \bar{I}_A + j \frac{3}{2} \omega L_{AA} \bar{I}_A + j\omega L_{AA} \bar{I}'_d \quad (113)$$

Trasformando (112) y (113) queda:

$$0 = \frac{3R'_d}{2s} \left(\frac{2}{3} \bar{I}'_d \right) + j\omega \frac{3}{2} L'_{d\sigma} \left(\frac{2}{3} \bar{I}'_d \right) + j\omega \frac{3}{2} L_{AA} \left(\frac{2}{3} \bar{I}'_d \right) + j\omega \frac{3}{2} L_{AA} \bar{I}_A \quad (114)$$

$$\bar{V}_A = R_A \bar{I}_A + j\omega L_{A\sigma} \bar{I}_A + j \frac{3}{2} \omega L_{AA} \bar{I}_A + j\omega \frac{3}{2} L_{AA} \left(\frac{2}{3} \bar{I}'_d \right) \quad (115)$$

Se define una nueva corriente:

$$I''_d = \frac{2}{3} I'_d \quad (116)$$

Entonces (114) y (115) quedan de la siguiente forma:

$$0 = \frac{3R'_d}{2s} I''_d + j\omega \frac{3}{2} L'_{d\sigma} I''_d + j\omega \frac{3}{2} L_{AA} (\bar{I}_A + I''_d) \quad (117)$$

$$\bar{V}_A = R_A \bar{I}_A + j\omega L_{A\sigma} \bar{I}_A + j \frac{3}{2} \omega L_{AA} (\bar{I}_A + I''_d) \quad (118)$$

Por último, con (117) y (118) se obtiene el circuito equivalente o modelo de la máquina asincrónica con alimentación por el rotor en estrella y el estator cortocircuitado y en cuadratura, de la máquina generalizada tal como se muestra en figura 12.

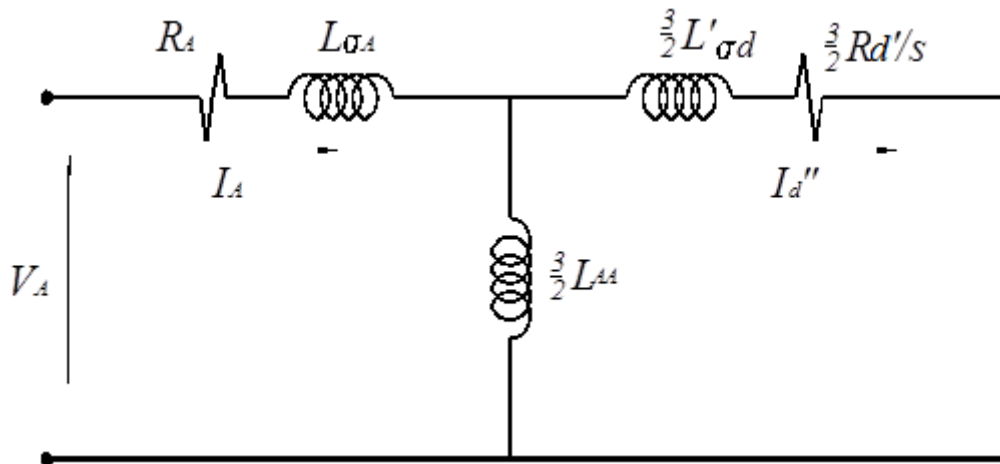


Figura 12. Circuito equivalente o modelo de la máquina asincrónica con alimentación por el rotor en estrella y el estator cortocircuitado. [5]

Donde: $I_d'' = \frac{2}{3} \frac{I_d}{k}$; $R_d' = R_d k^2$; $L'_{d\sigma} = L_{d\sigma} k^2$

En el modelo planteado, las pérdidas son despreciadas, así como las caídas de tensión en las escobillas, sin embargo, basta con agregar la resistencia de pérdidas en el núcleo R_{fe} y de ser necesario, agregar una fuente de tensión en la dirección de la corriente dependiendo del modo de funcionamiento como motor o como generador, por lo que el circuito resultante queda de la siguiente manera:

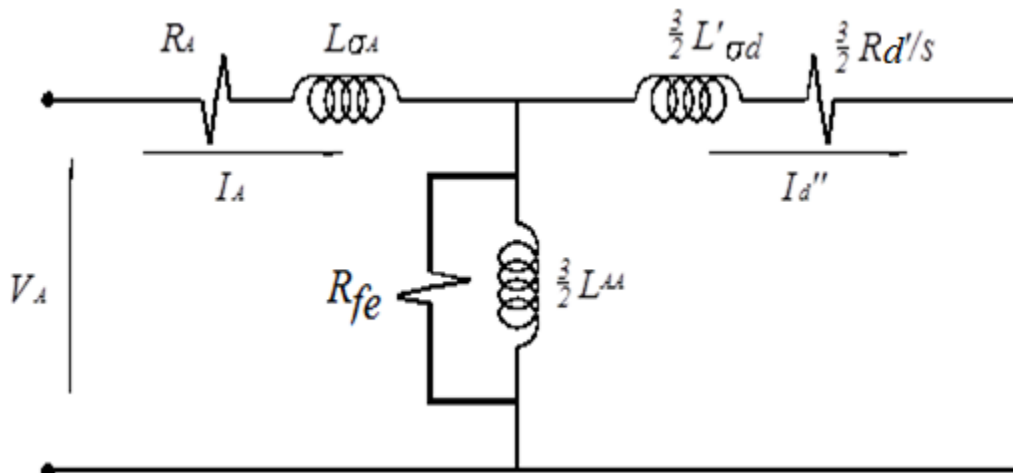


Figura 13. Circuito equivalente o modelo de la máquina asíncrona con alimentación por el rotor en estrella y el estator cortocircuitado considerando las pérdidas en el núcleo y sin considerar el efecto de las escobillas en el rotor.

Donde,

V_A , es la tensión de alimentación del rotor.

R_A , es la resistencia del devanado del rotor

I_A , es la corriente del rotor cuyo sentido depende de si es motor o generador.

$L_{\sigma A}$, es la inductancia de dispersión del devanado del rotor.

R_{fe} , representa las pérdidas en el núcleo.

$\frac{3}{2}L_{AA}$, es la inductancia de magnetización.

$\frac{3}{2}L'_{\sigma d}$, es la inductancia de dispersión del devanado del estator

I''_d , es la corriente del circuito del estator

$\frac{3}{2}R'_{d/S}$, es la resistencia del estator con dependencia del deslizamiento S.

3.2. Modelo de la máquina sincrónica [1]

Del conocimiento de la representación matricial del comportamiento de los ejes eléctricos de la máquina sincrónica en el sistema de coordenadas correspondiente a las bobinas reales o físicas, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$[v_{abc,f}] = [R_{abc,f}][i_{abc,f}] + \frac{d}{dt} [\lambda_{abc,f}] \quad (119)$$

Donde;

a, b y c, representan los arrollados de fase del rotor de la máquina generalizada.

Se sabe, además que, en los sistemas lineales, la relación entre las corrientes que circulan por las bobinas y los enlaces de flujo que las enlazan vienen dados por la relación:

$$[\lambda_{abc,f(\theta,i)}] = [L_{abc,f(\theta)}][i_{abc,f}] \quad (120)$$

Al sustituir dicha relación en la expresión (119) se obtiene la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{aligned} [v_{abc,f}] &= [R_{abc,f}][i_{abc,f}] + [L_{abc,f(\theta)}] \frac{d}{dt} [i_{abc,f}] + \frac{d\theta}{dt} \frac{d}{dt} [L_{abc,f}][i_{abc,f}] \\ &= [R_{abc,f}][i_{abc,f}] + [L_{abc,f(\theta)}] p [i_{abc,f}] + \dot{\theta} [\tau_{abc,f}][i_{abc,f}] \end{aligned} \quad (121)$$

El resultado es un sistema de ecuaciones diferenciales que representa el comportamiento dinámico de las bobinas de la máquina sincrónica en coordenadas primitivas el cual puede ser expresado en forma canónica de la siguiente forma:

$$p[i_{abc,f}] = [L_{abc,f}]^{-1} \{ [v_{abc,f}] - [[R_{abc,f}] + \dot{\theta}[\tau_{abc,f}]] [i_{abc,f}(\theta)] \} \quad (122)$$

La matriz de inductancia $[L_{abc,f}]$ depende de la posición relativa θ del rotor con respecto al estator, por lo que la matriz de transición de estado también depende de la posición angular del rotor. Al considerar que la velocidad de la máquina es constante, la posición angular del rotor es:

$$\theta = \theta_o + \omega_m t \quad (123)$$

La solución de la ecuación (122) tiene una alta complejidad numérica debido a la dependencia de la posición angular θ , por lo que se recomienda el uso de la transformación de coordenadas.

Para eliminar la dependencia que tienen las ecuaciones de la posición angular θ , es posible referir las variables del estator al sistema de referencia del rotor, el cual se encuentra exactamente en la posición θ con respecto al sistema solidario con el estator. Por esta razón es posible multiplicar la ecuación del estator por $e^{-j\theta}$ para referir estas ecuaciones a un sistema de coordenadas sincronizado con el eje del campo. Este nuevo sistema de coordenadas es el deducido anteriormente conocido como ejes d y q .

El eje directo d apunta en la misma dirección que el eje del campo f y el eje en cuadratura q se encuentra a 90° en adelante con respecto al eje d . De esta forma se pueden introducir las siguientes definiciones:

$$\mathbf{v}_e^{dq} \equiv v_d + jv_q = \mathbf{v}_e e^{-j\theta} \quad (124)$$

$$\mathbf{i}_e^{dq} \equiv i_d + ji_q = \mathbf{i}_e e^{-j\theta} \quad (125)$$

Las cuales, permiten encontrar la solución de la ecuación para el comportamiento dinámico de la máquina, sin embargo, el estudio se limita al análisis en estado permanente y además, considerando que la máquina generalizada sincrónica es de rotor liso, las reactancias del eje directo y del eje en cuadratura que se deducen a través de la transformación de coordenadas son iguales y se denomina entonces reactancia sincrónica X_s .

Para la máquina sincrónica bajo estudio, cuyo circuito de campo está en el estator, de rotor liso se tiene la siguiente relación para régimen permanente:

$$V_r = V_d + V_q = (R_r + jX_s)(I_d + jX_q) + jE_f = (R_r + jX_s)I_e + E_f \quad (126)$$

En la figura 14 se presenta el circuito equivalente en convención motor, de la máquina sincrónica de rotor liso en régimen permanente equilibrado. El circuito equivalente de la máquina sincrónica de rotor liso permite una interpretación simple de las ecuaciones. Esta máquina se comporta como una fuente equivalente de Thévenin, cuya tensión de circuito abierto es la fuerza electromotriz que produce la corriente de campo sobre la armadura, en este caso sobre el rotor, y la impedancia de Thévenin está formada por la resistencia de las bobinas de armadura y por la reactancia sincrónica.

La reactancia sincrónica modela la desmagnetización ocasionada por la circulación de la corriente de armadura.

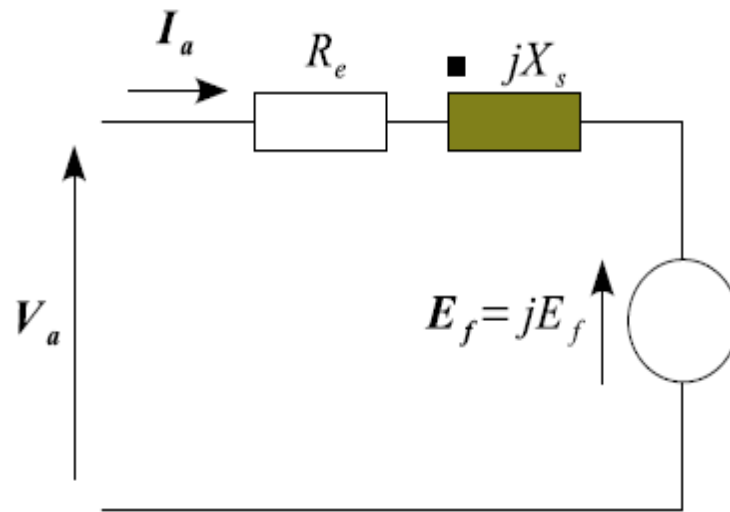


Figura 14. Modelo circuital de la máquina síncrona convencional. [1]

Para el caso de la máquina generalizada, cuando trabaja como máquina síncrona, la misma tiene una excitación dc en el estator de la máquina, sin embargo, el principio de funcionamiento a diferencia de la máquina asíncrona, es similar al deducido en esta sección con las consideraciones pertinentes. Por lo tanto, el circuito equivalente para la máquina síncrona generalizada será el indicado en la figura 15.

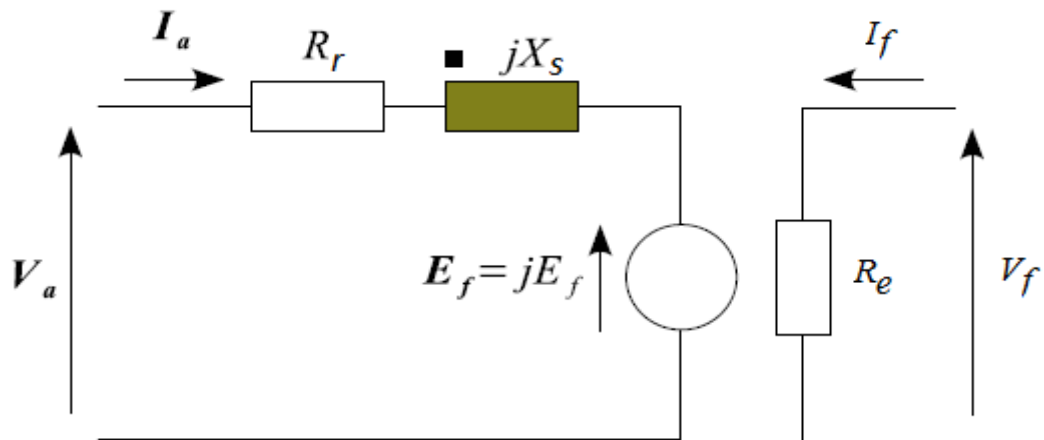


Figura 15. Modelo circuital de la máquina síncrona generalizada.

Donde,

- V_a Tensión en bornes de la máquina
- I_a Corriente de armadura o de rotor
- R_r Resistencia del rotor
- X_S Reactancia sincrónica
- E_f Tensión inducida por el campo
- I_f Corriente de campo
- R_e Resistencia del estator
- V_f Tensión dc del campo o de la excitación

La dirección de I_a dependerá únicamente de si la máquina trabaja como motor o como generador.

3.3. Modelo de la máquina DC [1]

La máquina de corriente continua es una máquina con conmutador cuyo comportamiento puede ser modelado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha e} \\ v_{\beta e} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + L_e p & 0 & L_{er} p & 0 \\ 0 & R_e + L_e p & 0 & L_{er} p \\ L_{er} p & \dot{\theta} L_{er} & R_r + L_r p & \dot{\theta} L_r \\ -\dot{\theta} L_{er} & L_{er} p & -\dot{\theta} L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha e} \\ i_{\beta e} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (127)$$

$$T_m = (i_{\beta e} i_{dr} - i_{\alpha e} i_{qr}) + J\theta + \rho \dot{\theta} \quad (128)$$

Las diferentes conexiones de las máquinas de corriente continua convencionales se pueden analizar considerando la existencia de una bobina en el estator orientada en la dirección del eje β , y una bobina en el rotor orientada en la

dirección del eje d , que se encuentran accesibles mediante un par de escobillas tal como se ilustra en la figura 16.

