

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA OPERATIVIDAD DE LA MAQUINA ELECTRICA GENERALIZADA MARCA A.E.I.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central De Venezuela
por el Br. Díaz Vásquez Deniter Luis
para optar por el título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2013.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA OPERATIVIDAD DE LA MAQUINA ELECTRICA GENERALIZADA MARCA A.E.I.

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Wilmer N. Malpica

Presentado ante la ilustre
Universidad Central De Venezuela
por el Br. Díaz Vásquez Deniter Luis
para optar por el título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2013.

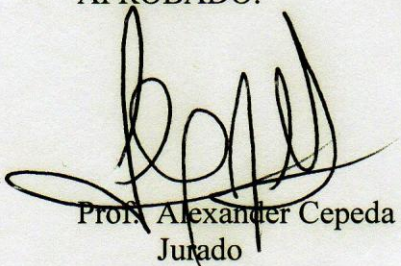
CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 30 de abril de 2013

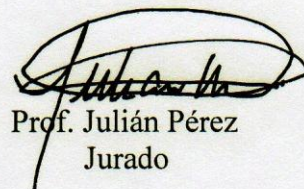
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Deniter L. Díaz V., titulado:

“ESTUDIO DE LA OPERATIVIDAD DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA GENERALIZADA MARCA A.E.I.”

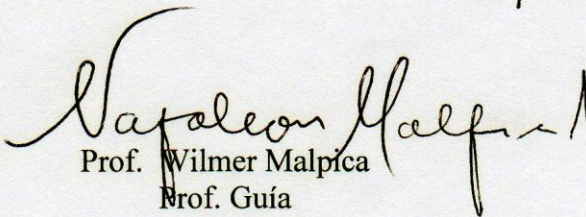
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Alexander Cepeda
Jurado



Prof. Julián Pérez
Jurado



Prof. Wilmer Malpica
Prof. Guía

DEDICATORIA

Le dedico este triunfo a Dios, porque siempre ha estado a mi lado.

A mi Madre con todo el amor del mundo, porque siempre se ha preocupado por mi salud y bienestar, porque siempre ha creído en mí, porque me guió desde mis primeros pasos y me enseñó a tener fe en mi mismo, a encararme con el triunfo y el desastre, y a ser un hombre de bien.

A mi Padre, porque me enseñó que lo más importante en la vida es la dignidad del hombre, a luchar por mis sueños, a no perder mis rasgos sin importar el ambiente en el que me desenvuelva, a trabajar por mi futuro, a vivir amando a la Patria, a defender siempre la verdad y las virtudes más nobles del ser humano sin miedo y aunque me hostiguen por ello, porque este triunfo que he alcanzado tiene aún más significado al mantener esos valores.

A mis Hermanos Deniter H., Fabiola y Yoselin, por estar conmigo en los grandes momentos y darme su valioso apoyo.

A mi amada novia Narvik García, quien me brinda la alegría más grande de mi vida al estar a mi lado, que me motiva y me da aún más fuerzas para continuar y ser mejor cada día, que me llena de esperanzas e ilusiones, y que mucho más que mi compañera sentimental se convirtió en parte de mí, porque sé que juntos alcanzaremos además de nuestros sueños, lo sublime.

A la Máxima Casa de Estudio, mi querida Universidad Central de Venezuela y en especial a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, con la esperanza de que este proyecto contribuya al crecimiento de los estudiantes en cuanto al conocimiento y entendimiento de diversos tipos de máquinas, para ayudar así a la formación de nuevos profesionales.

Y a mi persona, por mantener el sueño y no decaer ante todos aquellos obstáculos que se me han presentado en la vida, porque esas cosas solo me hicieron más fuerte y me forjaron un carácter inquebrantable y un orgullo indomable, con los cuales he logrado superar todas las adversidades con entereza y alcanzar ese respeto que verdaderamente importa “el autorespeto”.

Deniter Luis Díaz Vásquez

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

A mis padres que con todos sus sacrificios dedicación y enseñanzas, formaron a un hombre capaz de luchar y alcanzar sus sueños, de corazón muchísimas gracias

A mi tutor Wilmer Napoleón Malpica y los profesores José Mora, Julian Pérez, y Alexander Cepeda quienes me brindaron su apoyo, conocimientos y ayuda a lo largo de la carrera siempre que los necesité, muchas gracias.

A Daysi Riera, a María Auxiliadora y a Ligia Medrano, que más allá de cumplir con sus responsabilidades se convirtieron en colaboradoras y amigas a lo largo de mi vida universitaria, muchas gracias.

A mis compañeros y amigos que lograron aligerar la carga al compartir tristezas y alegrías en este trayecto, de verdad gracias.

Y en fin, a todas aquellas personas que intervinieron de alguna manera en este proyecto valga mi reconocimiento y mis más sinceros agradecimientos por la colaboración prestada.

Deniter Luis Díaz Vásquez

Deniter L., Díaz V.

ESTUDIO DE LA OPERATIVIDAD DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA GENERALIZADA MARCA A.E.I.

Tutor Académico: Ing. Wilmer N. Malpica. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad De Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Universidad Central de Venezuela. Año 2013, 122 h. + anexos

Palabras Clave: Máquina generalizada; Pruebas de funcionamiento; Diagnóstico del equipo; Máquinas D.C.; Máquinas A.C.; Metadina; Amplidina; Motor Schrage; Motor de Repulsión; Motor Universal; Fuente Bifásica; Propuestas de Esquemas de Automatización; Practicas Propuestas.

Resumen: Se plantea el estudio de la operatividad de una máquina generalizada marca A.E.I. que forma parte de todo un conjunto que se conoce como “El Conjunto de la Máquina Generalizada” y con la cual, los estudiantes de la escuela de ingeniería eléctrica de la U.C.V. podrán hacer diversos experimentos con un mismo equipo, ya sean en A.C. o D.C. Esto constituye una herramienta grandiosa para la docencia y la formación de nuevos profesionales, y para ello, este proyecto no solo incluye los principios básicos del funcionamiento, las pruebas de accionamiento, y el diagnóstico del estado de la máquina generalizada bajo diferentes modos de operación, sino que además, ofrece una teoría básica de una serie de máquinas que son posibles de obtener con su respectivo diagrama de conexión, y varias propuestas de prácticas de laboratorio, para facilitar así las actividades que se pueden realizar con este equipo. Por otra parte, en este proyecto se proporcionan otras propuestas, respecto a varios esquemas de automatización para adquirir y registrar las variables y señales que sean de interés para un determinado estudio.

INDICE GENERAL

	Pag.
DEDICATORIA -----	ii
AGRADECIMIENTOS -----	iii
RESUMEN -----	iv
INDICE GENERAL -----	v
INDICE DE FIGURAS -----	viii
INDICE DE TABLAS -----	xi
INTRODUCCIÓN -----	1
CAPITULO I -----	2
1.1. Planteamiento del Problema -----	2
1.2. Objetivo General -----	2
1.3. Objetivos Específicos -----	2
1.4. Alcances -----	3
1.5. Limitaciones -----	3
1.6. Metodología -----	4
CAPITULO II -----	5
2. Marco Teórico -----	5
CAPITULO III -----	12
3. Elementos que Constituyen el Conjunto de la Máquina Generalizada -----	12
3.1. La Máquina Generalizada y sus Características Constructivas -----	12
3.2. La Máquina de Carga D.C. DY2215 -----	15
3.3. El Transductor de Par -----	16
3.4. Torquímetro Tipo MTM2 y sus Características Constructivas -----	16
3.4.1. Procedimiento de Instalación del Torquímetro Tipo MTM2 -----	17
3.5. Tacómetro Generador -----	18
3.5.1. Tacómetro Generador A.C. -----	18
3.5.2. Tacómetro Generador D.C. -----	19
3.6. Motor de Escobillas BD2508B -----	19
3.7. Instrumentos y Equipos Auxiliares -----	19