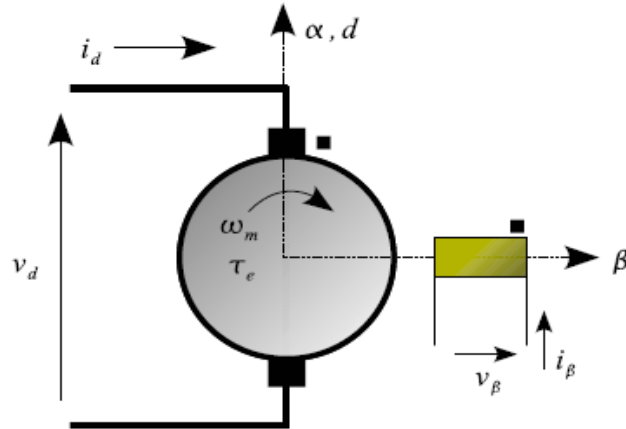


Figura 16. Representación de la máquina dc convencional. [1]

Con el modelo analítico planteado para la máquina de corriente continua, denominando G al coeficiente de generación, que representa la inductancia mutua entre el rotor y el estator, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{bmatrix} v_\beta \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + L_e p & 0 \\ \dot{\theta} G & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\beta \\ i_d \end{bmatrix} \quad (129)$$

$$T_m = -G i_d i_\beta + J \ddot{\theta} + \rho \dot{\theta} \quad (130)$$

El modelo en estado permanente de la máquina convencional es similar al de la máquina generalizada, sin embargo, para los alcances del presente trabajo, se analiza únicamente el caso de máquina dc independiente y además, en estado permanente, por lo que el modelo resultante es el siguiente:

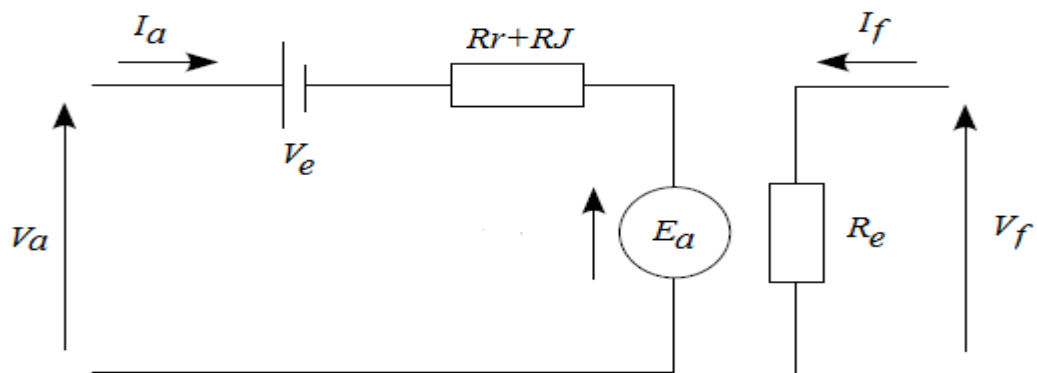


Figura 17. Circuito equivalente de la máquina dc independiente

Donde,

V_a	Tensión en bornes de la máquina
I_a	Corriente de armadura de la máquina
V_e	Tensión en las escobillas
$R_r + R_J$	Resistencia del rotor y del devanado estatórico J
E_a	Tensión inducida
I_f	Corriente de campo
R_e	Resistencia del estator
V_f	Tensión de campo o de excitación

La tensión en las escobillas tendrá la dirección dependiendo del modo de funcionamiento, es decir, si la máquina es conectada como motor o como generador, lo mismo ocurre con la corriente de armadura.

La resistencia del rotor está conformada por la propia del devanado del rotor, más una porción del devanado del estator de la máquina.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA GENERALIZADA MODELO CG3824 FABRICADA POR LA ASSOCIATED ELECTRICAL INDUSTRIES Ltd (A.E.I.)

4.1. Medición de resistencia de los diferentes devanados de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824

Como experimento primordial para caracterizar cualquier tipo de máquina eléctrica, es necesario llevar a cabo las mediciones resistivas de los devanados que conforman la misma.

Para la máquina generalizada se realizó el estudio de las resistencias tanto del rotor como del estator para las configuraciones de máquina asincrónica trifásica y sincrónica trifásica las cuales poseen una conexión en estrella del circuito del rotor según la figura 7 y una conexión en serie de los devanados estatóricos. También se tendrá una configuración del rotor particular para la máquina dc independiente.

4.1.1. Descripción de la prueba de medición de resistencias según norma IEEE 118-1978 / IEC 60034-4 1995 [6] [7]

La medición de resistencia de los devanados tanto del estator, como del rotor de una máquina eléctrica rotativa permite cuantificar el valor resistivo de dichos devanados. De esta manera, puede ser posible la modelación del comportamiento de la máquina, o la predicción del funcionamiento de la misma ante diferentes condiciones de trabajo. Por lo general, el método de medición de resistencia para los devanados es el mismo para los diferentes tipos de máquinas, a menos que el fabricante o las condiciones externas ameriten un procedimiento especial.

Existen diferentes métodos descritos en la norma *IEEE Std 118-1978 Standard Test Code for Resistance Measurement* [6], así como en la norma *IEC 60034-4 NTC 1515* [7].

En la norma IEEE 118 1978 [6], se especifican los métodos más apropiados para la medición de resistencia, según los rangos de valores óhmicos y de la precisión requerida. Para ello, la norma hace una distinción llamando valores bajos, medios y altos de resistencia aquellos que se encuentran en un rango menor a 5Ω , entre 5 y 10Ω y mayores a 10Ω , respectivamente.

La norma IEC 60034-4 [7], especifica que los métodos apropiados para la medición de resistencias de devanados del rotor y estator son el método voltímetro – amperímetro y el puente sencillo o doble, sin embargo, este último es aplicado solo para devanados cuyo valor óhmico es superior a 1Ω .

4.1.1.1. Método de Voltímetro-Amperímetro

La sección 4.1 de la norma IEEE Std 118-1978 [6] establece que el circuito básico para la medición de valores bajos de resistencia por medio del método de voltímetro amperímetro viene dado por la figura 18.

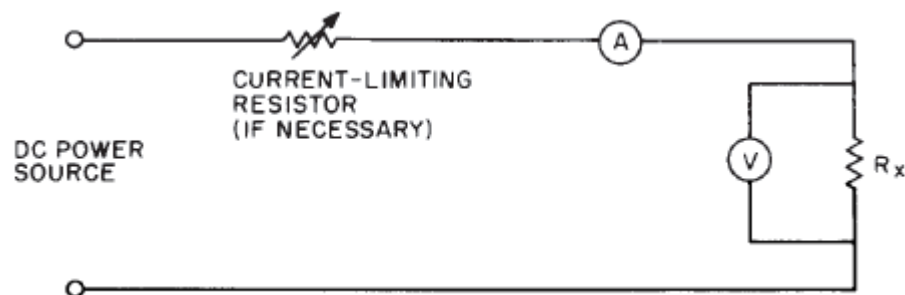


Figura 18. Método de medición voltímetro-amperímetro para valores bajo de resistencia. [6]

Además, establece que el valor de la resistencia R_x se obtiene de la siguiente ecuación:

$$R_x = \frac{V - IR_a}{I} \quad (131)$$

Donde V es la lectura del voltímetro, I es la lectura del amperímetro y R_a es la resistencia interna del voltímetro. También es utilizada una resistencia limitadora de corriente, en caso de ser necesaria.

Para valores bajos de resistencia, R_x puede ser un dispositivo de cuatro terminales y el voltímetro puede ser un milivoltímetro usado con escala calibrada. El mismo apartado, además, especifica el circuito, las características de los equipos de medición y las fórmulas a utilizar en la aplicación de este método para valores medios y altos de resistencia.

Existen además los métodos de puente que presentan mayor preciso de medición de resistencia.

Sin embargo, la razón del uso del método voltímetro – amperímetro es que el mismo, permite calcular la tensión de las escobillas mediante un método gráfico y además, conseguir el valor óhmico del devanado despreciando el efecto resistivo que genera la presencia de las escobillas.

Para el cálculo de la resistencia partiendo de este método se procede a registrar al menos 4 o más mediciones de tensión y corriente.

Por lo general, para las mediciones, la corriente no puede exceder el 15% de su valor nominal, debido a que se generaría un calentamiento excesivo del aislamiento de los devanados que puede reflejarse en un envejecimiento o daño

permanente del mismo, sin embargo, para el caso del rotor de la máquina, donde se tiene la presencia de escobillas, es necesario llegar a un valor de corriente cercano al nominal de tal forma de poder obtener una representación gráfica, cuya zona lineal represente el valor óhmico deseado. Se debe tener suma precaución en realizar dicha prueba lo más rápido posible debido a las altas temperaturas del aislamiento que puede llevar la acción de someter el devanado a una alta corriente directa por un tiempo prolongado [6].

Una vez obtenido los valores con los instrumentos de medición adecuados, se procede a realizar la aplicación de las siguientes ecuaciones para llegar a obtener el valor real con su respectiva incertidumbre.

La ecuación (132), simplemente es la ecuación de Ohm, donde se divide la magnitud de la tensión entre la corriente observada en cada medición.

$$R_x = \frac{V_x}{I_x} \quad (132)$$

La ecuación (133), arroja el valor de la incertidumbre indirecta de la medición partiendo de las incertidumbres de los instrumentos de medición.

$$\Delta R_x = \left| \frac{\delta R_x}{\delta V_x} \right| \Delta V_x + \left| \frac{\delta R_x}{\delta I_x} \right| \Delta I_x = \left| \frac{1}{I_x} \right| \Delta V_x + \left| \frac{\delta R_x}{I_x^2} \right| \Delta I_x \quad (133)$$

Al obtener una tabla con al menos cuatro mediciones, se debe proceder a obtener un promedio tanto de la magnitud como de la incertidumbre de cada medición para llegar a unos valores previos.

$$R_{xprom} = \frac{R_{x1} + R_{x2} + \dots + R_{xn}}{n} \quad (134)$$

$$\Delta R_{xprom} = \frac{\Delta R_{x1} + \Delta R_{x2} + \dots + \Delta R_{xn}}{n} \quad (135)$$

Por último, la ecuación (136) permite corregir el valor de resistencia obtenido, cuyo método se explica en la norma IEEE Std 118-1978 [6].

$$R_1 = R_2 * \frac{(k + t_1)}{(k + t_2)} \quad (136)$$

Donde,

R_1 = Resistencia del devanado en ohmios (Ω) a temperatura estándar t_1 ($^{\circ}\text{C}$)

R_2 = Resistencia del devanado en ohmios (Ω) a temperatura estándar t_2 ($^{\circ}\text{C}$)

$k = 234,5^{\circ}$ para el cobre

t_1 = Temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$) (Para la máquina generalizada se toma igual a 75°C , ya que el aislamiento es clase A [8]).

t_2 = Temperatura de la prueba ($^{\circ}\text{C}$).

La aplicación del método voltímetro – amperímetro, permite, encontrar la tensión en las escobillas para lo cual es necesario hacer circular una corriente cercana a la nominal por el devanado (incluyendo las escobillas), de tal forma de obtener dicha tensión y que la misma no afecte la magnitud resistiva obtenida. Para lograr tal fin, se deberán graficar los diferentes puntos de tensión vs corriente y se apreciará como la curva tiene inicialmente una pendiente fuerte, y a partir de cierto valor esta disminuye.

Se debe trazar la curva que generan los puntos y separar la curva en dos porciones de tal forma de trazar rectas tangentes a las pendientes mencionadas.

Se tendrá que la porción inicial de la curva incluirá la resistencia deseada más la tensión en las escobillas, y la segunda porción únicamente vendrá dada por la resistencia del devanado, es decir, se desprecia la tensión en las escobillas.

La intersección de la recta tangente en la porción de menor pendiente, con el eje de tensión, será el valor de la tensión en las escobillas.

Por otro lado, este método de forma similar al explicado en la norma IEC 60034-4 [7], pero especifica ciertas condiciones, para evitar daños en el devanado, como por ejemplo, condiciona el tiempo de aplicación de la prueba a menos de 1 minuto y aplicando una corriente inferior al 10% del devanado, esto, para evitar el calentamiento de los devanados.

También, la toma de las mediciones debe ser en el momento en el que las agujas estén detenidas ya que se estaría despreciando la etapa transitoria.

Además, la norma IEC 60034-4 [7], sugiere que la temperatura debe ser medida por detectores térmicos incorporados o situados en la parte interna, si existen, pero la máquina generalizada no cuenta con este instrumento, por lo que la misma fue medida por un instrumento laser.

El hecho de que ambos métodos de cada norma sean similares, sugiere la aplicación del mismo y será más considerada, la especificada por IEEE 118-1978 [6].

4.1.1.2. Efectos ambientales en la medición de resistencia

Al momento de la medición de la resistencia, la misma se puede ver afectada por efectos ambientales como temperatura, humedad, presión atmosférica y corrosión química y biológica. Todos estos factores pueden ser tomados en cuenta cuando se amerita un alto grado de precisión, sin embargo, la temperatura, es el parámetro que

más influye en la medición y por ende es el que más se considera. La mayoría de los metales puros tienen un coeficiente de aproximadamente 0,4% por grado Celcius. Varias aleaciones de resistencia de precisión tienen coeficiente de temperaturas de aproximadamente 0,4% por grado Celcius sobre un rango de al menos 50 grados.

4.1.1.3. Efectos de autocalentamiento en la medición de resistencia

La corriente utilizada en la medición del valor de resistencia de un devanado puede generar cambios en su magnitud a causa del efecto Joule generado por un incremento en la temperatura por disipación de calor debido a la circulación de corriente por el material del devanado. Este efecto limita la corriente permisible y por ende la sensibilidad de la medición. Cuando el devanado es de cobre o aluminio este efecto es proporcional al cuadrado de la corriente aplicada. Para pequeños devanados, la corriente no debe exceder el 15% de la corriente nominal del devanado, esto porque el efecto de autocalentamiento es más considerable a medida que el devanado es más pequeño. En el caso de devanados tan masivos que la medición pueda ser llevada a cabo antes de que la temperatura nominal sea alcanzada, el error será menor y además puede ser utilizada una corriente de entre 25 y 50% del valor nominal del devanado. Es importante conocer la temperatura del devanado al momento de la medición, si la misma se busca con el objetivo de calcular eficiencia (después de corregir el valor a una referencia apropiada de temperatura) o como base para medir incrementos de temperatura. Ningún calentamiento por previa operación o por corrientes de medición aplicadas de forma prolongadas se debe permitir.

4.1.2. Medición de la resistencia del estator

Como se explicó en el capítulo 2, la máquina generalizada modelo CG3824, cuenta con dos arrollados estáticos en cuadratura, cada uno con un grupo de cuatro arrollados. Para la caracterización requerida para los tipos de máquinas analizados, únicamente se requiere el valor óhmico de cada grupo de bobinas por separado y el

valor total. La corriente nominal de dichos devanados es de 27 A. Por lo tanto, bajo la aplicación del método voltímetro – amperímetro se obtuvieron los siguientes valores a una temperatura de medición de 26°C medida con un instrumento láser con el que cuenta el Laboratorio de Máquinas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica UCV y con una temperatura de referencia de 75°C [8]:

Tabla 2. Resistencia del estator, bobinas entre H1-H8

Corriente [A]	Tensión [mV]	Resistencia [Ω]
1,5 \pm 0,1	441,0 \pm 0,1	0,294 \pm 0,020
1,2 \pm 0,1	357,0 \pm 0,1	0,298 \pm 0,025
0,9 \pm 0,1	273,0 \pm 0,1	0,303 \pm 0,034
0,7 \pm 0,1	215,2 \pm 0,1	0,307 \pm 0,044
Resistencia promedio [Ω]		0,301 \pm 0,031
Resistencia @ To=26° [Ω]		0,357 \pm 0,036

Tabla 3. Resistencia del estator, bobinas entre J1-J8

Corriente [A]	Tensión [mV]	Resistencia [Ω]
1,5 \pm 0,1	440,0 \pm 0,1	0,293 \pm 0,020
1,2 \pm 0,1	360,5 \pm 0,1	0,300 \pm 0,025
0,9 \pm 0,1	270,5 \pm 0,1	0,301 \pm 0,034
0,7 \pm 0,1	207,8 \pm 0,1	0,297 \pm 0,043
Resistencia promedio [Ω]		0,297 \pm 0,030
Resistencia @ To=26° [Ω]		0,354 \pm 0,036

Los valores obtenidos en tabla 2 y 3 se obtuvieron aplicando las ecuaciones (132), (133), (134), (135), y finalmente para obtener el valor a la temperatura de la prueba, se utilizó la ecuación (132). Los valores obtenidos para los devanados J y H, difieren del valor dado por el fabricante en un rango considerable debido a la referencia de temperatura del fabricante en comparación con el utilizado para la prueba. Cabe destacar que el fabricante únicamente indica que el valor expresado es a temperatura en frío.

4.1.3. Medición de la resistencia del rotor en estrella

Como se explicó en el capítulo 2, el rotor de la máquina generalizada tiene 3 diferentes conexiones disponibles en el panel como se aprecia en figura 7 y que dependen del tipo de máquina en estudio.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método voltímetro – amperímetro para la medición de resistencia del rotor, se obtuvieron configurando el mismo en estrella, es decir, colocando el disco en la posición 2, ya que para hacer funcionar la máquina generalizada como máquina asincrónica o sincrónica trifásica, el mismo debe estar en dicha configuración.

Es importante tener en cuenta que la aplicación de este método para dicho devanado presenta cierta particularidad debido a la presencia de las escobillas, por lo que a dichos devanados se le aplicaba una corriente cercana a la nominal (14 A) y se graficaban los valores de acuerdo con el método explicado en la sección 4.1.1.1.

Los valores para cada devanado, con los bornes diferenciados por sus colores en el panel de la máquina (Ver figura 7) fueron los siguientes:

Tabla 4. Resistencia del rotor en estrella, bornes azul-amarillo

Corriente [A]	Tensión [V]
2,14 ± 0,02	3,70 ± 0,01
4,26 ± 0,02	5,80 ± 0,01
6,50 ± 0,02	8,28 ± 0,01
9,04 ± 0,02	10,56 ± 0,01
11,76 ± 0,02	13,00 ± 0,01

Tabla 5. Resistencia del rotor en estrella, bornes amarillo-rojo

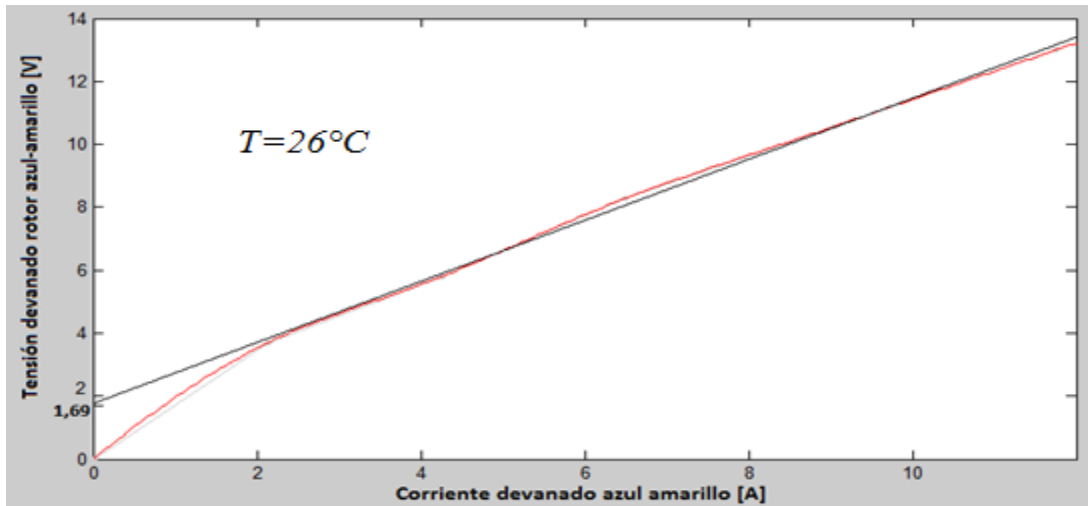
Corriente [A]	Tensión [V]
2,10 ± 0,02	3,82 ± 0,01
4,24 ± 0,02	5,71 ± 0,01
6,50 ± 0,02	8,00 ± 0,01
8,94 ± 0,02	10,50 ± 0,01
11,70 ± 0,02	12,91 ± 0,01

Tabla 6. Resistencia del rotor en estrella, bornes azul-rojo

Corriente [A]	Tensión [V]
2,10 ± 0,02	3,50 ± 0,01
4,24 ± 0,02	5,61 ± 0,01
6,50 ± 0,02	7,79 ± 0,01
9,00 ± 0,02	10,08 ± 0,01
11,76 ± 0,02	12,69 ± 0,01

Como se especificó, los resultados de cada conjunto de mediciones fueron graficados, con ayuda del programa MATLAB, de tal manera de conseguir de manera gráfica el valor de la tensión de las escobillas y la representación de la zona lineal de menor pendiente, que arroja el valor resistivo del devanado en cuestión despreciando el efecto de las escobillas, sin embargo, solo se graficaron los valores de tabla 4, puesto que las mediciones arrojaron prácticamente los mismos resultados.

Es importante recalcar el hecho de que la temperatura no fue considerada debido a que la referencia que da el manual, especifica el valor referido a una temperatura en frío desconocida, por lo que los resultados obtenidos se tendrán como una referencia a la temperatura y las condiciones del laboratorio.



Gráfica 1. Resistencia del rotor en estrella, bornes azul-amarillo.

En la siguiente tabla, se calculó el valor de la pendiente de la curva, para hallar el valor de la resistencia de cada devanado y además, se corrigieron los valores a la temperatura del ensayo, la cual era de 26°C con una temperatura de referencia de 75°C [8]. Únicamente se muestra una gráfica debido a que los otros datos están dentro de los valores deseados y cumplen con las condiciones de la prueba.

Por último, se aplicaron las ecuaciones (132), (133), (134), (135), y finalmente para obtener el valor a la temperatura de la prueba, la ecuación (132), a los valores medidos que se encontraban en la zona de menor pendiente y se obtuvo un valor final como se ve en tabla 7, el cual sirve para los modelos monofásicos de las diferentes configuraciones que son analizadas en este trabajo.

Tabla 7. Resistencia del rotor en estrella

Resistencia	Az – am [Ω]	Am – ro [Ω]	Az – ro [Ω]	Resistencia rotor [Ω]
De gráfica	0,614 \pm 0,005	0,607 \pm 0,005	0,509 \pm 0,005	0,717 \pm 0,006
Corregida	0,729 \pm 0,006	0,721 \pm 0,006	0,701 \pm 0,006	
Resistencia del devanado del rotor				0,359 \pm 0,003

El valor promedio de las tensiones en las escobillas obtenido de la gráfica 1 en estudio fue de 1,69 V. Por otro lado, se debe recordar que en la configuración del devanado del rotor en estrella se tienen un par de escobillas, por lo que la tensión que será utilizada para los modelos será la mitad del valor calculado gráficamente, es decir, que la tensión en las escobillas será 0,85 V.

Al comparar dicho valor de resistencia con el que se obtiene del manual para el caso de rotor en estrella, se tiene un error de 23,72%, debido a la referencia de temperatura que uso el fabricante y la utilizada para la medición realizada.

4.1.4. Medición de la resistencia del rotor entre N1-N2

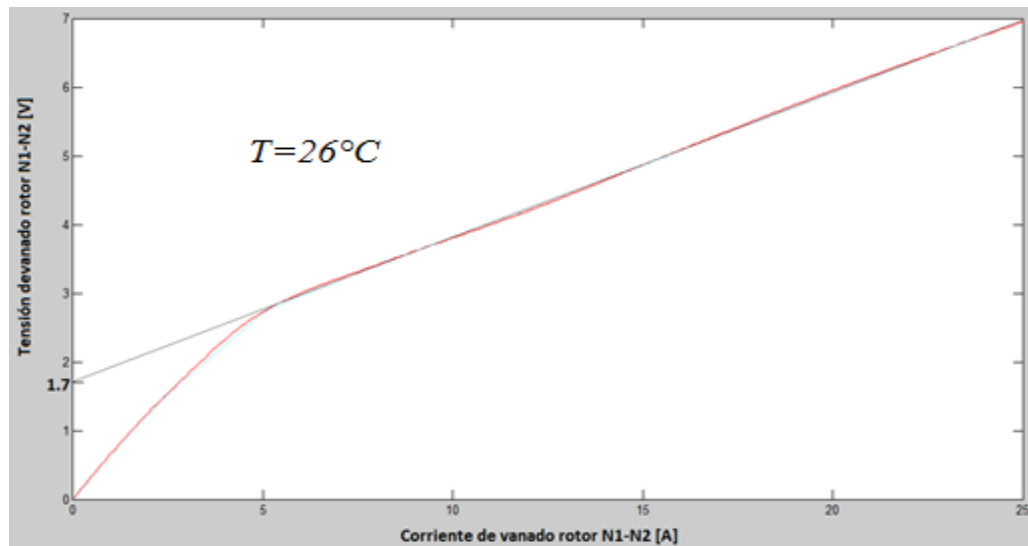
Para la máquina DC conectada en modo independiente, se necesita utilizar el devanado del rotor entre los bornes N1-N2 como se explicará más adelante, por lo que es necesario encontrar dicho valor resistivo mediante el mismo método voltímetro – amperímetro, teniendo en cuenta de que existen escobillas en el circuito.

Los resultados obtenidos para dicho devanado son los siguientes:

Tabla 8. Resistencia del rotor entre N1-N2

Corriente [A]	Tensión [V]
2,40 ± 0,05	6,88 ± 0,01
5,10 ± 0,05	5,88 ± 0,01
8,25 ± 0,05	5,34 ± 0,01
11,75 ± 0,05	4,39 ± 0,01
15,60 ± 0,05	3,45 ± 0,01
19,75 ± 0,05	2,56 ± 0,01
23,45 ± 0,05	1,49 ± 0,01

De las mediciones realizadas, se obtuvo la siguiente gráfica:



Gráfica 2. Resistencia del rotor entre N1-N2.

Tabla 9. Resistencia corregida del rotor entre bornes N1-N2

Resistencia	Valor [Ω]
De gráfica	$0,314 \pm 0,002$
Corregida	$0,373 \pm 0,002$

En tabla 9, se muestra el valor resistivo de dicho devanado corregido a una temperatura de 26°C medida en el laboratorio y a una temperatura de referencia de 75°C [7].

El valor promedio de la tensión en las escobillas obtenido de la gráfica 2 fue de 1,7, por lo que el valor utilizado para el modelo circuital dc, será 0,85 V lo cual concuerda con el valor obtenido para el mismo parámetro en la conexión en estrella.

4.2. Caracterización de la máquina eléctrica generalizada modelos CG3824 como máquina asincrónica trifásica

Las pruebas realizadas a la máquina con esta configuración se realizaron según norma IEEE 112 [9], considerando las particularidades del modo de funcionamiento de la máquina generalizada. Además, no existe norma conocida que especifique las pruebas o la no aplicación de las pruebas convencionales para una máquina generalizada.

La norma IEC 34-2 [8] también explica los métodos de medición necesarios para la medición de los parámetros de la máquina asincrónica, sin embargo, se llevan a cabo los que explica la norma IEEE 112, ya que como se explica en los métodos siguientes, estos son los más convenientes a la hora de aplicar métodos iterativos A y B, para hallar dichos parámetros.

Para determinar los parámetros de la máquina de inducción generalizada, así como en una convencional, es necesario realizar mediciones de resistencia de devanados, prueba de vacío, prueba de corto circuito y por último una prueba con carga o de determinación del deslizamiento.

En la máquina generalizada se presenta la particularidad de tener invertido los circuitos, es decir, al conectarla como máquina asincrónica trifásica, la misma debe ser alimentada por el circuito del rotor en estrella y las dos bobinas del estator en cuadratura cortocircuitadas como se puede apreciar en figura 19.

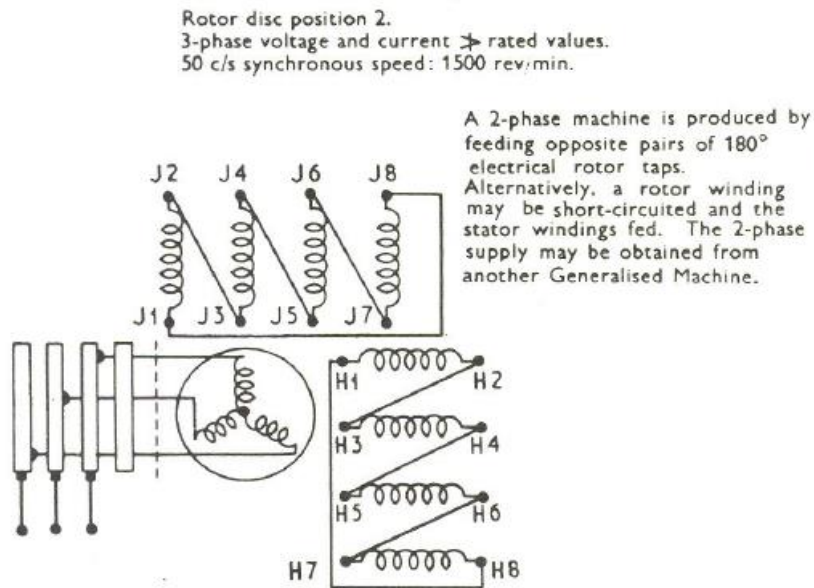


Figura 19. Configuración de la máquina eléctrica generaliza como máquina asincrónica trifásica. [3]

La operación de la máquina eléctrica generaliza modelo CG3824 como máquina asincrónica consiste en excitar al devanado trifásico del rotor conectado en estrella con corrientes trifásicas balanceadas mientras los devanados en cuadratura del estator deben cortocircuitarse. Además, cuando se tiene el sentido correcto de rotación, debe observarse que la tensión sea efectivamente cero en los devanados del estator puesto que se encuentran cortocircuitados, de tal manera de evitar corrientes no deseadas o de percatarse de cualquier funcionamiento anormal.

Para accionar la máquina generalizada como una máquina de inducción trifásica, se debe colocar el disco del rotor en la posición 2 y es muy importante asegurarse de no sobrepasar los valores nominales de la tensión y la corriente establecidas y reflejadas en la placa del fabricante. Por otra parte, a 60 Hz la velocidad de sincronismo será 1800 rev/min. En la figura 20, se aprecia el montaje del conjunto de la máquina generalizada como máquina de inducción trifásica desde el panel del conjunto.

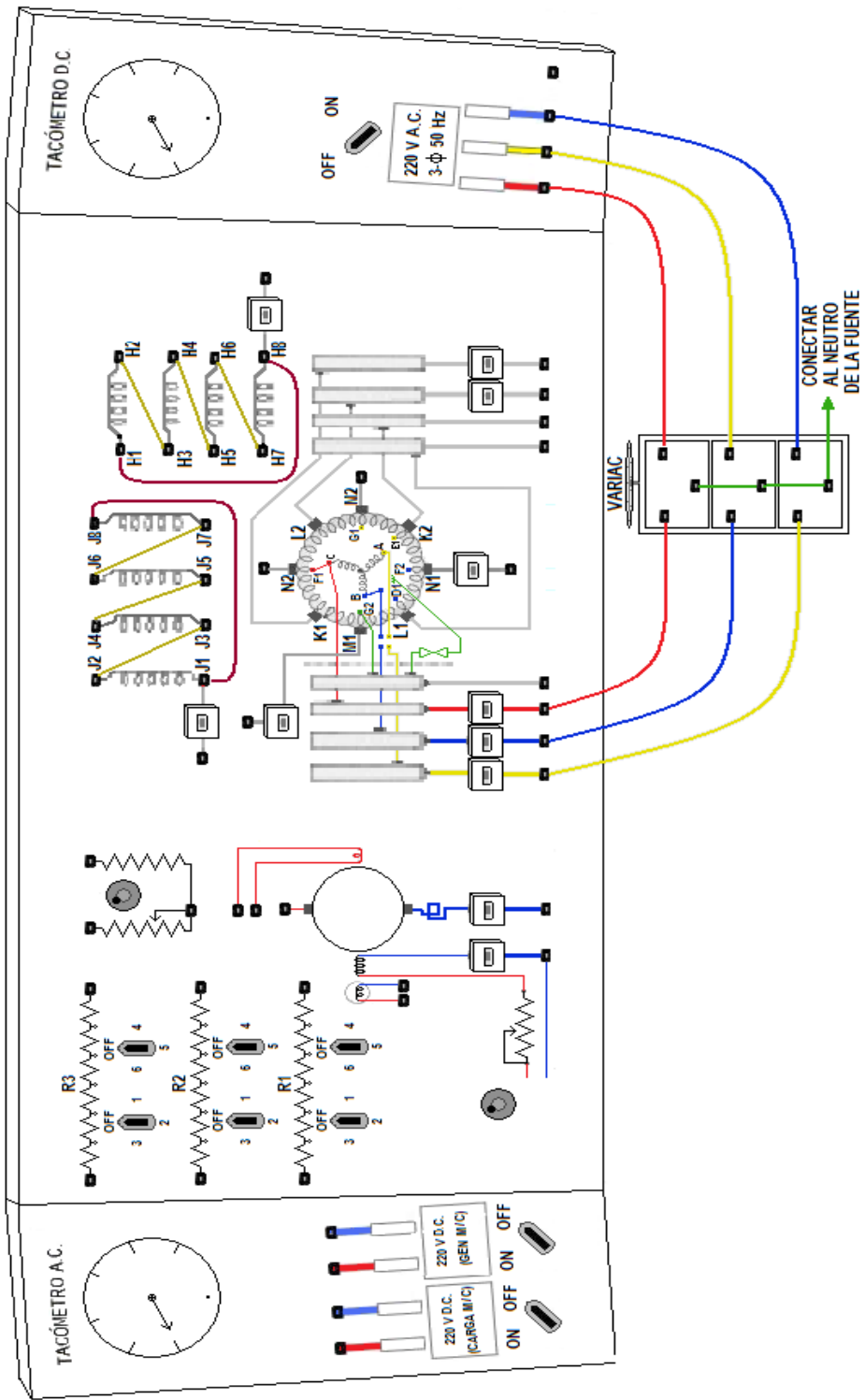


Figura 20. Diagrama de operación como motor de inducción trifásico. [4]

4.2.1. Medición de resistencia de los devanados del rotor de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica

Para este tipo de conexión, el rotor de la máquina eléctrica generalizada es conectado en estrella, por lo que el valor de dicha resistencia viene dado por los valores calculados en tabla 7 y el respectivo valor de tensión en las escobillas.

4.2.2. Prueba en vacío de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica

Esta prueba es realizada con la finalidad de obtener los parámetros de la rama del circuito que contiene los elementos que conciernen a las pérdidas del núcleo de la máquina y a la inductancia que genera la corriente de magnetización del arrollado del estator.

De manera similar a un transformador se tiene que la resistencia calculada será la que modela las pérdidas por corrientes de Foucault y la corriente por histéresis, ambas generadas en el núcleo ferromagnético de la máquina, una debido a los gradientes de potencial presentes en el material provenientes de la variación no uniforme del flujo en el mismo (Ley de Faraday) y la otra debido a la curva de magnetización del material del núcleo y por ende a la inductancia mutua debido al flujo resultante y aprovechado tanto por el circuito del estator como del rotor.