CAPITULO IV	21
4. Principios Básicos de Funcionamiento de la Máquina Generalizada y Estado del Conjunto	21
4.1. Principios del Funcionamiento de la Máquina Generalizada	21
4.1.1. Principio de Funcionamiento como Máquina de Corriente Continua	21
4.1.2. Funcionamiento como Máquina de Corriente Alterna	24
4.2. Verificación del Estado de los Componentes del Conjunto de la Máquina Generalizada	30
CAPITULO V	38
5. Descripción del Funcionamiento del Conjunto de la Máquina Generalizada	38
5.1. Fuentes de Alimentación y Equipo de Control	38
5.2. Claves Para Operar el Conjunto de la Máquina Generalizada	41
5.3. Operación de la Maquina en Modo D.C.	44
5.3.1. Operación como Máquina D.C.	44
5.3.2. Operación como Amplidina	48
5.3.3. Operación como Metadina	51
5.3.4. Operación como Transformador D.C.	54
5.3.5. Operación como Máquina de Inducción D.C.	56
5.4. Diagnóstico de la Máquina Generalizada Operando como Diversos Tipos de Máquinas D.C.	58
5.4.1. Diagnóstico como Máquina D.C. “Convencional”	58
5.4.2. Diagnóstico como Amplidina y como Metadina	58
5.4.3. Diagnóstico como Transformador D.C.	59
5.4.4. Diagnóstico como Máquina de Inducción D.C.	59
5.5. Operación de la Maquina en Modo A.C.	60
5.5.1. Operación como Máquina de Inducción con Alimentación Monofásica	60
5.5.2. Operación como Máquina de Inducción con Alimentación Bifásica	64
5.5.2.1. Diseño de una Fuente Bifásica a Partir de la Red Trifásica	65
5.5.3. Operación como Máquina de Inducción Trifásica	69
5.5.4. Operación como Máquina Sincrónica Trifásica	72
5.5.5. Operación como Máquina de Repulsión	76
5.5.6. Operación como Motor Schrage	78
5.6. Diagnóstico de la Máquina Generalizada Operando como Diversos Tipos de Máquinas A.C.	81

5.6.1. Diagnóstico como Máquina de Inducción con Alimentación Monofásica	-	81
5.6.2. Diagnóstico como Otras Operaciones de la Maquina en Modo A.C.	-----	85
5.7. Maquinas que Pueden Operar en D.C. y en A.C.	-----	86
5.7.1. Operación como Máquina Universal D.C. o A.C.	-----	86
5.7.2. Operación como Convertidor Rotatorio	-----	89
5.8. Diagnóstico de la Máquina Generalizada Operando como Máquinas que Trabajan en D.C. y en A.C.	-----	91
5.8.1. Diagnóstico como Máquina Universal en D.C. y en A.C.	-----	91
5.8.2. Diagnóstico como Convertidor Rotatorio	-----	91
CAPITULO VI	-----	92
6. Propuestas de Esquema para la Adquisición y Registro de Variables para la Máquina Generalizada	-----	92
6.1. Adquisición y Registro de Variables con Osciloscopio de fósforo Digital Disponible en el Laboratorio	-----	95
6.2. Adquisición y Registro de Variables con Osciloscopio de Fosforo Digital con Puerto USB	-----	97
6.3. Diseño de Tarjeta para la Adquisición y Registro de Variables	-----	99
CAPITULO VII	-----	102
7. Proposición de Prácticas de Laboratorio	-----	102
7.1. Práctica 1. Maquina D.C. con excitación en paralelo	-----	102
7.2. Practica 2. Maquina de Inducción Trifásica	-----	108
7.3. Practica 3. Maquina de Inducción Bifásica	-----	115
CONCLUSIONES	-----	118
RECOMENDACIONES	-----	119
BIBLIOGRAFÍA	-----	120
LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	-----	121
ANEXOS	-----	122

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Partes constructivas de las máquinas eléctricas rotativas -----	5
Figura 2. Estructuras clásicas de las máquinas eléctricas rotativas -----	6
Figura 3. Escobillas -----	7
Figura 4. Tipos de arrollamientos -----	8
Figura 5. Paso polar y plano neutro -----	10
Figura 6. Devanados del estator y puntos de conexiones con el rotor -----	13
Figura 7. Disco de posiciones del rotor -----	14
Figura 8. Estroboscopio -----	14
Figura 9. Transductor de par -----	16
Figura 10. Alimentación del torquímetro -----	17
Figura 11. Conexión del torquímetro -----	17
Figura 12. Vista Frontal del torquímetro -----	18
Figura 13. Partes que componen el conjunto de la máquina generalizada -----	20
Figura 14. Comportamiento de una máquina de dos polos -----	22
Figura 15. Máquina elemental -----	23
Figura 16. Regla de la mano derecha -----	24
Figura 17. fmm de un devanado distribuido -----	25
Figura 18. Vector $B_{(\theta,t)}$ para un instante de tiempo t' -----	26
Figura 19. Densidad de flujo en el entrehierro -----	27
Figura 20. Arranque de una máquina inductiva al variar su resistencia del rotor --	28
Figura 21. Habilitación del tablero eléctrico -----	30
Figura 22. Limpieza del conjunto de la máquina generalizada -----	31
Figura 23. Verificación del estado interno del conjunto de la máquina generalizada --	31
Figura 24. Limpieza y ajuste de todas las escobillas -----	32
Figura 25. Acondicionamiento de cables con terminales -----	32
Figura 26. Verificación y reconexión de cables en la bornera -----	33
Figura 27. Reparación de pieza para tornillo de ajuste de un reóstato -----	33
Figura 28. Conexión y puesta en funcionamiento del reóstato -----	33
Figura 29. Reajuste del acople y dispositivo de medición de par -----	34

Figura 30.	Reconexión del tacómetro generador A.C.	34
Figura 31.	Reajuste de un interruptor en el tablero de control y operaciones	34
Figura 32.	Conexión de la carga	35
Figura 33.	Elaboración de barra para la calibración del torquímetro	36
Figura 34.	Cable para la adquisición de datos con el osciloscopio	36
Figura 35.	Prueba del estroboscopio	36
Figura 36.	Fuente bifásica	37
Figura 37.	Pruebas de accionamiento	37
Figura 38.	Alimentación y vista posterior del panel de control y operaciones	38
Figura 39.	Diagrama del panel de control y operaciones	40
Figura 40.	Formas de excitación de la maquina D.C.	45
Figura 41.	Diagrama de operación como motor D.C. con excitación Shunt	46
Figura 42.	Diagrama de operación como motor D.C. con excitación independiente	47
Figura 43.	La amplidina	48
Figura 44.	Diagrama de operación como amplidina	50
Figura 45.	La metadina	51
Figura 46.	Diagrama de operación como metadina	53
Figura 47.	Transformador D.C.	54
Figura 48.	Diagrama de operación como transformador D.C.	55
Figura 49.	Máquina de Inducción D.C.	56
Figura 50.	Diagrama de operación como máquina de inducción D.C.	57
Figura 51.	Máquina de Inducción “Monofásica”	61
Figura 52.	Motor de Fase Partida	61
Figura 53.	Motor con Condensador	62
Figura 54.	Diagrama de operación como máquina de inducción con alimentación monofásica	63
Figura 55.	Transformadores usados para la conexión Scott	65
Figura 56.	Conexión de la red trifásica a los transformadores TR1 y TR2	66
Figura 57.	Salida de la conexión Scott	67
Figura 58.	Diagrama de operación como máquina de inducción con alimentación bifásica	68
Figura 59.	Diagrama de operación como motor de inducción trifásico	71
Figura 60.	Diagrama de operación como generador sincrónico trifásico	75
Figura 61.	Máquina de repulsión	76

Figura 62.	Diagrama de operación como motor de repulsión	77
Figura 63.	Diagrama de operación como motor Schrage	80
Figura 64.	Esquema bifásico	83
Figura 65.	Diagrama fasorial	83
Figura 66.	Diagrama de operación como motor universal D.C.	87
Figura 67.	Diagrama de operación como motor universal A.C.	88
Figura 68.	Convertidor rotatorio	89
Figura 69.	Diagrama de operación como convertidor rotatorio	90
Figura 70.	Adquisición de datos	92
Figura 71.	Tektronix TDS3012	95
Figura 72.	Tektronix MSO2014B	97
Figura 73.	Diagrama circuital para la medición de la resistencia estatórica	108
Figura 74.	Diagrama circuital para la medición de la resistencia rotórica	109
Figura 75.	Diagrama circuital para determinar X_m y R_{fe}	111
Figura 76.	Máquina generalizada funcionando como motor	113
Figura 77.	Diagrama circuital para el generador Shunt	114
Figura 78.	Ajuste de tensiones del variac	116
Figura 79.	Diagrama circuital de la conexión Scott	116
Figura 80.	Diagrama circuital de la fuente bifásica a la máquina generalizada	116

INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas -----	8
Tabla 2. Especificaciones de La Máquina Generalizada -----	15
Tabla 3. Medición de la Carga -----	35
Tabla 4. Comparación de pruebas de accionamiento entre Amplidyne y Metadyne -	58
Tabla 5. Máquina de inducción monofásica con capacitor dada en el manual -----	81
Tabla 6. Valores obtenidos de la máquina de inducción bifásica -----	82
Tabla 7. Selección de Sensores -----	94
Tabla 8. Características del Osciloscopio Tektronix MSO2014B -----	98
Tabla 9. Ejemplo de acondicionamiento de valores para observarlos en la PC. -----	101
Tabla 10. Relaciones entre las variables en estudio -----	101
Tabla 11. Tabla propuesta registrar la medición de resistencias -----	103
Tabla 12. Tabla de mediciones propuesta para la curva de vacío -----	104
Tabla 13. Tabla propuesta para la curva E_i vs n -----	105
Tabla 14. Tabla propuesta para la Curva de Carga -----	105
Tabla 15. Tabla Propuesta para Mediciones de Laboratorio -----	107
Tabla 16. Tabla propuesta para cálculos teóricos -----	107
Tabla 17. Segunda tabla propuesta para la medición de la resistencia estática -	109
Tabla 18. Segunda tabla propuesta para la medición de la resistencia rotórica -----	110
Tabla 19. Tabla propuesta para las mediciones para determinar X_m y R_{fe} -----	112
Tabla 20. Tabla propuesta para la medición de variables -----	113
Tabla 21. Tabla propuesta para mediciones para el deslizamiento -----	114

INTRODUCCIÓN

La Escuela de Ingeniería Eléctrica “Melchor Centeno V” de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V. es una institución encargada de formar profesionales electricistas en distintas áreas de especialización, como lo son las de Comunicaciones, Electrónica, Industrial y Potencia; siendo esta última, una mención que se ocupa de tópicos como la generación, transmisión y distribución de la electricidad, así como de la ingeniería de alta tensión y del estudio de una amplia gama de dispositivos entre los cuales se pueden mencionar los transformadores, generadores y motores eléctricos entre otros, contando además con un laboratorio integrado por diversas máquinas rotativas, principio y base de este trabajo.

Entre las máquinas que se encuentran en el mencionado laboratorio, existe una en particular que fue adquirida alrededor de los años 60, fabricada por la Associated Electrical Industries Ltd (A.E.I.), junto con la colaboración del Sr. AJ Ellison del Queen Mary College, (Universidad de Londres). Este equipo conocido como “Máquina Eléctrica Generalizada”, tiene la peculiaridad, de poder funcionar o configurarse en distintos tipos de máquinas, como por ejemplo de corriente directa (D.C.) o de corriente alterna (A.C.), según la conexión que se haga, y su alcance a nivel académico por dichas características, constituye una herramienta inestimable para el aprendizaje de los alumnos de las Menciones Potencia e Industrial.

CAPITULO I

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Laboratorio de Máquinas Rotativas existe una máquina eléctrica generalizada la cual se encuentra en desuso desde hace mas tres (3) décadas, y es necesario realizar un estudio para diagnosticar su estado operativo y establecer, si es posible su puesta en funcionamiento, y de ser así, un estudio de su comportamiento ante sus diferentes escenarios experimentales.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la operatividad de la Máquina Eléctrica Generalizada marca A.E.I. ubicada en el Laboratorio de Máquinas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica “Melchor Centeno V.” y la factibilidad de incorporarla a las prácticas del laboratorio.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar el estado de cada componente de la máquina generalizada y describir su función.
- Establecer claramente el funcionamiento de la máquina generalizada.
- Hacer las pruebas de funcionamiento y operación de la máquina generalizada.
- Realizar un informe detallado con el diagnóstico del estado del equipo y las recomendaciones necesarias para trabajar con la máquina generalizada A.E.I.
- Proponer un esquema para la adquisición y registro de variables y señales objeto de estudio.
- Proponer prácticas de laboratorio basadas en la máquina generalizada A.E.I.

1.4. ALCANCES

El desarrollo de esta investigación consistió sólo en la determinación de la operatividad de la máquina generalizada, basada en pruebas del funcionamiento del conjunto y una descripción de las distintas formas de operación de las cuales se elaboraría un informe detallado con el diagnóstico del estado del equipo y las recomendaciones necesarias para trabajar con la máquina generalizada A.E.I. como los elementos principales de este proyecto. También es parte del tema, la realización de una propuesta de un esquema de adquisición y registro de variables y señales objeto de estudio y la sugerencia de prácticas de laboratorio basadas en la máquina generalizada A.E.I. que no involucren el desarrollo de las mismas.

1.5. LIMITACIONES

La escasa información sobre el conjunto, y antecedentes o trabajos previos relacionados con el tema, además de que en los programas de las asignaturas de la carrera de Ingeniería Eléctrica Mención Potencia no se abarcan todos los tipos de máquinas posibles que se pueden trabajar con el Conjunto de la Máquina Generalizada, constituyen una limitante a la hora de dar una explicación profunda de algunos de los modos de operación de la Máquina Generalizada.

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.

1.6. METODOLOGÍA

Etapas 1. Información Base.

En esta parte se recogió la información y documentación necesaria para alcanzar los estudios propuestos. Entre las cuales se pueden destacar:

1. Documentación sobre las características y fundamentos teóricos de la máquina eléctrica generalizada.
2. Documentación técnica por medio de la traducción (Inglés - Español), y revisión del manual de uso y mantenimiento de la Máquina Generalizada..
3. Consultas al personal docente y el tutor académico sobre el tema en estudio.

Etapas 2. Acondicionamiento, Pruebas de Funcionamiento y Operación del Conjunto.

Durante esta parte del estudio y con los conocimientos adquiridos de la investigación previa, se procedió a verificar el estado de cada componente de la máquina generalizada para luego realizar las debidas conexiones, probar el conjunto y así determinar las condiciones en las que se encontraba el equipo.

Etapas 3. Estudio y Diagnóstico del Conjunto de la Máquina Generalizada.

Una vez hechas las pruebas de funcionamiento de cada componente, se procedió con el estudio y análisis del comportamiento del conjunto, realizando pruebas de accionamiento de las distintas formas de operación para luego hacer las recomendaciones pertinentes y la realización de las prácticas de laboratorio con este equipo.

Etapas 4. Elaboración del proyecto por escrito.

En esta etapa se concluyó el proyecto escrito, producto de las actividades realizadas y el informe de los resultados obtenidos.

Etapas 5. Revisión y preparación

Consistió en revisar los detalles del proyecto y su informe para ajustar cualquier pormenor y hacer las correcciones oportunas, así como en preparar y complementar el material para la presentación del trabajo especial de grado.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

Las máquinas eléctricas rotativas en general, son circuitos magnéticos excitados por corriente alterna y/o continua, que tienen básicamente la misma estructura, y por lo tanto se puede dar una descripción de las partes más notables como se muestran en la Figura 1, que a su vez, permitirá conocer más adelante, tanto las limitaciones como las aplicaciones más relevantes del conjunto de la máquina generalizada.

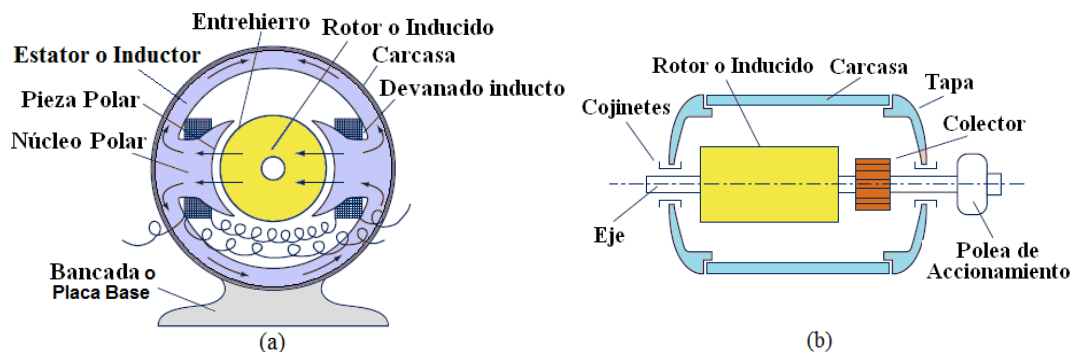


Figura 1. Partes constructivas de las máquinas eléctricas rotativas
[Tomado de <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>]

- **Carcasa:** Es la estructura que cubre al estator y permite dejar fijo el equipo y la posición del rotor. También se unen a ella los polos de la máquina y protege las zonas activas del motor contra agentes agresivos como el polvo, la humedad, etc.
- **Estator:** Es la parte estacionaria del circuito magnético que se encarga de producir y conducir el flujo. Tiene una cavidad en su interior para la pieza móvil de la máquina y en muchas máquinas rotativas también se le denomina inductor.

En la figura 2, se muestran algunas topologías, donde se observa que se puede tener una geometría cilíndrica (figura 2a y b), donde las bobinas se ubican en ranuras orientadas longitudinalmente aprovechando los 360 grados, llamado bobinado distribuido para originar la forma de onda sinusoidal deseada del flujo. O puede tener una geometría de polos salientes (figura 2c), donde las bobinas están concentradas y la forma del polo define la distribución del flujo magnético en el entrehierro.