4.2.2.1. Descripción de la prueba de vacío para máquina asincrónica según norma IEEE-112 / IEC 34-2 [9] [8]

La sección 5.5 de la norma IEEE 112 [9], establece que esta prueba se realiza conectando la máquina como motor girando sin carga, por lo que se tendrá un deslizamiento aproximadamente igual a cero ($S=0$), además de una tensión y

frecuencia nominales. Cuando se requiere separar las pérdidas sin carga, se toman los valores de temperatura, voltaje, corriente y potencia de entrada a frecuencia nominal y disminuyendo la tensión desde 125% de su valor nominal hasta el punto donde un decrecimiento en la tensión genera un incremento en la corriente.

La sección 5.5.3 de la norma IEEE 112 [9] establece que la potencia medida de entrada representa las pérdidas en el motor sin carga y estas pérdidas están compuestas por las pérdidas en el circuito de entrada I^2R , fricción, devanado, y por otro lado, las pérdidas en el núcleo.

La sección 5.5.4 de la norma IEEE 112 [9], explica que la manera de encontrar las pérdidas por fricción y devanados es restar las pérdidas I^2R de la potencia medida para cada valor obtenido y graficar la potencia resultante vs la tensión y por último extender la curva hasta voltaje cero y la intercepción de dicha curva con el eje referente a potencia, serán las pérdidas buscadas. Sin embargo, para tener una mayor precisión se grafica la potencia medida menos las pérdidas I^2R vs la tensión al cuadrado para valores en el rango de voltajes más bajo.

Con respecto a las pérdidas en el núcleo P_h , la sección 5.5.5 de la norma IEEE 112 [9], establece que se debe sustraer el valor de pérdidas de fricción y devanado (determinado en 5.5.4) de la potencia de entrada menos las pérdidas I^2R (determinadas en 5.5.4). Por último, puede ser graficada la potencia en el núcleo vs voltaje para determinar las pérdidas en el núcleo para cualquier voltaje.

Así como en la sección 5.9 de la norma IEEE 112 [9], se afirma que los valores obtenidos son referidos al circuito del estator para una máquina asíncrona convencional, para la máquina generalizada modelo CG3824, se tendrán los valores calculados referidos al circuito del rotor.

La norma IEC 34-2 [8], hace referencia al objetivo de la prueba de vacío y explica cómo obtener la eficiencia de la máquina a partir de dicha prueba.

Sin embargo para los fines del trabajo se considera más apropiado aplicar la norma IEEE 112 [9], porque la misma, describe mejor el método de la prueba de vacío.

4.2.2.2. Medición de la curva de vacío para la máquina asincrónica

Las condiciones de ensayo de esta prueba para la máquina eléctrica generalizada fueron las siguientes:

- Bobinas del estator en cuadratura y cortocircuitadas.
- Circuito del rotor colocado en la posición A, de tal manera de trabajar con dicho arrollado en estrella.
- Máquina girando en vacío en sentido antihorario visto desde la máquina de carga.
- Velocidad de giro muy cerca de la velocidad de sincronismo, es decir, una velocidad aproximada de 1800 r.p.m. ($S \approx 0$).
- Tensión nominal aplicada a los devanados del rotor de la máquina generalizada igual a 220V.
- Corriente del rotor para la configuración en estrella igual o menor a 14 A
- Frecuencia de la red igual a 60Hz.
- Uso de vatímetros de bajo factor de potencia.
- La medición de temperatura no se consideró para el estudio.

Los resultados obtenidos de esta prueba se reflejan en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados prácticos de la prueba de vacío para la máquina asincrónica.

V _{RO-AM} [V]	V _{AZ-AM} [V]	V _{RO-AZ} [V]	I _{RO} [A]	I _{AZ} [A]	I _{AM} [A]	P _{RO-AM} [W]	P _{RO-AZ} [W]
220 ± 2	218 ± 2	220 ± 2	0,72 ± 0,01	0,74 ± 0,01	0,69 ± 0,01	70 ± 2	2 ± 2
210 ± 2	210 ± 2	210 ± 2	0,70 ± 0,01	0,72 ± 0,01	0,67 ± 0,01	66 ± 2	1 ± 2
200 ± 2	198 ± 2	200 ± 2	0,67 ± 0,01	0,69 ± 0,01	0,63 ± 0,01	61 ± 2	3 ± 2
190 ± 2	188 ± 2	190 ± 2	0,65 ± 0,01	0,66 ± 0,01	0,61 ± 0,01	57 ± 2	4 ± 2
180 ± 2	180 ± 2	180 ± 2	0,63 ± 0,01	0,63 ± 0,01	0,60 ± 0,01	53 ± 2	6 ± 2
170 ± 2	168 ± 2	170 ± 2	0,61 ± 0,01	0,61 ± 0,01	0,57 ± 0,01	49 ± 2	7 ± 2
160 ± 2	158 ± 2	160 ± 2	0,60 ± 0,01	0,60 ± 0,01	0,55 ± 0,01	46 ± 2	8 ± 2
150 ± 2	150 ± 2	150 ± 2	0,59 ± 0,01	0,58 ± 0,01	0,55 ± 0,01	43 ± 2	10 ± 2
140 ± 2	140 ± 2	142 ± 2	0,59 ± 0,01	0,58 ± 0,01	0,54 ± 0,01	40 ± 2	10 ± 2
130 ± 2	128 ± 2	130 ± 2	0,59 ± 0,01	0,57 ± 0,01	0,54 ± 0,01	38 ± 2	11 ± 2

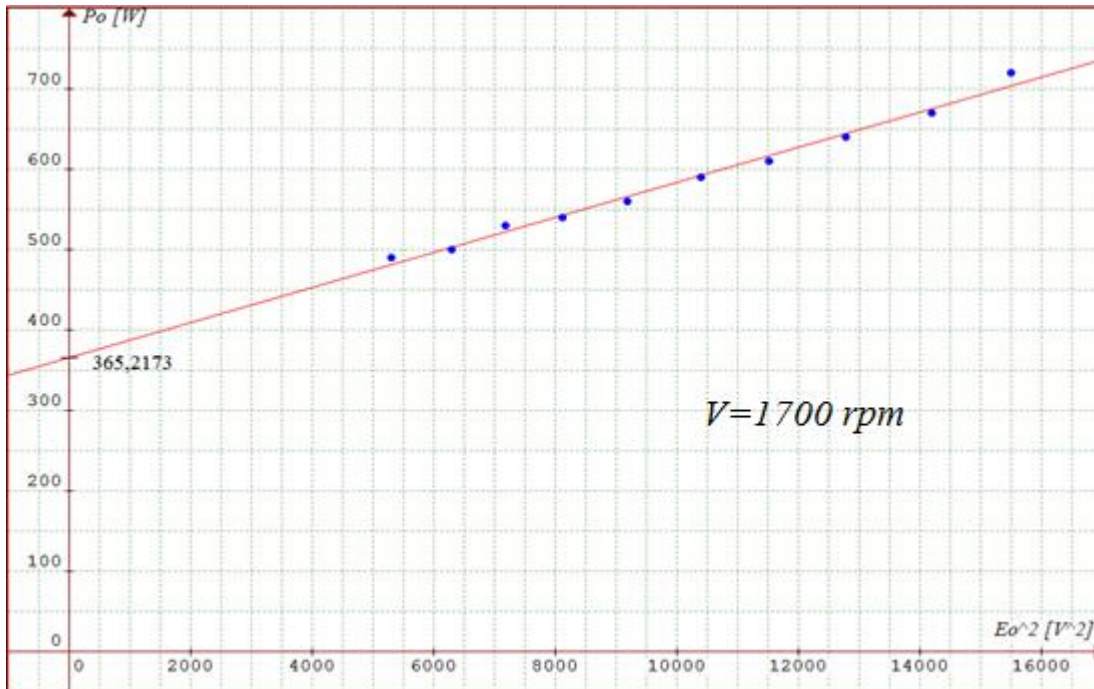
4.2.2.3. Determinación de las pérdidas mecánicas de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica mediante la prueba de vacío.

Para el cálculo de los parámetros de la máquina asincrónica, es necesario conocer las pérdidas mecánicas, las cuales se hallan de la siguiente tabla:

Tabla 11. Resultados teóricos de la prueba de vacío para la máquina asincrónica.

V _o [V]	I _o [A]	P _{o3ø} [W]	E _o [V]	E _o ² [V ²]
126,63 ± 1,15	3,58 ± 0,05	720 ± 40	124,50 ± 1,18	15499,19 ± 1,40
121,24 ± 1,15	3,48 ± 0,05	670 ± 40	119,14 ± 1,18	14195,06 ± 1,40
115,09 ± 1,15	3,32 ± 0,05	640 ± 40	113,04 ± 1,18	12779,05 ± 1,40
109,31 ± 1,15	3,20 ± 0,05	610 ± 40	107,31 ± 1,18	11516,05 ± 1,40
103,92 ± 1,15	3,10 ± 0,05	590 ± 40	101,96 ± 1,18	10395,87 ± 1,40
97,76 ± 1,15	2,98 ± 0,05	560 ± 40	95,84 ± 1,18	9186,00 ± 1,40
91,99 ± 1,15	2,92 ± 0,05	540 ± 40	90,09 ± 1,18	8116,94 ± 1,40
86,60 ± 1,15	2,87 ± 0,05	530 ± 40	84,72 ± 1,18	7178,06 ± 1,40
81,21 ± 1,15	2,85 ± 0,05	500 ± 40	79,34 ± 1,18	6294,96 ± 1,40
74,67 ± 1,15	2,83 ± 0,05	490 ± 40	72,80 ± 1,18	5300,34 ± 1,40

Con los datos de tabla 11, se obtiene la curva E_o^2 vs P_o en la gráfica 5, donde se tendrá que la misma puede ser representada por una ecuación lineal cuya intersección con el eje de potencia (P_o), será el valor de las pérdidas mecánicas en vatios [W].



Gráfica 3. Curva E_o^2 vs P_o para halla las pérdidas mecánicas de la máquina generalizada trabajando como máquina asincrónica trifásica

La ecuación aproximada de la curva $P_o(E_o^2)$ es

$$P_o = 0.0218*(E_o^2) + 365.2173 \quad (137)$$

La potencia mecánica P_m , corresponde al valor para el cual la aproximación lineal obtenida con ayuda del programa *GRAPHMATICA*, interseca al eje P_o , por lo tanto la potencia que representa las pérdidas mecánicas es igual a 365,2173 W.

4.2.3. Prueba de rotor trabado de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica

Para el cálculo de los elementos serie del modelo de una máquina asincrónica es necesario llevar a cabo la aplicación de una prueba de rotor trabado tal como se explica en el siguiente subcapítulo.

4.2.3.1. Descripción de la prueba de rotor trabado y con carga para la máquina asincrónica según norma IEEE 112 [9]

La sección 5.9.1 de la norma IEEE 112 [9] explica como hallar la impedancia de la máquina. Se deben registrar los valores de tensión, corriente, potencia de entrada, y resistencia del estator (en este caso rotor) o temperatura del devanado del estator (en este caso rotor), a una o más frecuencias, diferentes voltajes y, con o sin carga. Estos datos se conocen como datos de impedancia.

La prueba para reactancia debe hacerse a corriente de carga nominal. La reactancia e impedancia debe ser determinado a la de temperatura de la máquina en el momento de la prueba. Los valores de resistencia deben ser corregidos al valor especificado de temperatura antes de ser reportado como un parámetro de circuito equivalente.

La misma sección da 4 métodos para encontrar los datos de impedancia. Sin embargo, el método usado fue el d, o método 4. Se debe trabar el rotor (en este caso el estator) y trabajar a voltaje reducido con frecuencia nominal, por lo cual se tendrá una corriente cercana a la nominal y por último hacer una prueba con carga.

En la sección 5.9.5 de la norma IEEE 112 [9], se describe el cálculo de los parámetros por el método 4 de manera detallada.

La sección 5.9.5.1 de la norma IEEE 112 [9] llamado prueba de rotor bloqueado y punto de carga, establece que para frecuencia nominal se debe seguir el siguiente procedimiento de mediciones:

- a) Prueba sin carga, descrito en 5.5 de la misma norma.
- b) Prueba de rotor (en este caso, estator) bloqueado a tensión reducida siguiendo el procedimiento descrito en 5.9.2.1.
- c) Operar la máquina desacoplada (o acoplada para alguna carga reducida) con el voltaje reducido para dar aproximadamente un deslizamiento a máxima carga. El deslizamiento debe ser determinado cuidadosamente.

Para cada prueba se debe tabular la tensión, la potencia, la corriente, el deslizamiento y la resistencia del devanado del estator (en este caso rotor) o la temperatura del devanado estático (en este caso rotor).

La sección 5.9.2.1 de la norma IEEE 112 [9] explica cómo aplicar la prueba de rotor bloqueado. La impedancia del devanado del rotor de la máquina varía según la posición relativa de este con el estator por lo que es necesario determinar la posición para la cual el valor de impedancia representa un promedio. El rotor de la máquina antes de realizar las pruebas, debe estar cortocircuitado. Moviendo el rotor lentamente puede registrarse la distancia angular mecánica para la cual se cumple un ciclo eléctrico observando el comportamiento de la corriente del estator.

El rotor de la máquina debe ser perfectamente bloqueado, pero debe poder moverse manualmente antes de tomar las mediciones, de tal forma de observar el valor máximo y mínimo de corriente de estator y fijar el mismo en el punto donde se tiene el valor promedio de ambas mediciones. En dicho punto se realiza la prueba y se debe alcanzar aproximadamente el valor de corriente nominal.

Es importante que el sentido de rotación de la máquina sea el correcto, por lo que se debe verificar antes de trabar el rotor de la máquina.

Aunque no se aplicará el método descrito en la norma IEEE 112 [9] para calcular los parámetros debido a la practicidad de los métodos iterativos A y B descritos en la misma norma y mejor explicados en la Guía del Laboratorio de Máquinas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica UCV [10], se encontrará el punto tal que se cumpla la condición descrita en el párrafo anterior.

Para la prueba de rotor bloqueado se debe tener en cuenta que la máquina estará sometida a un gran esfuerzo mecánico e incrementos de calor considerables, por lo que las mediciones no deben exceder de 10 segundos. Se deben tomar los valores de tensión y corriente en todas las fases y de la potencia total, con el fin de establecer un valor promedio al momento de realizar los cálculos teóricos [9].

La prueba con carga consiste en registrar los valores de tensión de alimentación, corriente de línea, potencia de entrada, así como la velocidad o deslizamiento para una cierta condición de carga, con la finalidad de verificar y corregir los valores calculados mediante la aplicación de las pruebas de vacío y rotor trabado. Esta prueba debe ser realizada a una velocidad diferente a la velocidad de vacío, con la finalidad de obtener un punto de operación con carga de la máquina.

Para medir el deslizamiento en cualquier condición de carga se puede emplear los métodos del cuentarrevoluciones o del estroboscopio. El primer método es aplicable para condiciones de carga tales que $S \geq 1\%$ [9]. Sin embargo, la máquina generalizada cuenta con un medidor de velocidad en el panel del conjunto con el cual será suficiente para la medición de dicha velocidad en r.p.m.

4.2.3.2. Resultados de la prueba de rotor trabado para la máquina asincrónica

Las condiciones de ensayo de esta prueba para la máquina eléctrica generalizada son las siguientes:

- Bobinas del estator en cuadratura y cortocircuitadas.
- Circuito del rotor colocado en la posición A, de tal manera de trabajar con dicho arrollado en estrella.
- Rotor de la máquina en condición estática, para lo cual se traba mecánicamente el mismo, por lo cual se tiene un deslizamiento igual a 1.
- El trabado de la máquina debe ser robusto para evitar la rotación del eje.
- Tensión reducida aplicada al circuito rotórico.
- Corriente del rotor para la configuración en estrella igual o menor a 14 A
- Frecuencia nominal igual a 60 Hz.
- Utilización de vatímetros de alto factor de potencia.
- No se consideró el efecto de la temperatura.

Los resultados obtenidos de esta prueba se reflejan en la tabla 12. En la tabla 13, se muestran los valores utilizados para el cálculo de los parámetros.

Tabla 12. Resultados prácticos de las pruebas de rotor trabado para la máquina asincrónica.

V_{RO-AM} [V]	V_{AZ-AM} [V]	V_{RO-AZ} [V]	I_{RO} [A]	I_{AZ} [A]	I_{AM} [A]	P_{R-AM} [W]	P_{RO-AZ} [W]
88 ± 1	87 ± 1	88 ± 1	$2,80 \pm 0,05$	$2,80 \pm 0,05$	$2,75 \pm 0,05$	43 ± 1	1 ± 1

Tabla 13. Resultados teóricos de la prueba de rotor trabado para la máquina asincrónica.

V_{cc} [V]	I_{cc} [A]	P_{cc} [W]
$50,61 \pm 0,58$	$13,92 \pm 0,05$	$366,67 \pm 16,67$

4.2.3.3. Resultados de la prueba con carga para la máquina asincrónica

Como carga de la máquina asincrónica generalizada se utiliza la máquina de carga que forma parte del conjunto. Se hace trabajar dicha máquina de carga como generador DC accionado por la máquina asincrónica generalizada trabajando como motor. Se cuenta en con un arreglo de resistencias de 120 ohmios en total, las cuales, hacen el trabajo de carga de la máquina.

La velocidad antes de comenzar la prueba era de 1700 r.p.m., la tensión de remanencia era 16 V, por lo cual la máquina podía funcionar auto excitada.

Se procede a cargar la máquina hasta que alcanzó una velocidad de 1600 r.p.m. y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 14. Resultados prácticos de la prueba con carga para la máquina asincrónica.

V_{RO-AM} [V]	V_{AZ-AM} [V]	V_{RO-AZ} [V]	I_{RO} [A]	I_{AZ} [A]	I_{AM} [A]	P_{RO-AM} [W]	P_{RO-AZ} [W]	N [r.p.m.]
220 ± 2	218 ± 2	220 ± 2	1,75 ± 0,05	1,85 ± 0,05	1,80 ± 0,05	40 ± 1	20 ± 1	1600

En la tabla 15, se muestran los datos teóricos obtenidos de la tabla 14, que serán los valores utilizados para el cálculo de los parámetros mediante el método iterativo B.

Tabla 15. Resultados teóricos de la prueba con carga para la máquina asincrónica.

V_{cc} [V]	I_{cc} [A]	P_{cc} [W]	S
126,63 ± 1,15	9,00 ± 0,05	1000,00 ± 16,67	0,11

4.2.4. Determinación de los parámetros de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina asincrónica trifásica

Como se explicó con anterioridad, la norma IEEE 112 [9], describe métodos que permiten el cálculo de los parámetros de los circuitos equivalentes de las máquinas asincrónicas, sin embargo, aunque la norma describe un método particular de acuerdo a las condiciones de las pruebas, se tomará como referencia la guía del laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV [10], donde se describen de forma detalla dos métodos iterativos que arrojan resultados precisos de los parámetros deseados.

4.2.4.1. Descripción y aplicación de los métodos iterativos para la determinación de los parámetros de la máquina asincrónica [10]

La sección 5.9 de la norma IEEE 112 [9], explica de manera analítica como encontrar los parámetros del modelo a partir de las pruebas realizadas y dependiendo del método que se aplique, sin embargo, para la explicación de los métodos iterativos A y B se utiliza como referencia la guía del laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica UCV [10], que parte de la norma IEEE 112. La siguiente figura, permite entender de donde provienen los parámetros de las descripciones realizadas:

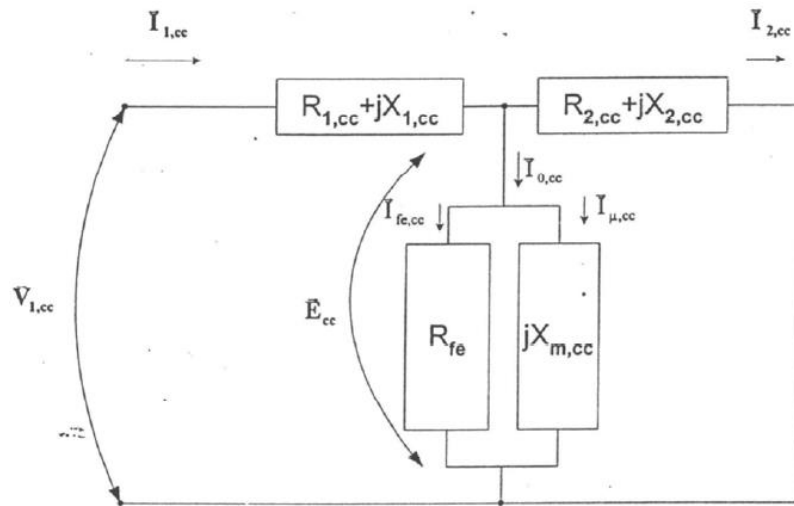


Figura 21. Circuito equivalente de la máquina asincrónica en la prueba de rotor trabado. [10]

Método A [10]

Paso 1: Se deben conocer los siguientes datos:

- Tensión y corriente, por fase, en el estator consumida durante la prueba en vacío, $V_{1,0} = 126,63 V$ e $I_{1,0} = 3,58 A$
- Potencia por fase consumida por la máquina en vacío $P_{1,0} = 240 W$.
- Tensión y corriente, por fase, en el estator consumida, durante la prueba de rotor trabado, $V_{1,cc} = 50,61 V$ y $I_{1,cc} = 13,92 A$.
- Potencia por fase consumida por la máquina durante el ensayo de rotor trabado, $P_{1,cc} = 366,67$.

Paso 2: Se debe asumir un valor de X1/X2 o NEMA: Como la máquina generalizada es de rotor devanado se asume una NEMA igual a 1.

Paso 3: Por otro lado, se deben tener valores iniciales de la reactancia de magnetización $X_{M,0}$ y estática de dispersión $X_{1,0}$ los cuales se deducen de las pruebas realizadas de la siguiente manera:

|

De la prueba de rotor trabado como se ve en la figura 21, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{V_{1,cc}}{I_{1,cc}} = \sqrt{(R_{1,cc} + R_{2,cc})^2 + (X_{1,cc} + X_{2,cc})^2} \quad (138)$$

Despejando $X_{1,cc}$ y teniendo la expresión $X_{cc} = (f_{cc}/f_N)X_N$, se tiene:

$$X_{1,cc} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{1,cc}}{I_{1,cc}}\right)^2 - (R_1 + R_2)^2}}{\left(1 + \frac{X_1}{X_2}\right)} \quad (139)$$

Al asumir que la corriente estática y rotórica son aproximadamente iguales, es decir, $I_{1,cc} \cong I_{2,cc}$ podemos considerar de la Pcc:

$$P_{1,cc} = I_{1,cc}^2 * (R_1 + R_2) \quad (140)$$

Despejando R_2 de la ecuación (140):

$$R_2 = \frac{P_{1,cc}}{I_{1,cc}^2} - R_1 \quad (141)$$

Sustituyendo la ecuación (141) en la ecuación (139) y simplificando:

$$X_{1,(0)} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{1,CC}}{I_{1,CC}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1,CC}}{I_{1,CC}^2}\right)^2}}{\left(1 + \frac{X_1}{X_2}\right)} = 1,5523 \Omega \quad (142)$$

El subíndice (0) indica que es el valor inicial.

Del mismo modo, de la prueba de vacío se tiene que la tensión en la rama paralela de la figura 21 es:

$$\overline{E_0} = \overline{V_{1,0}} - \overline{I_{1,0}}(R_1 + jX_1) \quad (143)$$

Si se considera despreciable las pérdidas en el hierro ($I_{1,0} \approx I_{1,\mu}$) es válida la siguiente expresión:

$$|X_M| = \frac{|E_0|}{|I_{1,0}|} \quad (144)$$

Sustituyendo la ecuación (143) y ecuación (144) y simplificando se obtiene:

$$X_{M,(0)} = \left| \frac{\overline{V_{1,0}}}{I_{1,0}} - (R_1 + jX_{1,(i)}) \right| = 35,0469 \Omega \quad (145)$$

Además:

$$I_{1,0} = |I_{1,0}| * e^{j \cos^{-1}\left(\frac{P_{1,0}}{|I_{1,0}|*V_{1,0}}\right)} \quad (146)$$

Paso 4: Calcular las potencias reactivas debidas a las pruebas de vacío y de rotor trabado Q_{1,0} y Q_{1,CC}, respectivamente:

$$Q_{1,0} = \sqrt{(V_{1,0}I_{1,0})^2 - (P_{1,0})^2} = 384,5946 \text{ kVAr} \quad (147)$$

$$Q_{1,CC} = \sqrt{(V_{1,CC}I_{1,CC})^2 - (P_{1,CC})^2} = 601,5488 \text{ kVAr} \quad (148)$$

Paso 5: Calcular $X_{M,(i+1)}$:

$$X_{M,(i+1)} = \frac{V_{1,0}^2}{Q_{1,0} - I_{1,0}^2 * X_{1,(i)}} * \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{1,(i)}}{X_{M,(i)}}\right)^2} \quad (149)$$

Paso 6: Calcular la reactancia de del circuito del estator, $X_{1,CC,(i)}$:

$$X_{1,CC,(i)} = \frac{Q_{1,CC}}{I_{1,CC}^2 * \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_{1,(i)}}{X_{M,(i)}}\right)} * \left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_{1,(i)}}{X_{M,(i)}}\right) \quad (150)$$

Paso 7: Calcular el valor referido a la frecuencia nominal $X_{1,(i+1)}$:

$$X_{1,(i+1)} = \frac{f_{NOM}}{f_{CC}} X_{1,CC,(i)} \quad (151)$$

Paso 8: Para $i=i+1$, repetir el paso 5 hasta el paso 7 hasta que los valores de las reactancias de dispersión y mutua se estabilicen alrededor de un 0,1% de diferencia; es decir:

$$|X_{1,(i+1)} - X_{1,(i)}| \leq 0,001 \quad (152)$$

$$|X_{M,(i+1)} - X_{M,(i)}| \leq 0,001 \quad (153)$$

Con ayuda del programa MATLAB, se realizó dicho proceso iterativo con la condición (152) y (153), arrojando los siguientes resultados:

$$X_{1,0} = 1,5806 \Omega$$

$$X_{M,0} = 42,4313 \Omega$$

Paso 9: Calcular la reactancia del circuito del rotor X2:

$$X_2 = \frac{X_{1,(i+1)}}{\frac{X_1}{X_2}} = 1,5806 \Omega \quad (154)$$

Paso 10: Determinar gráficamente y a partir de las mediciones realizadas, el valor de las pérdidas mecánicas Pmec. A partir de la gráfica 5 se tiene:

$$P_{MEC} = 365.2173 W$$

Paso 11: Calcular la potencia en el núcleo P_{FE}:

$$P_{FE} = P_{1,0} - \frac{P_{MEC}}{3} - I_{1,0}^2 R_1 = 113,6598 W \quad (155)$$

Paso 12: Calcular el valor de la conductancia G_{FE}:

$$G_{FE} = \frac{P_{FE}}{V_{1,0}^2} * \left(1 + \frac{X_{1,(i+1)}}{X_{M,(i+1)}} \right)^2 = 0,0076 \text{ U} \quad (156)$$

Paso 13: Calcular la resistencia del núcleo R_{FE}:

$$R_{FE} = \frac{1}{G_{FE}} = 131,1288 \Omega \quad (157)$$

Paso 14: Calcular la resistencia del rotor R_2 :

$$R_2 = \left(\frac{P_{cc}}{I_{1,CC}^2} - R_1 \right) * \left(1 + \frac{X_2}{X_{M,(i+1)}} \right)^2 - \frac{X_2^2}{X_{(i+1)}^2} * X_{1,CC,i}^2 * G_{FE} = 1,6306 \Omega \quad (158)$$

Paso 15: Fin del método, por lo que los parámetros encontrados son los siguientes:

Tabla 16. Parámetros calculados mediante el método A

Parámetro	Valor [Ω]
R1	0,3590
R2	1,6306
X1	1,5806
X2	1,5806
Rfe	131,1288
Xm	42,4313

Los parámetros calculados por el método A son los que se muestran en la siguiente figura:

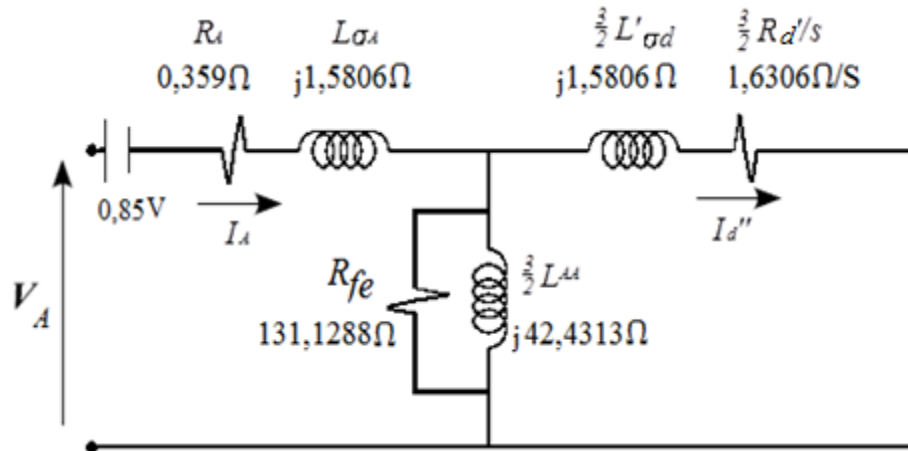


Figura 22. Circuito equivalente de la máquina asincrónica trifásica generalizada obtenido del método A.

Método B [10]

Es aplicable para máquinas cuyo ensayo de rotor trabado es realizado a la frecuencia nominal, tal que $f_{cc} = f_{NOM}$

Permite ajustar los parámetros del circuito equivalente C.E. (específicamente R_2 y X_M), obtenido inicialmente por el método A, para una condición de carga ($P_{1,EXP}$, $I_{1,EXP}$, S_{EXP} (deslizamiento)) medida.

El procedimiento y los resultados de dicho método son los siguientes:

Paso 1: Aplicando el método A se calcularon los valores de R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , R_{FE} y X_M , tal como se muestra en figura 22.

Paso 2: Se debe conocer la potencia total $P_{1,EXP}(S)$, la corriente consumida $I_{1,EXP}(S)$, la tensión de alimentación V_1 , y el respectivo deslizamiento S de la máquina para una condición de carga (ensayo con carga del motor asincrónico). Para el caso, el deslizamiento S , era de 0,11 y los demás parámetros:

$$P_{1,EXP}(S) = 1000 \text{ W}$$

$$I_{1,EXP}(S) = 9 \text{ A}$$

Paso 3: Para $i=0$, se calcula la impedancia equivalente, por fase, del motor vista desde los terminales del estator $Z(i)$, es decir, para la condición dada por los parámetros por el método A, y para una carga que generaba un deslizamiento S de 0,11. Este paso se llevó a cabo con ayuda del programa MATLAB arrojando un resultado de impedancia equivalente igual a:

$$Z_{eq}(1) = 13,4365$$

Paso 4: Determinar, a través del circuito equivalente, la corriente estática resultante $I_1(i)$.

$$I_1(1) = 9,3611 A$$

Paso 5: Determinar, a través del circuito equivalente, la potencia activa consumida por el motor $P_1(i)$.

$$P_1(1) = 3116,4 W$$

Paso 6: Se aplicó un método iterativo incrementando los valores de $R_{2,(i+1)}$ y/o $X_{M,(i+1)}$; y se repitieron los pasos del 3 hasta el paso 5 hasta que los valores de potencia $P_1(i)$ y corriente $I_1(i)$ difieran del 1% de los valores medidos de $P_{1,EXP}$ y $I_{1,EXP}$ respectivamente, es decir:

$$|P_{1,EXP} - P_{1,(i)}| \leq 0,01 \quad (159)$$

$$|I_{1,EXP} - I_{1,(i)}| \leq 0,01 \quad (160)$$

Se verificó la correcta aplicación del método iterativo, verificándose que las ecuaciones 159 y 160 fueran cumplidas:

$$|P_{1,EXP} - P_{1,(i)}| = |1000 - 999,9926| = 0,0074 \leq 0,01$$

$$|I_{1,EXP} - I_{1,(i)}| = |9 - 8,9901| = 0,0099 \leq 0,01$$

Por último, los valores de resistencia del estator y de reactancia de magnetización obtenidos de la aplicación del presente método fueron

$$R_2 = 6,4814 \Omega$$

$$X_M = 13,0685 \Omega$$

4.2.5. Modelo circuital de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina asincrónica trifásica

El circuito resultante de la máquina generalizada modelo CG3824 configurada como máquina asincrónica trifásica viene dado por la siguiente figura:

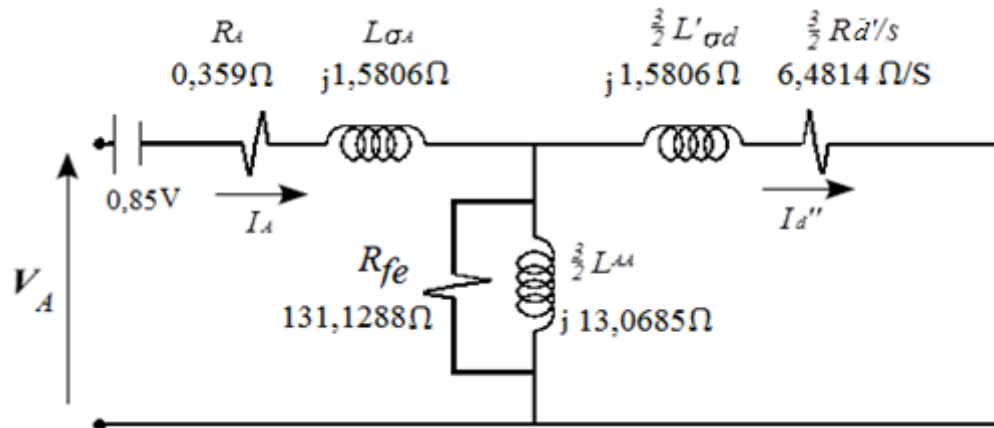


Figura 23. Circuito equivalente de la máquina generalizada modelo CG3824 configurada como máquina asincrónica trifásica.