Figura 2. Estructuras clásicas de las máquinas eléctricas rotativas
[Tomado y modificado de Maquinas Rotatorias “Juan A Tapia”].

El estator, a su vez, consta de los siguientes elementos:

- La **pieza polar**: Sujeta a la culata de la máquina, incluye al núcleo propiamente dicho y a su expansión.
- El **núcleo**: Forma parte del circuito magnético de la máquina junto con los polos, las expansiones polares, el entrehierro, inducido y la culata, y en él se encuentran los devanados inductores.
- El **devanado inductor**: Está formado por el conjunto de espiras que, en número prefijado para cada tipo de máquina, producirá el flujo de campo magnético cuando circule la corriente eléctrica.

▪ **Entrehierro**: Es el espacio que queda entre el rotor y los bordes polares del estator, evitándose de esta manera el rozamiento entre ambos.

▪ **Rotor**: Es la parte giratoria del circuito magnético y al igual que el estator, su geometría puede ser cilíndrica (Figura 2a y c) o de polos salientes (Figura 2b) para determinar la distribución del flujo en el entrehierro. A su vez, en muchas máquinas rotativas se le denomina como el inducido y consta de:

- El **núcleo del inducido**: Es el cilindro de chapas magnéticas que está fijo al eje de la máquina y que descansa sobre cojinetes o rodamientos de apoyo de tal forma, que pueda rodar libremente dentro de la cavidad. Estas chapas disponen de **ranuras** en las que se alojan los hilos de cobre del devanado inducido.
- El **devanado inducido**: Se encuentra conectado al circuito exterior a través del colector, y en él donde se produce la conversión de energía. En el que se genera la fuerza electromotriz en el caso que la máquina funcione como generador, o el par motor si la máquina funciona como motor.

- El **colector**: Es un conjunto de láminas de cobre, denominadas **delgas**, aisladas entre sí por una capa de mica y conectadas a las secciones del devanado del inducido. Sobre las delgas se deslizan las escobillas.
- **Escobillas**: Son de carbón o de grafito y se encuentran en las porta escobillas. Su función es deslizarse sobre las delgas del colector y por medio de un conductor flexible, hacer la unión con los bornes del inducido (Fig. 3).

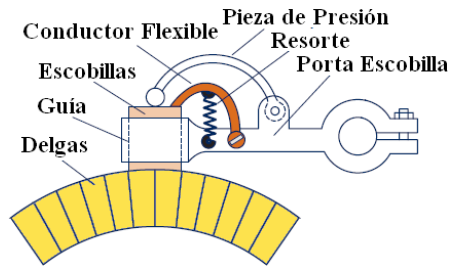


Figura 3. Escobillas.

[Tomado y adaptado de <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>]

- **Cojinetes o rodamientos**: Son donde se apoya el eje del rotor de la máquina
- **Ventilador**: Es el sistema de refrigeración del motor que junto a las aletas de la carcasa que permiten expulsar el calor producido por las pérdidas durante la operación de la máquina.

Además de las partes básicas que constituyen las máquinas rotativas, los siguientes conceptos y definiciones serán útiles para el entendimiento del conjunto de la máquina generalizada:

- **Máquina eléctrica**: Es el conjunto de mecanismos capaces de generar, aprovechar o transformar la energía eléctrica.
- **Generador eléctrico**: Máquina que transforma la energía mecánica en energía eléctrica.
- **Motor eléctrico**: Máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica.

Por otra parte, se pueden clasificar las máquinas eléctricas teniendo en cuenta consideraciones como el tipo de corriente eléctrica que utilizan, el número de fases, entre otras cosas, tal como se muestra en la tabla 1, donde se resaltan las características más relevantes:

Tabla 1. Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas

	GENERADORES	MOTORES
Corriente Continua (D.C.)	Dinamo (con excitación) - Independiente - Serie - Shunt - Compound	Motor (con excitación) - Independiente - Serie - Shunt - Compound
Corriente Alterna (A.C.)	Alternador - Monofásico - Trifásico - Polos lisos - Polos Salientes	Monofásicos Inducción - Jaula de Ardilla - Fase Partida - Condensador - Espira de Sombra - Rotor Devanado - Repulsión - Repulsión en Arranque - Repulsión - Inducción Síncrono - Histéresis - Reluctancia - Imán Permanente Polifásicos Universales Inducción - Jaula de Ardilla - Rotor Devanado Síncrono

[Tomado y adaptado de <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448127641.pdf>]

- **Máquina eléctrica generalizada:** El concepto de '*máquina generalizada*' se refiere a una máquina que tiene la libertad de representar cualquiera de los tipos de máquinas existentes. Admite derivar el principio de funcionamiento de todos los tipos de generadores o motores a partir de una formulación común.
- **Tipos de arrollamientos en máquinas D.C.:** Los arrollamientos utilizados en estas máquinas se conocen como *Arrollados múltiples (o imbricado)* y *Arrollados serie (u ondulado)*. Con ellos se consigue aumentar la f.e.m. total de la máquina, ya que en vez de una espira, se emplea un conjunto de ellas por cada polo que posea la máquina.

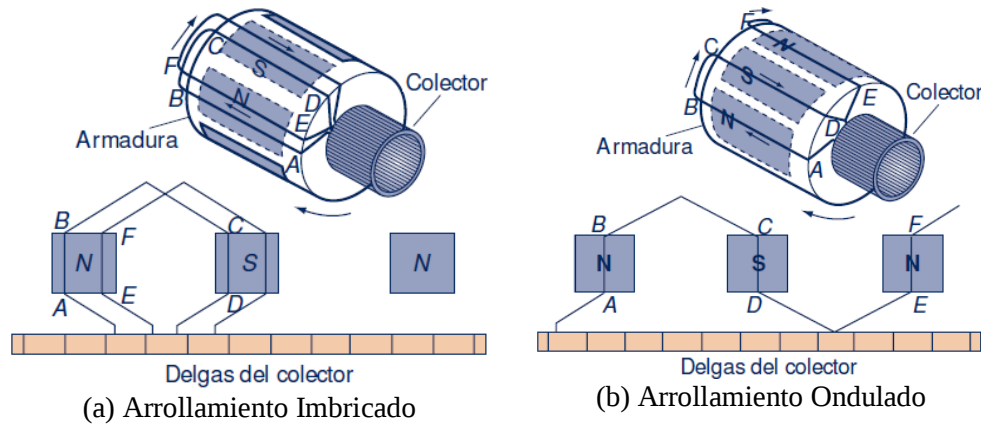


Figura 4. Tipos de arrollamientos.

La diferencia esencial entre ambos arrollamientos consiste en que en el imbricado las conexiones se realizan superpuestas, mientras que en el ondulado se realizan hacia adelante, encontrando este último mayor aplicación en máquinas de pequeño tamaño.

- **Arrollamiento múltiple o imbricado:** Radica en conectar el extremo de una bobina “A” a una delga del colector y el otro extremo “D” a la siguiente delga. Así se tiene el mismo número de delgas en el colector que bobinas en el inducido. En la Figura 4 (a) se observa que para pasar de una escobilla a la siguiente, el camino recorrido *A-B-C-D* se realiza por delante del polo norte (tramo *A-B*), y por el opuesto, al pasar por el polo sur (tramo *C-D*), con lo que, por regla general, en este tipo de arrollamiento el número de escobillas coincide con el de polos.
- **Arrollamiento ondulado o serie:** En este caso partimos del extremo de una bobina “A”, que una vez que atraviesa el polo norte, llega al polo sur, de tal forma que el lado *A-B* de la espira está en conexión con el *C-D* situado bajo el polo siguiente (Figura 4 (b)). De esta manera, no varía el valor de la f.e.m. inducida, por lo que sería necesario utilizar solamente dos escobillas, aunque por regla general se emplean tantas como polos existan.
- **Tipos de arrollamientos en máquinas A.C.:** En estos tipos de máquinas encontramos que los arrollamientos están adecuadamente conectados para obtener tres vectores de tensión con igual amplitud y desfasados 120° (devanado trifásico en estrella), lo que implica que todas las fases deben tener el mismo número de bobinas en serie. También es posible encontrar en algunas máquinas A.C. una distribución imbricada u ondulada pero siempre los tres bobinados se encontrarán espaciados a 120° entre sí.
- **Devanado de compensación:** Es un devanado de excitación recorrido por la corriente de carga o por una corriente proporcional a ella, y tiene como función reducir la distorsión del campo magnético debido a dicha corriente de carga que recorre los otros devanados y cancelar por completo la reacción del inducido, además de eliminar el desplazamiento del plano neutro.
- **Línea o plano neutro:** Corresponde al punto neutro, es decir, está en el medio de la distancia entre los polos contiguos de polaridad opuesta, y cuando los conductores están pasando por este punto, no crean tensión alguna, por no cortar líneas de

fuerza. También, es en este punto, en el que las delgas del colector unidas a los conductores son momentáneamente cortocircuitadas por las escobillas.