Donde,

V_A , es la tensión de alimentación del rotor.

R_A , es la resistencia del devanado del rotor

I_A , es la corriente del rotor cuyo sentido depende de si es motor o generador.

$L_{\sigma A}$, es la inductancia de dispersión del devanado del rotor.

R_{fe} , representa las pérdidas en el núcleo.

$\frac{3}{2}L_{AA}$, es la inductancia de magnetización.

$\frac{3}{2}L'_{\sigma d}$, es la inductancia de dispersión del devanado del estator

I''_d , es la corriente del circuito del estator

$\frac{3}{2}R'_d/S$, es la resistencia del estator dividida entre el deslizamiento S .

Aunque en la deducción de los modelos circuitales se despreciaba el efecto de las escobillas, en los circuitos obtenidos si se consideró, así como para el cálculo de los parámetros equivalentes y de la representación circuital de la figura 23.

La reactancia de dispersión del rotor utilizando como referencia el modelo planteado para máquina asincrónica, no se asemeja al valor dado por el fabricante debido a las aproximaciones que se realizan para la determinación y aplicación del método A y B, dicho parámetro tiene un valor de:

$$Lr = \frac{1,5806}{2 * \pi * 60} * \frac{6}{5} = 0,005H$$

Para el estator, el valor calculado difiere también considerablemente del dato del fabricante, y puede asumirse que lo calculado se deriva de las aproximaciones realizadas por los métodos iterativos.

$$Le = \frac{1,5806}{2 * \pi * 60} * \frac{3}{2} * \frac{6}{5} = 0,008$$

4.3. Caracterización de la máquina eléctrica generalizada modelos CG3824 como máquina sincrónica trifásica

Para configurar la máquina eléctrica generalizada como máquina sincrónica, se debe colocar el disco del rotor en la posición 2. Si se desea que trabaje como generador síncrono, la máquina de carga D.C. acoplada a ella se encargará de proporcionar la energía mecánica que se quiere transformar en energía eléctrica.

Para la operación como generador, además de impulsar la máquina generalizada con la máquina de carga D.C., se debe alimentar con corriente continua el estator de la maquina generalizada tal y como se observa en la figura 24 para poder generar las tensiones inducidas internas que producen las corrientes alternas en las salidas del devanado trifásico conectado en estrella del rotor. La máquina generalizada cuenta con 4 polos por lo que al trabajar a una frecuencia de red de 60 Hz, la velocidad sincrónica será igual a 1800 r.p.m.

La corriente por el estator no debe excede los 27A, y para ello, se debe energizar solo la máquina de carga D.C. como primo motor y colocar un amperímetro capaz de medir una corriente alta en DC en la toma dispuesta en el panel del conjunto para esto en el estator, para medir y saber con exactitud que corriente circula por dicho devanado.

Según esta configuración, para hacer funcionar la máquina generalizada como maquina sincrónica trifásica debe controlar la corriente de campo mediante el uso de reóstatos como se puede apreciar en figura 25.

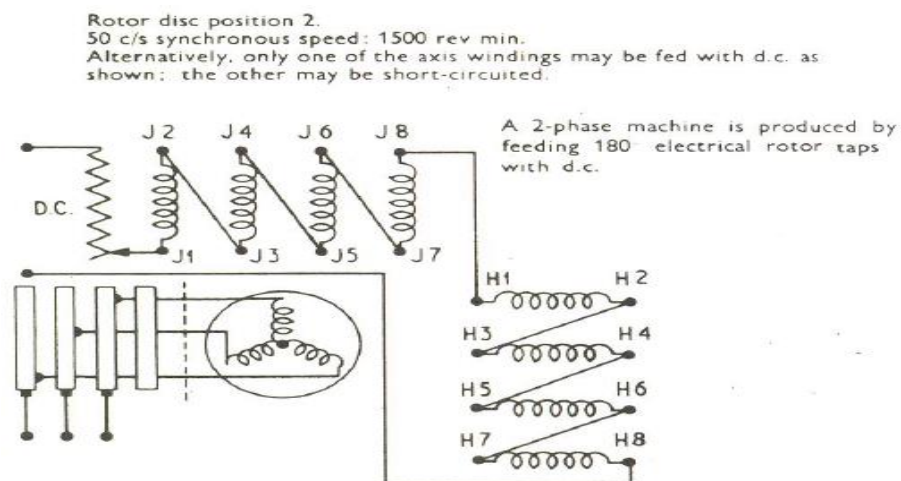


Figura 24. Configuración de la máquina generalizada como máquina asincrónica trifásica. [3]

4.3.1. Medición de resistencia de los devanados del rotor de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 funcionando como máquina sincrónica trifásica

Para este tipo de conexión, el rotor de la máquina eléctrica generalizada es conectado en estrella, por lo que el valor de dicha resistencia viene dado por los valores calculados en tabla 7 y el respectivo valor de tensión en las escobillas.

4.3.2. Prueba de vacío de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina sincrónica trifásica

Es necesaria la aplicación de una prueba de vacío para poder caracterizar la máquina sincrónica tanto convencional como generalizada.

4.3.2.1. Descripción de la prueba de vacío para la máquina sincrónica según norma IEEE 115 / IEC 34-4

La prueba de vacío o curva de saturación en circuito abierto se describe en la norma IEEE 115 [11], en su sección 4.2.5 y en la norma IEC 34-4 [7].

Ambos métodos tienen una forma similar de aplicación.

Para esta prueba, la máquina debe estar girando a velocidad nominal accionada como generador por una fuente externa, con sus terminales abiertos y se deberá registrar los valores de corriente de campo, tensión en los terminales de armadura y la frecuencia en los terminales o la velocidad. La norma además recomienda, para una buena representación de la curva en vacío, seguir el siguiente procedimiento [11]:

- a) Tomar seis lecturas por debajo del 60% de la tensión nominal y una a un valor de excitación igual a cero.

b) De 60% a 110% al menos tomar lecturas cada 5% para obtener un mínimo de 10 puntos ya que esta área es un rango crítico y deben tomarse tantos puntos como lo permita el control de resolución de la excitación.

c) sobre 110% al menos se deberán registrar dos puntos incluyendo un punto a aproximadamente 120% de la corriente de campo nominal sin carga o al máximo valor que permita el fabricante.

d) Al voltaje nominal deben registrarse las tensiones en las tres fases para determinar el balance de fases. Esta lectura debería ser realizada bajo condiciones constantes de excitación y velocidad y con el mismo voltímetro.

La lectura de las mediciones debe ser tomada siempre incrementando la excitación ya que este método permite una energización segura del generador. Si por alguna eventualidad durante las mediciones, hay un decrecimiento en la excitación, la misma debe ser reducida a cero y entonces incrementar nuevamente hasta el valor deseado para evitar los efectos de la histéresis en los resultados [11].

Para cada tensión donde se tenga planificado registrar los valores, es necesario esperar algunos minutos de tal manera de permitir que la máquina se estabilice a su velocidad nominal y de esta manera, se eviten errores causados por la variación de la velocidad y de la excitación. Esto no aplica para los valores por encima del 110% del voltaje nominal, ya que el tiempo permitido lo da el fabricante.

Los resultados deben ser corregidos para alguna velocidad y pueden ser graficados como se ve en figura 26. Puede ser usado para tal fin el voltaje de una de las fases (línea a línea) o el voltaje más grande obtenido para cada valor de excitación.

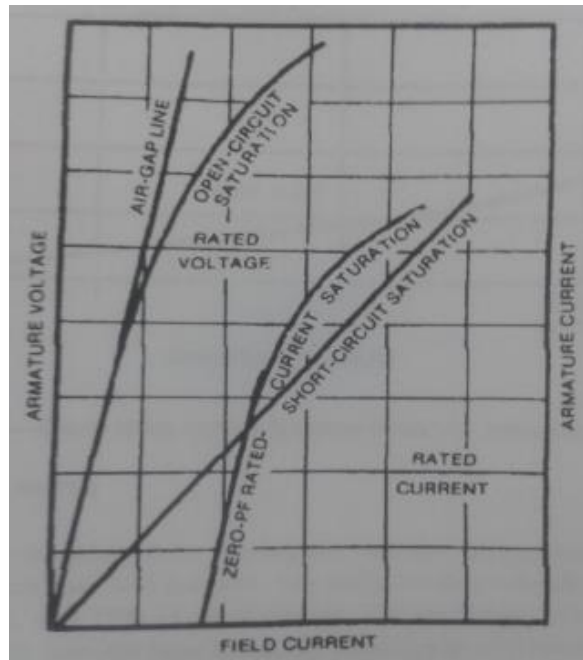


Figura 26. Curvas de saturación estándar de máquinas sincrónicas. [11]

Como se aprecia en figura 26 de la curva se puede obtener una línea de entrehierro, la cual se obtiene trazando una tangente desde el origen a la curva de vacío si la porción inicial es no lineal o en su defecto, es decir, que dicha porción sea lineal, extendiendo la línea que forma dicha porción.

Por otro lado, para el trazado de la curva de acuerdo a IEC [7] se procede de la forma siguiente:

- a) Se debe iniciar a la tensión que corresponda a la excitación en plena carga y al menos a 1.3 veces la tensión nominal de la máquina bajo prueba y proseguir hasta 0.2 veces la tensión nominal (puntos distribuidos uniformemente en lo posible).
- b) Tomar la lectura de la tensión residual ($I_{exc} = 0$).

4.3.2.2. Resultados de la prueba de vacío para la máquina sincrónica

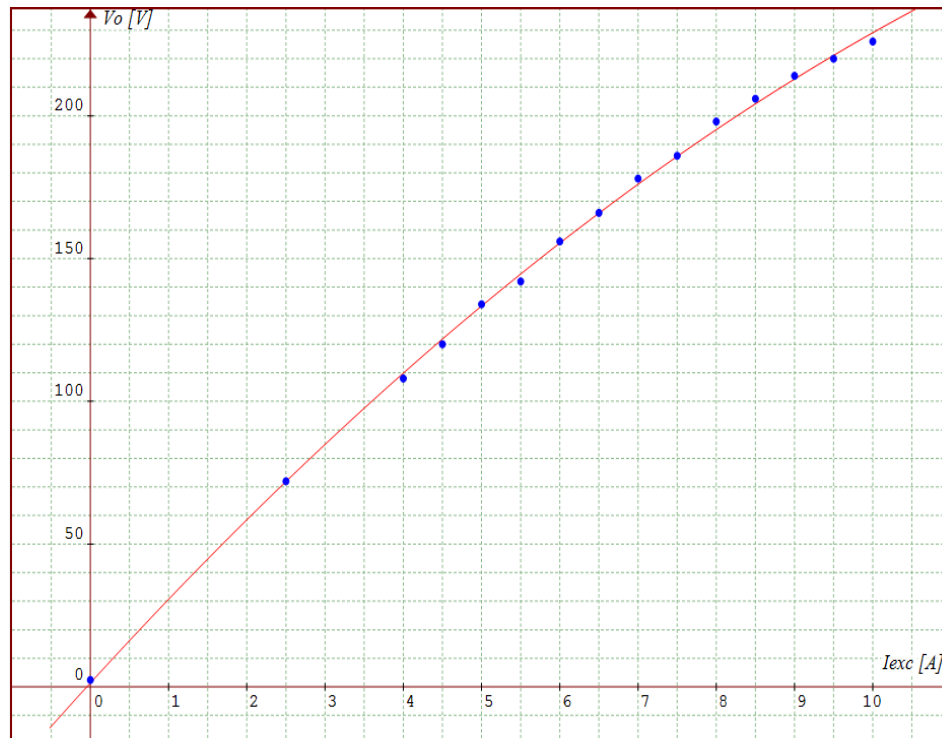
Las condiciones de ensayo de esta prueba para la máquina eléctrica generalizada son las siguientes:

- Bobinas del estator de la máquina en serie con la fuente de alimentación y con un conjunto de resistencias limitadoras.
- Circuito del rotor colocado en la posición A, de tal manera de trabajar con dicho arrollado en estrella.
- Máquina girando en vacío en sentido contrario a las manecillas del reloj visto desde la máquina de carga.
- Velocidad de giro igual a la de sincronismo a 60 Hz
- Tensión nominal aplicada a los devanados del estator de la máquina generalizada igual a 220Vdc.
- Corriente del rotor para la configuración en estrella igual o menor a 14 A
- Frecuencia de la red igual a 60Hz.
- Máquina de carga, trabajando como primo motor de la máquina generalizada.

Los resultados obtenidos de esta prueba se reflejan en la tabla 17.

Tabla 17. Resultados obtenidos de la prueba de vacío para la máquina sincrónica.

I_{exc} [A]	V_{AZ-AM} [V]	V_{RO-AZ} [V]	V_{RO-AM} [V]	V_o [V]
Curva ascendente				
0,0 ± 0,5	2,4 ± 0,2	2,4 ± 2	2,4 ± 2	2,4 ± 1,4
2,5 ± 0,5	70 ± 2	70 ± 2	70 ± 2	70,0 ± 2,0
4,0 ± 0,5	106 ± 2	106 ± 2	106 ± 2	106,0 ± 2,0
4,5 ± 0,5	118 ± 2	118 ± 2	118 ± 2	118,0 ± 2,0
5,0 ± 0,5	132 ± 2	132 ± 2	132 ± 2	132,0 ± 2,0
5,5 ± 0,5	140 ± 2	140 ± 2	140 ± 2	140,0 ± 2,0
6,0 ± 0,5	154 ± 2	154 ± 2	154 ± 2	154,0 ± 2,0
6,5 ± 0,5	164 ± 2	164 ± 2	164 ± 2	164,0 ± 2,0
7,0 ± 0,5	176 ± 2	176 ± 2	176 ± 2	176,0 ± 2,0
7,5 ± 0,5	184 ± 2	184 ± 2	184 ± 2	184,0 ± 2,0
8,0 ± 0,5	196 ± 2	196 ± 2	196 ± 2	196,0 ± 2,0
8,5 ± 0,5	204 ± 2	204 ± 2	204 ± 2	204,0 ± 2,0
9,0 ± 0,5	212 ± 2	212 ± 2	212 ± 2	212,0 ± 2,0
9,5 ± 0,5	218 ± 2	218 ± 2	218 ± 2	218,0 ± 2,0
10,0 ± 0,5	226 ± 2	226 ± 2	226 ± 2	226,0 ± 2,0
Curva descendente				
9,5 ± 0,5	222 ± 2	222 ± 2	222 ± 2	222,0 ± 2,0
9,0 ± 0,5	216 ± 2	216 ± 2	216 ± 2	216,0 ± 2,0
8,5 ± 0,5	208 ± 2	208 ± 2	208 ± 2	208,0 ± 2,0
8,0 ± 0,5	200 ± 2	200 ± 2	200 ± 2	200,0 ± 2,0
7,5 ± 0,5	188 ± 2	188 ± 2	188 ± 2	188,0 ± 2,0
7,0 ± 0,5	180 ± 2	180 ± 2	180 ± 2	180,0 ± 2,0
6,5 ± 0,5	168 ± 2	168 ± 2	168 ± 2	168,0 ± 2,0
6,0 ± 0,5	158 ± 2	158 ± 2	158 ± 2	158,0 ± 2,0
5,5 ± 0,5	144 ± 2	144 ± 2	144 ± 2	144,0 ± 2,0
5,0 ± 0,5	136 ± 2	136 ± 2	136 ± 2	136,0 ± 2,0
4,5 ± 0,5	122 ± 2	122 ± 2	122 ± 2	122,0 ± 2,0
4,0 ± 0,5	110 ± 2	110 ± 2	110 ± 2	110,0 ± 2,0
2,5 ± 0,5	74 ± 2	74 ± 2	74 ± 2	74,0 ± 2,0
0,0 ± 0,5	2,6 ± 0,2	2,6 ± 2	2,6 ± 2	2,6 ± 1,4



Gráfica 4. Curva $V_o=f(I_{exc})$ de la prueba de vacío para la máquina síncronica generalizada

La ecuación cuadrática aproximada promedio que representa la curva de vacío obtenida a partir de las mediciones realizadas responde a la siguiente expresión:

$$V_o = -0,7263I_{exc}^2 + 30,0382I_{exc} + 1,3379 \quad (161)$$

4.3.3. Prueba de cortocircuito de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina síncronica trifásica

La prueba de cortocircuito es esencial para el cálculo de los parámetros tal como se explica en las siguientes subsecciones.

4.3.3.1. Descripción de la prueba de cortocircuito para la máquina sincrónica según norma IEEE 115 / IEC 34-4 [11] [7]

La prueba de curva de saturación en cortocircuito o simplemente, prueba de cortocircuito se describe en la norma IEEE 115 [11], en su sección 4.2.8. La norma IEC 34-4 [7], también explica este método pero lo hace de forma menos detallada en comparación con el estándar IEEE como se explica a continuación.

Para esta prueba, la máquina debe estar girando a velocidad nominal, con sus terminales de armadura cortocircuitados y se deberá registrar los valores de corriente de campo y corriente de armadura. Normalmente las lecturas deberán ser tomadas para valores de corriente de armadura de 125%, 100%, 75%, 50% y 25% de su valor nominal [11].

El valor de 125%, podrá ser utilizado sólo bajo indicaciones del fabricante ya que para ese valor existe el riesgo de daños.

Al 100% de la corriente nominal, deben ser tomados los valores de las tres fases para chequear el balance de las corrientes de fase.

La medición debe empezar desde el valor de corriente de armadura máximo permitido e ir reduciendo el mismo para tratar de mantener una temperatura constante durante la realización de la prueba.

Por otro lado el procedimiento descrito por IEC 34-4 [7] es el siguiente:

- a) Se mide en forma simultánea la corriente de excitación y la corriente en línea del inducido, donde una de las lecturas se toma a una corriente cercana de la corriente nominal.

4.3.3.2. Resultados de la prueba de cortocircuito para la máquina sincrónica

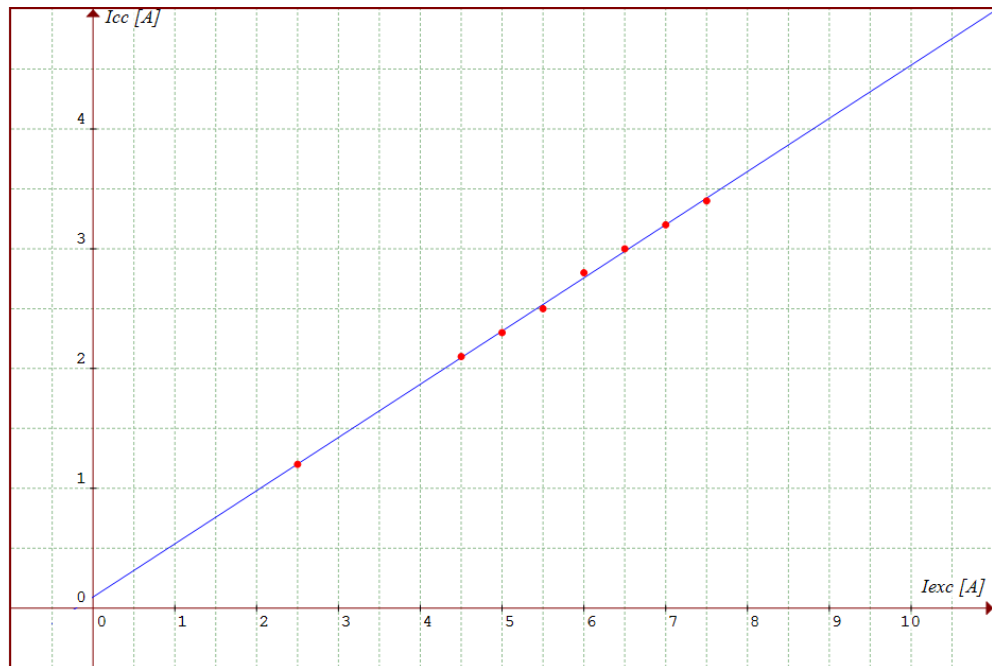
Las condiciones de ensayo de esta prueba para la máquina eléctrica generalizada son las siguientes:

- Bobinas del circuito estatórico de la máquina en serie con la fuente de alimentación y con un conjunto de resistencias limitadoras.
- Circuito del rotor colocado en la posición A, de tal manera de trabajar con dicho arrollado en estrella.
- Máquina generalizada trabajando como generador.
- Máquina de carga trabajando como primo motor de la máquina generalizada.
- Bornes del circuito del rotor de la máquina generalizada cortocircuitados.
- Velocidad de giro igual a la de sincronismo a 60 Hz.
- Tensión nominal aplicada a los devanados del estator de la máquina generalizada igual a 220Vdc.
- Corriente del rotor para la configuración en estrella igual o menor a 14 A.

Los resultados obtenidos de esta prueba se reflejan en la tabla 18.

Tabla 18. Resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito para la máquina sincrónica.

I_{exc} [A]	I_{cc(am)} [A]	I_{cc(az)} [A]	I_{cc(ro)} [A]
2,5 ± 0,5	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1	1,2 ± 0,1
4,5 ± 0,5	2,1 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,1 ± 0,1
5,0 ± 0,5	2,3 ± 0,1	2,3 ± 0,1	2,3 ± 0,1
5,5 ± 0,5	2,5 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,5 ± 0,1
6,0 ± 0,5	2,8 ± 0,1	2,8 ± 0,1	2,8 ± 0,1
6,5 ± 0,5	3,0 ± 0,1	3,0 ± 0,1	3,0 ± 0,1
7,0 ± 0,5	3,2 ± 0,1	3,2 ± 0,1	3,2 ± 0,1
7,5 ± 0,5	3,4 ± 0,1	3,4 ± 0,1	3,4 ± 0,1



Gráfica 5. Curva $I_{cc}=f(I_{exc})$ de la prueba de cortocircuito para la máquina síncronica generalizada.

La ecuación lineal que modelo las mediciones de la curva de cortocircuito es la siguiente:

$$I_{cc} = 0,4441 \cdot I_{exc} + 0,0923 \quad (161)$$

4.3.4. Curva o punto de carga con factor de potencia cero de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina síncronica trifásica

Para encontrar la reactancia síncronica de una máquina de este tipo, es necesario, según sea el método, la aplicación de una prueba con carga como se explica en los siguientes subcapítulos.

4.3.4.1. Descripción de la prueba de carga para la máquina sincrónica según norma IEEE 115 / IEC 34-4 [11] [7]

La curva de saturación a factor de potencia cero es necesaria para realizar la deducción de la reactancia sincrónica mediante el método de Potier. La misma, es descrita en la norma IEEE 115 [11], en su sección 4.2.10 y en la norma IEC 34-4 [7] en su apartado 29.

Esta curva puede ser obtenida sobreexcitando la máquina mientras esta es conectada a una carga. Con un ajuste apropiado de la excitación de la máquina con carga, la tensión en los terminales de la misma puede ser variada mientras la corriente de armadura de la máquina permanece constante en un valor específico. Esta curva será la tensión en los terminales contra la corriente de campo para un valor constante de corriente de armadura. Esta característica es usada para obtener la reactancia de Potier para este propósito, el punto a corriente y tensión nominal es suficiente.

Por otro lado el procedimiento descrito por IEC 34-4 [7] es el siguiente:

- a) El ensayo se efectúa con la máquina funcionando como generador o como motor.
- b) Cuando la máquina funcione como motor la carga en el eje debe ser cero.
- c) Durante el ensayo se determinan los valores de la corriente de excitación que corresponda a los valores de tensión y corriente del inducido que no difiera en menos de $\pm 0,15$ de los valores nominales respectivos, a un factor de potencia y en funcionamiento en atraso.

4.3.4.2. Resultados de la prueba de carga para la máquina sincrónica

Las condiciones de ensayo de esta prueba para la máquina eléctrica generalizada son las siguientes:

- Bobinas del circuito estatórico de la máquina en serie con la fuente de alimentación y con un conjunto de resistencias limitadoras.
- Circuito del rotor colocado en la posición A, de tal manera de trabajar con dicho arrollado en estrella.
- Máquina generalizada trabajando como generador.
- Máquina de carga trabajando como primo motor de la máquina generalizada.
- Carga inductiva conectada en los terminales del circuito del rotor de la máquina.
- Velocidad de giro igual a la de sincronismo a 60 Hz
- Tensión nominal aplicada a los devanados del estator de la máquina generalizada igual a 220Vdc.
- Corriente del rotor para la configuración en estrella igual o menor a 14 A
- Frecuencia de la red igual a 60Hz.

Los resultados obtenidos de esta prueba se reflejan en la [tabla 19](#).

Tabla 19. Resultados prácticos de la prueba de carga para la máquina sincrónica.

I_{exc} [A]	I_{ro} [A]	I_{AZ} [A]	I_{AM} [A]	V_{AZ-AM} [V]	V_{RO-AZ} [V]	V_{RO-AM} [V]
7,5 ± 0,5	1,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	152 ± 2	152 ± 2	152 ± 2

4.3.5. Determinación de la reactancia sincrónica de la máquina sincrónica

Existen diferentes métodos para la determinación de la reactancia sincrónica. El método más recomendado es el método de Potier descrito en la norma IEEE 115 [11] y en la norma IEC 34-4 [7], para el cual se necesita además de una prueba de vacío y cortocircuito, una prueba con carga, sin embargo, para la máquina generalizada se verificó que la aplicación de este método no es posible debido a la presencia de escobillas y a la particularidad que presenta la máquina al tener una corriente de excitación elevada en comparación con la corriente de carga, por lo que el método sugerido es el de Behn-Eschemburg, mediante el cual se halla una reactancia que lleva el mismo nombre del método y que se explica en la siguiente subsección.

4.3.5.1. Método de Behn-Eschemburg [10].

El método de Behn-Eschemburg considera dos hipótesis:

- Máquina de polos lisos.
- Circuito magnético de la máquina no saturado.

Para determinar dicha reactancia (L_w), se necesitan la curva de vacío y la curva de cortocircuito, tal como se muestra en figura 26.

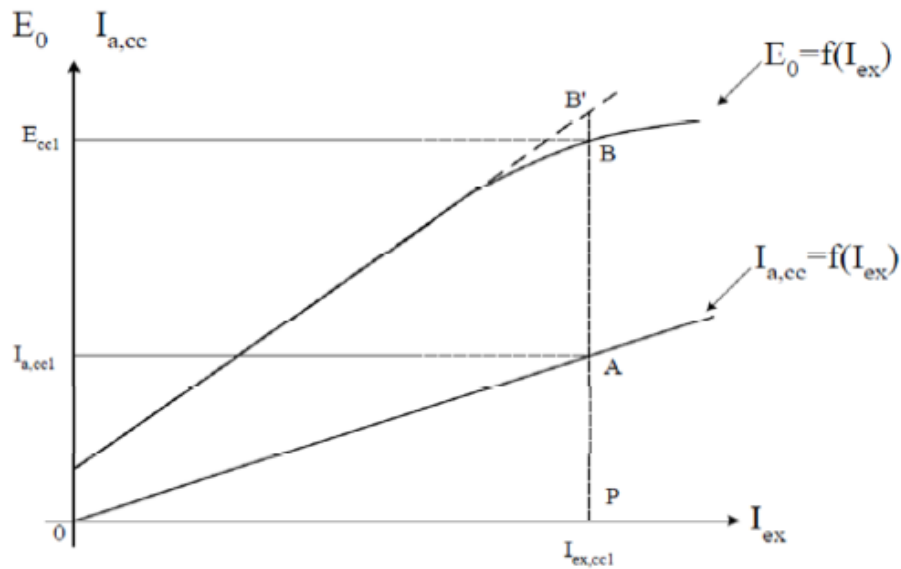


Figura 27. Curvas de vacío y cortocircuito para la aplicación del método de Behn-Eschemburg. [10]

El método a aplicar mediante las curvas arroja la siguiente ecuación:

$$PB = E_{CC1} = \sqrt{R_a^2 + (LW)^2} * I_{CC1} = \sqrt{R_a^2 + (LW)^2} * PA \quad (161)$$

$$LW = \sqrt{\left(\frac{E_{CC1}}{I_{CC1}}\right)^2 - R_a^2} \quad (162)$$

Donde:

$E_{CC1} = PB =$ Tensión nominal

$R_a =$ Resistencia del devanado, en este caso, rotor en estrella.

$LW =$ Reactancia de Behn-Eschemburg.

$I_{CC1} = PA =$ Corriente de cortocircuito correspondiente la corriente de excitación a tensión nominal.

4.3.5.2. Aplicación del método de Behn-Eschemburg

De la curva de vacío (gráfica 6) para una tensión nominal E_{CC1} igual a 220 V se tiene una corriente de excitación de 9,5 A, por lo que la corriente correspondiente de cortocircuito a partir de la curva de la gráfica 7 es de 4.311 A.

Se tiene además una resistencia del rotor en estrella igual a $0,359 \Omega$.

Por lo tanto el método de Behn-Eschemburg a partir de la **ecuación 162** arroja el siguiente resultado:

$$Lw = 51,031 \Omega$$

4.3.6. Modelo circuital de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina síncrona trifásica.

El circuito resultante de la máquina generalizada modelo CG3824 configurada como máquina síncrona trifásica viene dado por la siguiente figura:

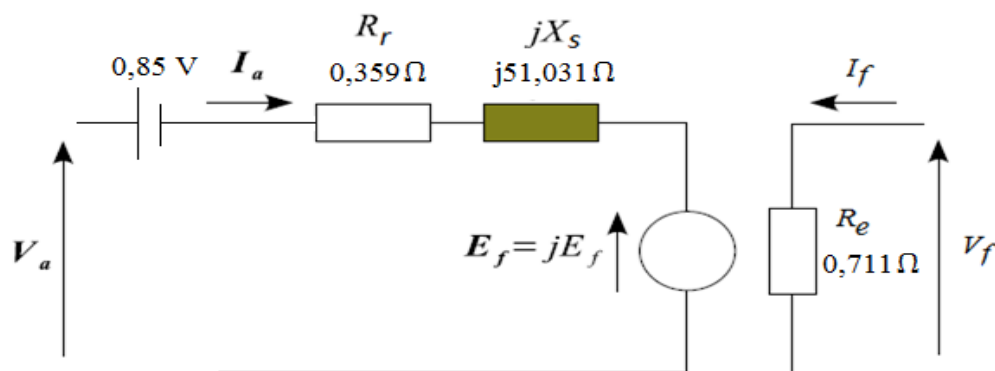


Figura 28. Circuito equivalente de la máquina generalizada modelo CG3824 configurada como máquina síncrona trifásica.

Donde,

V_a	Tensión en bornes de la máquina
I_a	Corriente de armadura o de rotor
R_r	Resistencia del rotor
X_S	Reactancia sincrónica
E_f	Tensión inducida por el campo
I_f	Corriente de campo
R_e	Resistencia del estator
V_f	Tensión dc del campo o de la excitación

Aunque en la deducción de los modelos circuitales se despreciaba el efecto de las escobillas, en los circuitos obtenidos si se consideró.

4.4. Caracterización de la máquina generalizada modelo CG3824 como máquina de corriente continua.

La máquina generalizada en configuración como máquina dc independiente, se muestra en figura 29. Para realizar dicha conexión el disco ajustable de la máquina debe estar en la posición 3 y cumplir con los valores nominales mostrados en la figura 29.

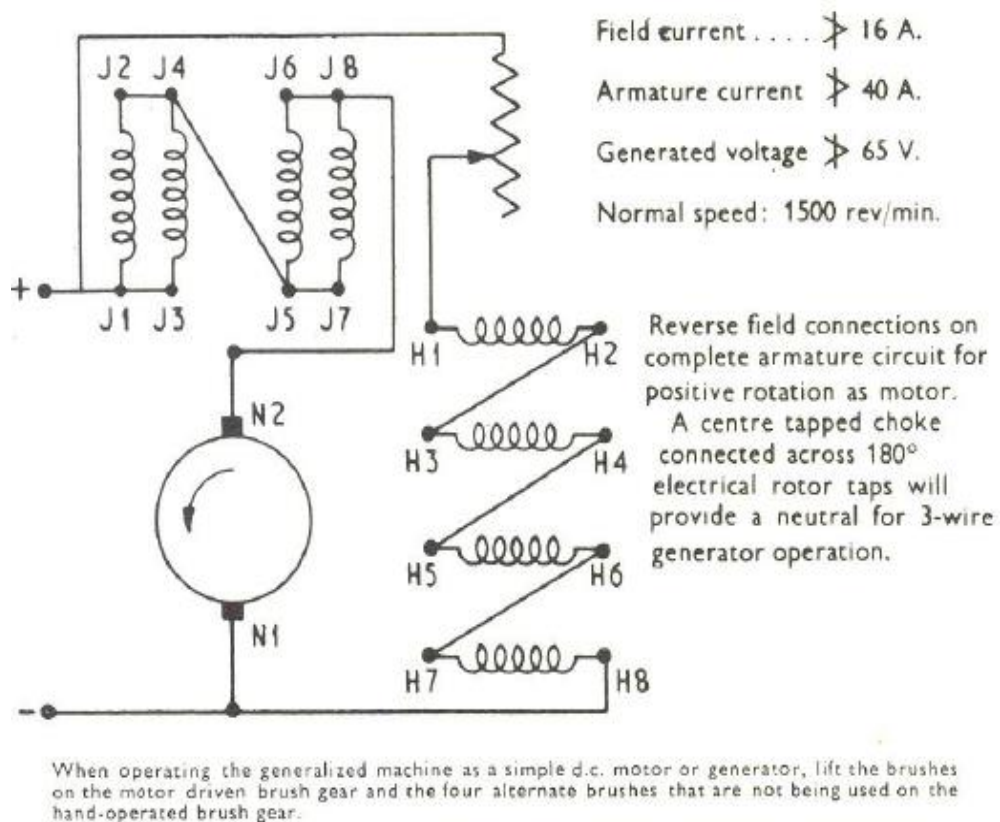


Figura 29. Configuración de la máquina generalizada como máquina de corriente continua independiente. [3]

Por otro lado, en la figura 30, se muestra como se configura el panel para poder hacer funcionar a la máquina generalizada en el modo dc independiente.