- **Paso polar:** Es la distancia que hay de un polo al siguiente y que por conveniencia se expresa en “ranuras” como unidad de medida, dado que estas se encuentran equiespaciadas y no se requiere ningún elemento de medición, más que simplemente contar las ranuras. Motivado a esto, la mayoría de los resultados para los pasos son números enteros relativamente pequeños.

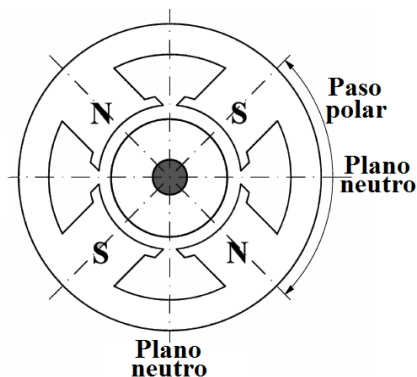


Figura 5. Paso polar y plano neutro

- **Paso de bobina:** Es la distancia entre los lados activos de las bobinas y puede ser igual, menor o mayor que el paso polar, y en esos casos se dice que la bobina es diametral, acortada o alargada respectivamente.
- **Campo magnético:** Representa un campo de fuerzas producido por un imán o corriente eléctrica sobre una región del espacio que se caracteriza por la percepción de una fuerza magnética que atrae ó repele materiales paramagnéticos.
- **Flujo magnético:** Representado por la letra griega Φ , es una medida de la cantidad de magnetismo, y se calcula a partir del campo magnético, la superficie sobre la cual actúa y el ángulo de incidencia formado entre las líneas de campo magnético y los diferentes elementos de dicha superficie.
- **Densidad de flujo magnético (B):** También llamada inducción magnética, es el flujo magnético por unidad de área de una sección normal a la dirección del flujo.
- **Fuerza magnetomotriz (fmm):** Es la fuerza capaz de producir un flujo magnético entre dos puntos de un circuito magnético o dicho de otra forma, es la corriente total multiplicada por las N vueltas de una bobina.
- **Fuerza electromotriz (f.e.m.):** Es la fuerza capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. También se define como el trabajo que se realiza para pasar la unidad de carga eléctrica positiva del polo negativo al positivo.

- **Saturación magnética:** Es un efecto que se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior de la intensidad magnética ó campo de magnetización “H”, no provoca un aumento significativo en la magnetización del material (la inducción magnética “B” no aumenta).
- **Reacción de inducido:** Al circular corriente por el inducido se va a crear un campo que distorsiona el campo creado por los polos inductores de la máquina el cual recibe el nombre de reacción de inducido.
- **Par:** Es el momento dinámico que ejerce una máquina sobre el eje provocando así que este gire.
- **Deslizamiento:** Es la diferencia que existe entre la velocidad de sincronismo y la velocidad del rotor.
- **Reóstato:** Es un resistor de resistencia variable, que tiene un contacto móvil o cursor que se mueve a lo largo de la superficie dividiendo el valor la resistencia, en dos partes de menor valor y cuya suma será el valor de la resistencia total.
- **Reóstato de arranque o de armadura:** Se coloca en serie con la armadura para limitar la corriente que circulará por ella y obtener un suave arranque durante el periodo de aceleración del rotor de una máquina eléctrica rotativa.
- **Reóstato de campo:** Se conecta en serie con la excitación de la máquina para regular la corriente de excitación, que en el caso de los motores regula su velocidad o su factor de potencia; y en el caso de los generadores a su vez regula su tensión.
- **Tacómetro generador:** Un tacómetro es un dispositivo que mide la velocidad angular de un eje giratorio.
- **Tacómetro generador A.C:** Mide la velocidad angular representada por la frecuencia de un voltaje generado.
- **Tacómetro generador D.C:** Mide la velocidad angular representada por la magnitud de un voltaje generado.
- **Torquímetro tipo MTM2:** Es un instrumento de medición de par.

CAPITULO III

3. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL CONJUNTO DE LA MÁQUINA GENERALIZADA

Conocidos los elementos básicos que constituyen a las máquinas rotativas en general y algunas de las definiciones más importantes, se dará a continuación una explicación más puntual, referente al conjunto y sus detalles constructivos así como su interacción.

El conjunto consta básicamente de: la máquina generalizada CG3824, una máquina de carga D.C. DY2215, un transductor de par, un torquímetro tipo MTM2, un tacómetro generador A.C. Tipo JA, un motor de accionamiento de escobillas BD2508B, un tacómetro generador D.C. Tipo PA, e instrumentos y equipos auxiliares.

Todos los bobinados de las maquinas del conjunto, se pueden ver en detalle en los anexos, en 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.

3.1. La Máquina Generalizada y sus Características Constructivas

El estator tiene dos bobinas distribuidas en espacios en cuadraturas (separadas a 90° entre sí), cada una dividida en cuatro secciones idénticas como se puede observar en la figura 6 y a través de las cuales se pueden realizar conexiones en serie, serie-paralelo, o paralelo y es por donde se alimenta al estator. 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 mi 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 si la forma del vector de inducción es sinusoidal o no.

Esto es posible gracias a la relación que existe entre la tensión inducida ó f.e.m. y el vector de inducción descrita por la Ley de Faraday – Lenz para un conductor de longitud l dentro de un campo magnético expresado por la siguiente ecuación:

$$E = B.l.\omega \sen \beta = E_i = B.l.\omega \text{ si } \beta = 90^\circ \quad \text{Ec. [1]}$$

Donde E_i es la tensión inducida, B es la inducción magnética, l es la longitud del conductor (cable de exploración), ω es la velocidad angular relativa entre el campo magnético y el conductor y β es el ángulo entre el vector de campo magnético y velocidad angular del conductor.

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. Por otra parte, como se ve en la figura 6, 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.

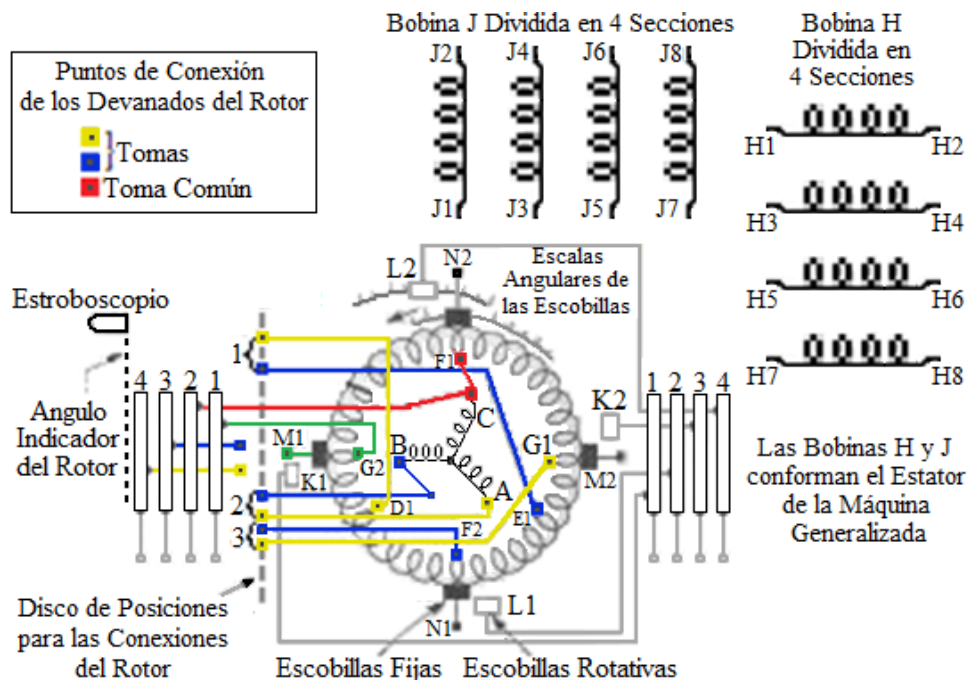


Figura 6. Devanados del estator y puntos de conexión con el rotor.

Para poder elegir entre las tres configuraciones posibles, existe un disco instalado al rotor 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 (Ver figura 7).

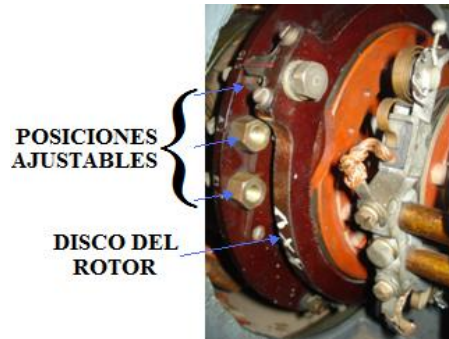


Figura 7. Disco de posiciones del rotor.

Cuando por ejemplo la máquina generalizada opera como una máquina síncrona, el ángulo de carga se puede observar por medio de un estroboscopio que 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 8.

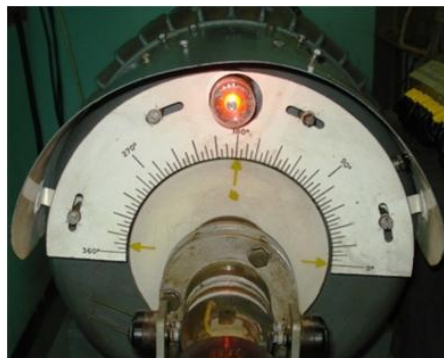


Figura 8. Estroboscopio

Además, la maquina generalizada puede ser encendida fijando el rotor en una posición por medio de un volante de mano de manera que la bobina del rotor este a cualquier ángulo deseado respecto al bobinado del estator lo que, como se verá más adelante, es una facilidad útil en el caso del motor de repulsión.

Otras características constructivas de la máquina generalizada las podemos ver en la siguiente tabla donde se resumen otras especificaciones:

Tabla 2. Especificaciones de La Máquina Generalizada

DETALLES DE DISEÑO Y BOBINADO			
Maquina Generalizada: 4 polos Longitud total del conjunto: 2,3368 m Peso del conjunto: 585,144 kg		Diámetro del Núcleo Exterior: 24,13 cm. Diámetro del Núcleo del Entrehierro: 17,78 cm 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	

[Tomado del Manual de Operaciones y Uso de la Máquina Generalizada]

3.2. 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.

3.3. 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) como se observa en la figura 9, y los cables dispuestos para poder realizar la medición.

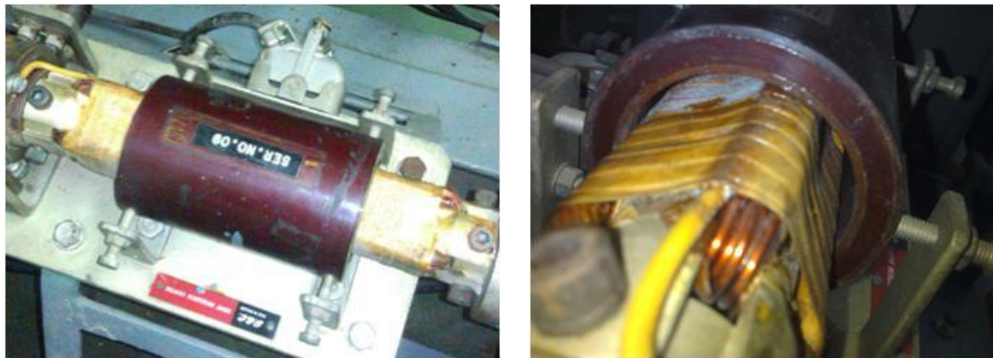


Figura 9. Transductor de par

Entonces, lo que ocurre es que al circular una corriente por la bobina 2 se producirá un flujo perpendicular a sí misma, atravesando radialmente a la bobina toroidal (bobina 1) que en principio no implica ningún efecto, sobre esta. Sin embargo, al existir torsión sobre la bobina 2 la dirección de este flujo cambia y se crea una componente que atraviesa axialmente al toroide formado por la bobina 1 produciéndose una inducción en esta que proporciona una tensión inducida medible y proporcional al par aplicado sobre la bobina 2.

3.4. 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 el estudio de 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).

3.4.1. Procedimiento de Instalación del Medidor de Torsión Tipo MTM2.

- a) Conecte el enchufe principal a la fuente de 220 V, 60 Hz conectando los cables negro y rojo a dos fases distintas de la dicha fuente y el cable blanco a la tierra como indica la figura 10.
- b) Conecte los cables amarillo y azul al tubo de par y el cable rojo y verde a la bobina del estator como se observa en la figura 11 y según los puntos que se indican en la figura 39 del panel de control y operaciones con los números 1, 2, 3 y 4 respectivamente para la conexión del torquímetro.



Figura 10. Alimentación del torquímetro

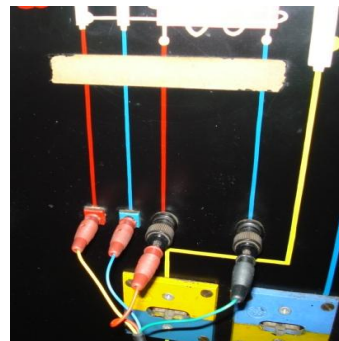


Figura 11. Conexión del torquímetro

- c) Encienda y espere 30 minutos para que el equipo se estabilice.
- d) Ajuste el medidor para que lea cero, con el “cero” de control del panel frontal de la caja de control.

- e) El indicador puede ser colocado a escala completa con el control de “sensibilidad”, con un par conocido aplicado al tubo de torsión. El control de sensibilidad está ubicado en el panel frontal de la caja de control, y el par máximo que se puede indicar es 15 lbf.ft ó 20,337 N.m.



Figura 12. Vista Frontal del torquímetro

El torquímetro está equipado con un interruptor de inversión de medición. Si el medidor retrocede cuando se aplica el par, debe seleccionarse esta posición alternativa del interruptor.

3.5. Tacómetro Generador

Dos tipos de tacómetro generadores vienen con el equipo, como se mencionó antes, una con una salida D.C. y el otro con una salida A.C. Ambas tienen salidas de tensión casi proporcionales a la velocidad y tienen fines específicos como se dirá a continuación.

3.5.1. 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 máquina generalizada, incluyendo periodos de pérdida del sincronismo o re sincronismo.

El tacómetro generador AC también 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.

3.5.2. 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.

3.6. 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.

3.7. 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 maquinas y a la carga. Adicionalmente, 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.

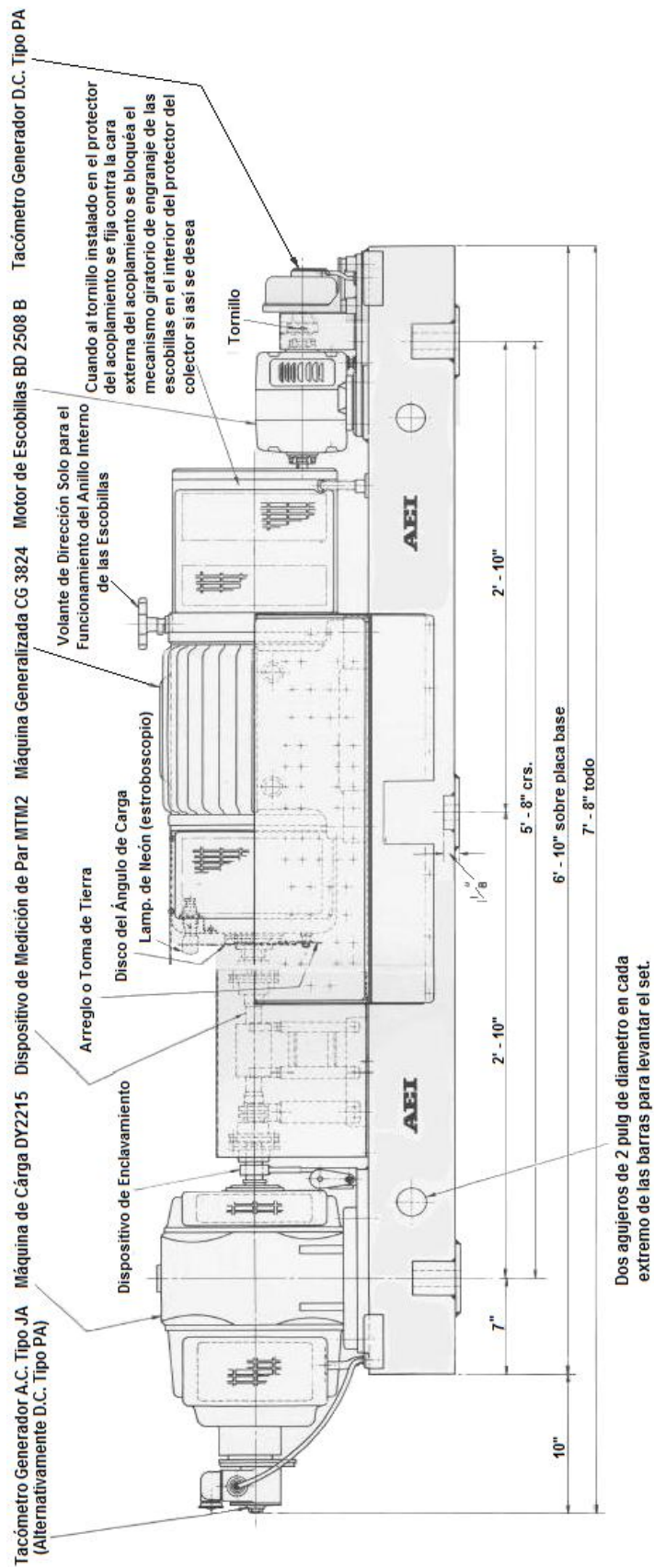


Figura 13. Partes que componen el conjunto de la máquina generalizada

CAPITULO IV

4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA GENERALIZADA Y ESTADO DEL CONJUNTO.