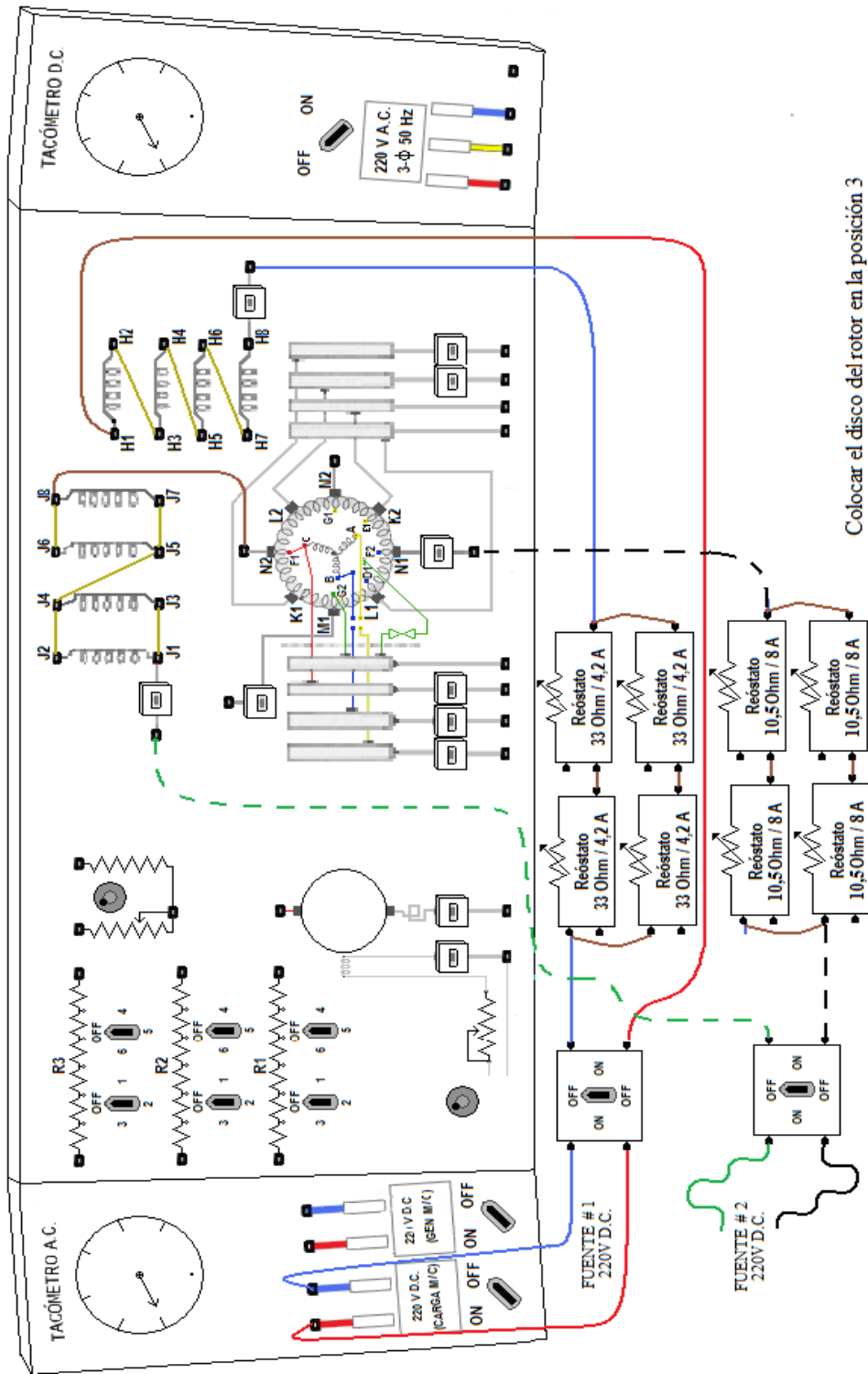


Figura 30. Diagrama de operación como motor D.C. con excitación independiente. [4]

4.4.1. Determinación de los parámetros de la máquina eléctrica generalizada trabajando como máquina de corriente continua independiente

Para caracterizar la máquina generalizada como máquina dc independiente, basta con conocer los valores de las resistencias que están involucradas en el circuito equivalente, tal como se explicó en la subsección 2.3.3, y utilizando los valores calculados en las subsecciones 3.1.2 y 3.1.4, además como norma para extender el proceso de las pruebas a máquinas dc se recomienda la norma IEEE 113-1985 [12].

4.4.2. Modelo circuital de la máquina eléctrica generalizada modelo CG3824 trabajando como máquina de corriente continua.

El circuito resultante de la máquina generalizada modelo CG3824 configurada como máquina sincrónica trifásica viene dado por la siguiente figura:

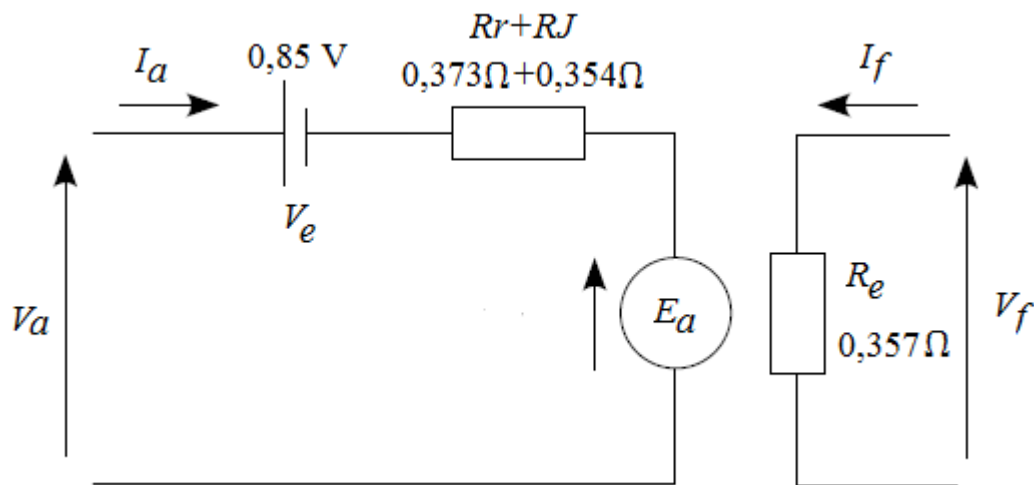


Figura 31. Circuito equivalente de la máquina generalizada modelo CG3824 configurada como máquina de corriente continua independiente.

Donde,

V_a	Tensión en bornes de la máquina
I_a	Corriente de armadura de la máquina
V_e	Tensión en las escobillas
$R_r + RJ$	Resistencia del rotor y del devanado estático J
E_a	Tensión inducida
I_f	Corriente de campo
R_e	Resistencia del estator
V_f	Tensión de campo o de excitación

CONCLUSIONES

Una máquina eléctrica generalizada, es un equipo que permite implementar diferentes tipos de máquinas bajo un mismo principio de funcionamiento el cual consiste en la idealización de dos ejes en cuadratura tanto para el rotor como el estator, por lo que se suponen cuatro corrientes que circulan por cada eje y que la superposición de estos genera las fuerzas magnetomotrices necesarias para producir el torque y el funcionamiento de la máquina como cualquiera de los tipos de máquinas posibles.

Las configuraciones de la máquina generalizada analizadas en este trabajo fueron la máquina asincrónica trifásica, sincrónica trifásica y dc independiente para las cuales se determinaron los modelos analíticos mediante un cambio de coordenadas, el cual es un método de suma importancia en el análisis de máquinas, que permite la creación de un par de ejes en cuadratura y además simplifica las ecuaciones diferenciales haciéndolas independiente de la posición relativa entre ambos grupos de ejes.

Las pruebas realizadas a la máquina generalizada fueron las establecidas por las normativas IEEE respectivas, siendo estas satisfactorias para obtener los parámetros equivalentes de los diferentes tipos de máquinas configuradas los estudios comparativos entre los valores calculados y los obtenidos del manual con respecto al valor óhmico de los devanados mostró una amplia diferencia, lo que demuestra que la referencia de temperatura utilizada por el fabricante, a la cual llama como fría, fue un valor muy diferente al utilizado durante la prueba.

Para el caso de la inductancia, al realizar la comparación de los datos dados por el fabricante y los obtenidos por las mediciones realizadas a la máquina

asincrónica, se tiene que tanto para el rotor como el estator existe una amplia diferencia que proviene de las aproximaciones que realiza el método A y B para el cálculo de los parámetros.

La máquina generalizada modelo CG3824 constituye una base de información muy importante, para futuras investigaciones en el campo de las máquinas eléctricas y además, con la determinación de los circuitos equivalentes, se tendrá una referencia para los resultados de las pruebas que se realizan con la misma por lo que la máquina generalizada puede ser objeto de prácticas de laboratorio de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela.

RECOMENDACIONES

Luego de haber desarrollado las pruebas a la máquina generalizada modelo CG3824, específicamente a los tipos de máquina convencional, es decir, máquina asincrónica y sincrónica trifásicas, así como para la máquina dc con excitación independiente, se recomienda que ésta sea objeto de futuras investigaciones e inclusive, siendo considerada como parte de las prácticas que se desarrollan en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela, puesto que tiene muchas aplicaciones que derivan de la amplia cantidad de conexiones que se pueden llevar a cabo con la referida máquina.

Con lo referente al tema de transformación de coordenadas, el mismo debería ser incluido en los tópicos de alguna de las materias relacionadas con máquina eléctricas debido a que la aplicación del mismo, simplifica mucho el análisis tanto transitorio como permanente de las máquinas, y permite desarrollar modelos analíticos que pueden ser de gran ayuda para futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Aller, Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General, Caracas: EQUINOCCIO, 2007.
- [2] J. A. Tapia, *Máquinas Rotatorias*, Chile: Universidad de Concepción, 2003.
- [3] *Generalized Electric Machine Set. Instructions for operation and maintenance*, Associated Electrical Industries Ltd, 2da edition, 1967.
- [4] Vásquez, Deniter, Trabajo Especial de Grado: "*Estudio de la Operatividad de la Máquina Generalizada*". Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2011
- [5] Pérez, J., Malpica, W., Publicación JIFI: *Circuito Equivalente de una máquina Eléctrica Generalizada Real como Motor Asíncronico*. 2014
- [6] IEEE Std.118-1978. "*IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement*".
- [7] IEC 60034-4 1995. "*Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Test*".
- [8] IEC 60034-2 1972. "*Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles)*".
- [9] IEEE Std.112-2004. "*IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*". 2004
- [10] Chassand, J., Cepeda, A., Molina, J., Ojeda, N., Rangel R., *Guía del Laboratorio de Máquinas Eléctricas: Máquinas de corriente continua, máquinas asíncronas y máquinas sincrónicas*. 1999.

- [11] IEEE Std.115-1995. "*IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines*".
- [12] IEEE Std 113-1985. *IEEE Guide: Test Procedures for Direct-Current Machines*. 1985.

BIBLIOGRAFÍA

J. M. Aller, Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General, Caracas: EQUINOCCIO, 2007.

J. A. Tapia, *Máquinas Rotatorias*, Chile: Universidad de Concepción, 2003.

Chapman Stephen J. Máquinas Eléctricas, 5ta edición, ed. McGraw-Hill, 1989.

Kosow Irving L. Máquinas Eléctricas y Transformadores, 2da edición, ed. Prentice-Hall, 1993.

Fitzgerald A. E. Máquinas Eléctricas, 5ta edición, ed. McGraw-Hill, 1992.

Generalized Electric Machine Set. Instructions for operation and maintenance, Asociated Electrical Industries Ltd, 2da edition, 1967.

Vásquez, Deniter, Trabajo Especial de Grado: "*Estudio de la Operatividad de la Máquina Generalizada*". Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2011

IEEE Std.118-1978. "*IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement*".

IEC 60034-4 1995. "*Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Test*".

IEC 60034-2 1972. "*Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles)*".

IEEE Std.112-2004. "*IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*". 2004

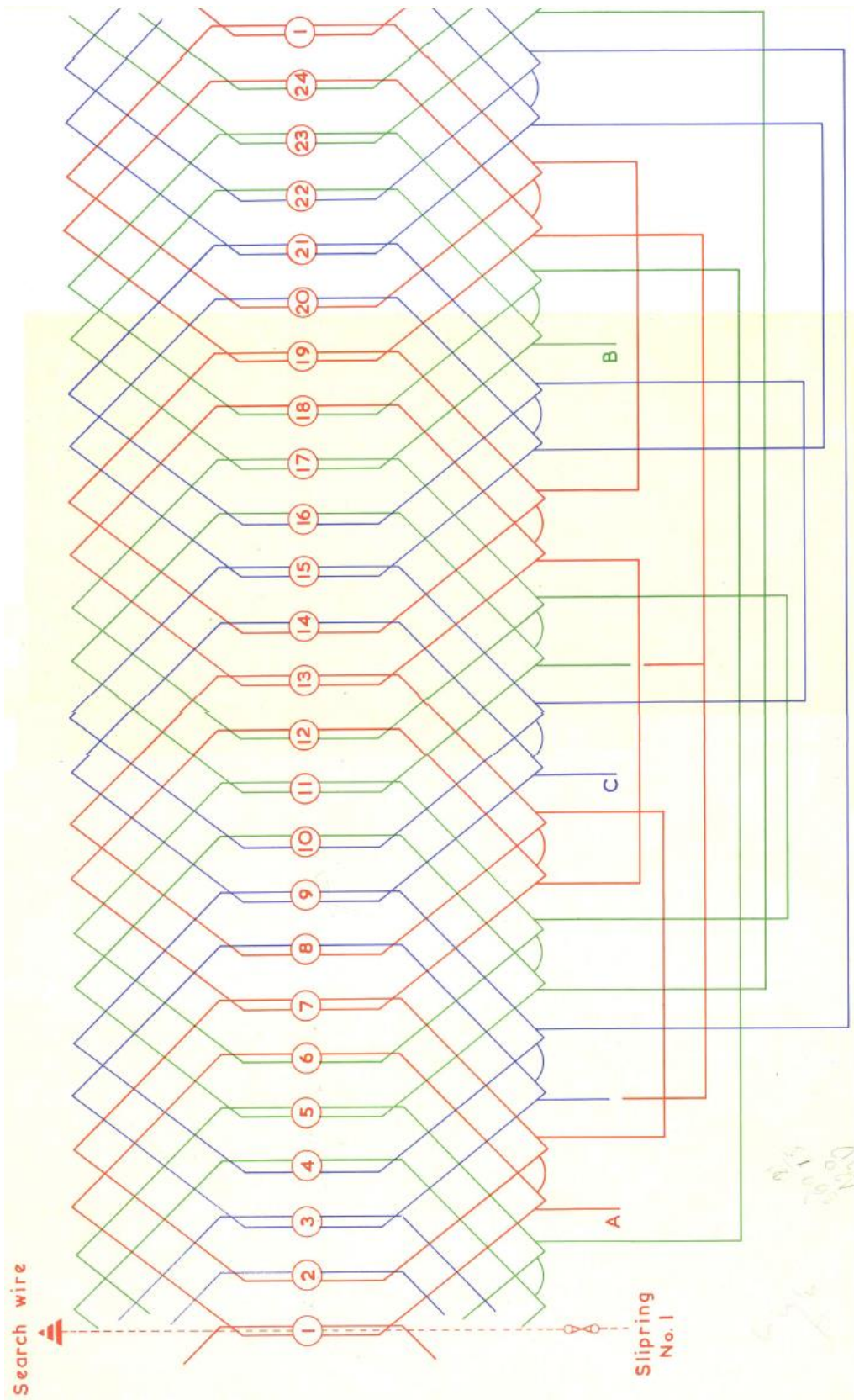
Chassand, J., Cepeda, A., Molina, J., Ojeda, N., Rangel R., *Guía del Laboratorio de Máquinas Eléctricas: Máquinas de corriente continua, máquinas asincrónicas y máquinas sincrónicas*. 1999.

IEEE Std.115-1995. "*IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines*".

IEEE Std 113-1985. *IEEE Guide: Test Procedures for Direct-Current Machines*. 1985.

ANEXOS

ANEXO 1. Devanado del rotor de la máquina generaliza modelo
CG3824 conectado en estrella [3]



ANEXO 2. Devanado del estator de la máquina generalizada modelo
CG3824 [3]