4.1. Principios del Funcionamiento de la Máquina Generalizada.

Como se mencionó anteriormente, las máquinas eléctricas rotativas, son circuitos magnéticos excitados por corriente alterna y/o continua, que tienen básicamente la misma estructura y cuya finalidad como tal, es la conversión de energía eléctrica en energía mecánica ó viceversa. Pues bien, si la Máquina Eléctrica Generalizada, no escapa de este principio, va mucho más allá, dado que tiene la libertad de representar muchos tipos de máquinas existentes simplemente con hacer las conexiones adecuadas.

Cuando la máquina generalizada se dispone como una máquina D.C. o como una A.C. su comportamiento en las respectivas y diversas configuraciones, corresponderán a las mismas cualidades de las máquinas convencionales como ya las conocemos.

Puesto que en el Capitulo V se resaltarán las conexiones y consideraciones necesarias para poner en marcha cada tipo de máquina con el conjunto de la máquina generalizada, en esta parte se hará un pequeño resumen de los principios básicos de funcionamiento de la máquina cuando se opera en las configuraciones más elementales:

4.1.1. Principio de Funcionamiento como Máquina de Corriente Continua

Además de la máquina D.C. convencional que comúnmente conocemos, la máquina generalizada está diseñada para funcionar como varios tipos de máquinas D.C. entre las cuales se pueden mencionar la amplidina, la metadina, el motor universal D.C., transformador D.C. y la máquina de inducción D.C. por lo que es difícil hablar de un principio de funcionamiento en corriente continua cuando en realidad, en este caso, se involucran varios conceptos y características particulares de diversas máquinas D.C. concentradas en una estructura ideada para que funcione como cualquiera de estos diversos tipos de máquinas. Sin embargo, el modo de

operación que hemos llamado (solo por el momento) máquina D.C. “convencional”, resulta suficiente para entender y asentar las bases del funcionamiento de cualquier máquina D.C. como las que se estudiarán más adelante.

Bajo la configuración de máquina D.C. se producen dos campos. Uno fijo que es creado en el estator funcionando como inductor principal, y el otro que es generado por las corrientes que circulan por las espiras del rotor.

Si el funcionamiento es como generador, el inductor se alimenta con una fuente D.C. y al haber movimiento en el rotor, se obtiene una f.e.m. en el inducido. Dicho de otra forma, lo que se busca es generar una tensión continua en los bornes del inducido, y para ello es necesario mantener una velocidad constante en el rotor, de manera que sus espiras y bobinas proporcionen una tensión fija, al moverse respecto al campo magnético del rotor. Entonces, por medio de las escobillas se toma la corriente que circula por el devanado inducido ubicado en el rotor, mientras que el devanado inductor ubicado en el estator se excita con D.C.

Con el objeto de entender fácilmente el funcionamiento, se representa un esquema elemental de una máquina de dos polos en la figura 14(a), donde el bobinado inducido consiste en una única bobina de N espiras, cuyos lados a y a' se sitúan paralelamente al eje y diametralmente opuestas en el rotor que gira a velocidad “ ω ” uniforme, arrastrado mecánicamente por su eje.

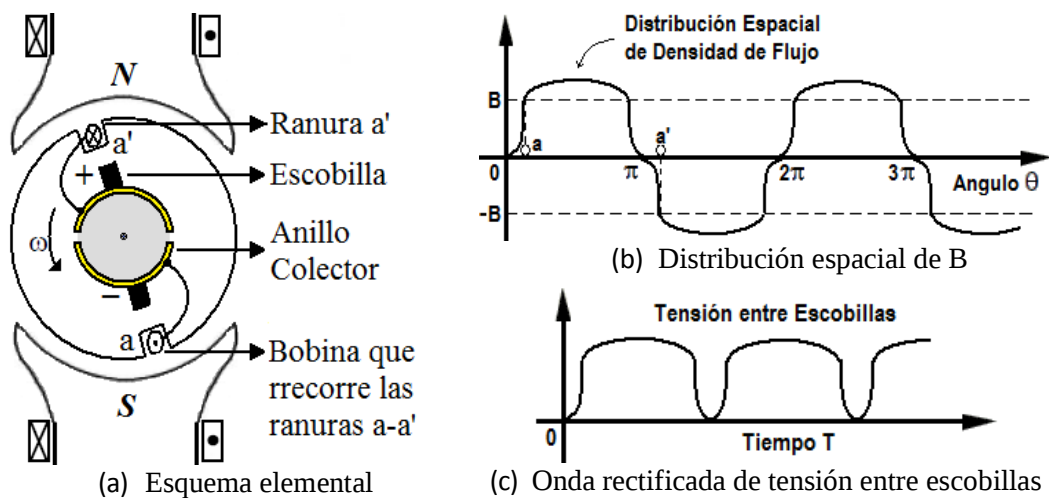


Figura 14. Comportamiento de una máquina de dos polos

La densidad de flujo en el entrehierro se distribuye aproximadamente como una onda cuadrada tal como se observa en la figura 14(b), en lugar de una en forma sinusoidal como en las máquinas de corriente alterna. La rotación de la bobina induce en ella una tensión que es función del tiempo y cuya forma de onda es semejante a la de la distribución espacial de la densidad de flujo.

Como el objetivo es generar una tensión continua, existe una rectificación de la tensión alterna producida, la cual se hace mecánicamente por medio del colector, y se obtiene a través de unas escobillas fijas apoyadas en su superficie que conectan el devanado inducido con el circuito exterior. Por tanto, la onda de tensión entre escobillas, es la que se muestra en la figura 14(c), considerando una distribución espacial de B, tal como la de la figura 14(b).

Otra forma de entender el funcionamiento de las máquinas D.C. es considerando la figura 15, donde se puede apreciar como el campo magnético atraviesa siempre perpendicularmente la superficie del rotor, que por simplicidad se supone solo con dos ranuras recorridas por la misma bobina que, a su vez, le circula una corriente que pareciera entrar al plano de la hoja en una de las ranuras, mientras que por la otra se ve, como si la corriente saliera del plano de la hoja.

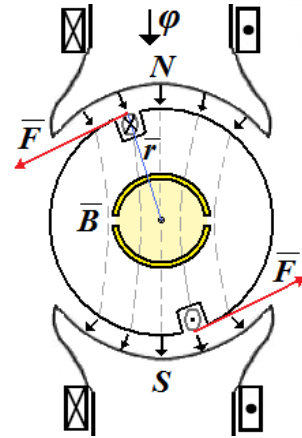


Figura 15. Máquina elemental

Entonces, lo que está ocurriendo es que se produce una fuerza tangencial a la superficie del rotor cuyo sentido se obtiene al aplicar la regla de la mano derecha (ver figura 16) y lo que no es más, que el resultado del producto vectorial entre la corriente y el campo magnético B presentes en el conductor, como lo define la ecuación 2:

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B} \quad \text{Ec [2]}$$

Asimismo, esta ecuación se relaciona con la torsión que finalmente produce el movimiento del rotor que es:

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} \quad \text{Ec [3]}$$

Entonces al sustituir una ecuación en otra se tendrá como resultado que el par es:

$$T = r.i.l.B \quad \text{Ec.[4]}$$

Indistintamente, si la máquina trabaja como generador o como motor, se debe aplicar una corriente al inductor para generar un campo magnético principal, y como se notará más adelante, más allá del tipo de excitación que se haga su comportamiento se basa en el conocimiento de dos magnitudes fundamentales que son, la tensión inducida en el rotor y el par mecánico que se desarrolla para hacer girar al rotor.

4.1.2. Principio de Funcionamiento como Máquina de Corriente Alterna

El objetivo que se desea lograr con cualquier máquina de corriente alterna, es fijar las condiciones eléctricas y/o magnéticas necesarias para que exista un par medio resultante distinto de cero capaz de vencer al par mecánico de la carga y hacer girar el rotor.

Por tanto, el principio de funcionamiento de toda máquina eléctrica rotativa se basa en la fuerza (F), que aparece sobre los conductores que conducen una corriente (I) en una porción del conductor (l), expuesto a un campo magnético (B), tal y como se vio en el punto anterior y que se expresa mediante las ecuación 5 (a) y (b) siguientes:

$$\vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B} \quad (a) \text{ Expresión Vectorial} \quad F = I.l.B.\text{sen } \alpha \quad (b) \text{ Expresión de Magnitud} \quad \text{Ec [5]}$$

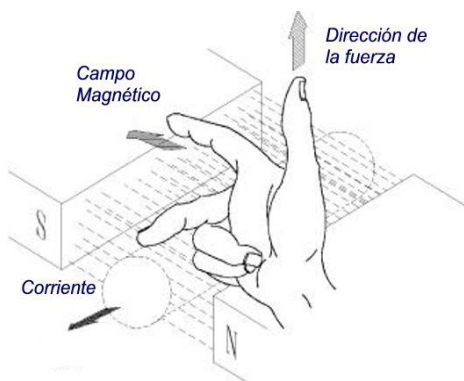


Figura 16. Regla de la mano derecha.
[Tomado de Maquinas Rotatorias
“Juan A Tapia”]

De la ecuación 5(b) se aprecia que para tener la mayor fuerza, la geometría de una máquina debe ser tal que el campo magnético y la corriente deben ser ortogonales, es decir que el ángulo entre la corriente y el campo magnético sea de 90° , y con la regla mnemotécnica “regla de la mano derecha”, se establece la dirección de la fuerza como se indica en la figura 16.

En la máquina generalizada se disponen los bobinados en ranuras de tal forma que se produce una distribución espacial de la densidad de flujo magnético en el entrehierro, como se ilustra en la figura 17(a), donde por simplicidad del dibujo, se

muestran solo las bobinas de una fase distribuidas en las ranuras del estator. Estas bobinas, están interconectadas entre sí de modo que al circular la corriente, se establecen distintas fuerzas magnetomotrices que al sumarlas producen una resultante de la fase considerada.

Por otra parte, en la figura 17(b), se logra observar las fmm resultantes de la interconexión de las bobinas del estator, así como su componente fundamental para un instante de tiempo dado.

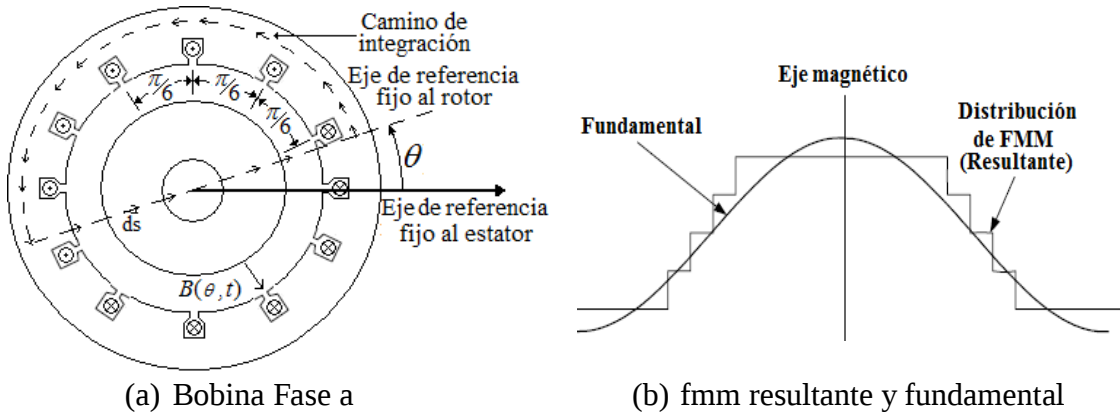


Figura 17. fmm de un devanado distribuido.

Note de la figura 17(a) que el vector inducción B en el entrehierro se ha representado en función del tiempo y de la posición angular (θ) entre los ejes de referencia fijos al estator y al rotor. Dada esta consideración, y al asumir un camino de integración y suponiendo que la permeabilidad del hierro es infinito, se obtiene una función matemática para dicho vector al aplicar la Ley de Ampere, que a su vez describe un comportamiento espacial escalonado del campo, como se muestra en la figura 18 para un instante de tiempo t' dado, y que se debe a la función $f(\theta)$ agregada para tomar en cuenta el signo de la fuerza magnetomotriz resultante, a la mencionada función matemática mientras el camino de integración gira consecuentemente con el rotor y cambia el ángulo entre los ejes de referencia como se ve en la ecuación 6.

$$B_{(\theta,t)} = \frac{n\mu_0}{2\delta} i(t) f(\theta) \quad \text{Ec [6]}$$

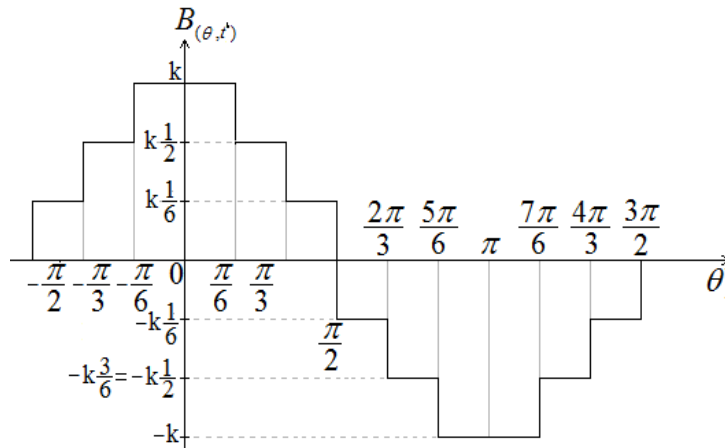
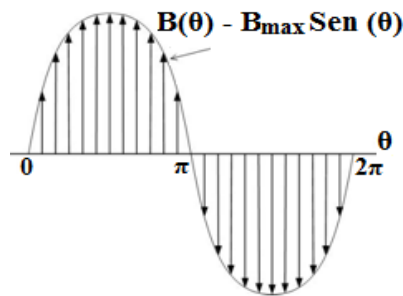


Figura 18. Vector $B_{(\theta, t)}$ para un instante de tiempo t'

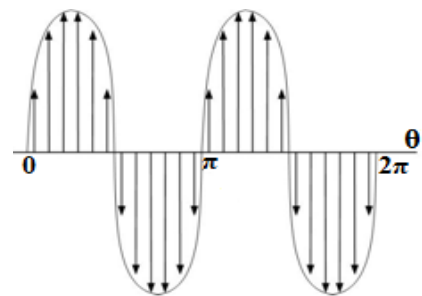
En la figura 18 se observa que el vector de inducción magnética tiende a parecerse a una onda sinusoidal cuando el devanado se distribuye en varias ranuras lo que trae como ventaja que el par de la maquina sea constante y las tensiones inducidas también sean sinusoidales, lo cual es lo más ideal y por esta razón los fabricantes de maquinas no concentran el devanado en un par de ranuras sino que lo distribuyen en varias como se observó en la figura 17(a).

Como ya se sabe entonces, la forma de $B(\theta)$ depende del tipo de bobinado, número de conductores, su distribución y su interconexión, pero además, siempre será una función periódica y el área sobre el eje será igual al área debajo de él como se puede observar en la figura 19(a).

En el caso de maquinas con 2 polos, al recorrer los 360° mecánicos del entrehierro, se recorre una vez la pareja de polos obteniendo resultados como el mostrado en la figura 19(a). Sin embargo para una maquina de 4 polos, como es el caso de la máquina generalizada, al recorrer los primero 180° mecánicos, se recorre completamente el primer par de polos. Al avanzar de 180° a 360° mecánicos, se recorre el segundo par de polos repitiendo la misma situación magnética que se tenía en el primer par de polos. Además, la interconexión de los conductores, están hechas para lograr dos pares de polos magnéticos en el entrehierro con resultados como el que se observa en la figura 19(b).



(a) B en el entrehierro en máquinas de 2 polos



(b) Desarrollo para una máquina de 4 polos

Figura 19. Densidad de flujo en el entrehierro

Para efectos de análisis, basta con evaluar el escenario en cualquier par de polos y luego extender los resultados según el número de pares de polos que tiene la máquina generaliza, definiendo entonces, el concepto de “ángulo eléctrico” ($\theta_{elec.}$) como:

$$\theta_{elec} = \frac{p}{2} \theta_{mec} \quad \text{Ec [7]}$$

Donde p es el número de pares de polos. Con ello, el análisis de un par de polos corresponderá siempre a un periodo de 360° eléctricos.

Aunado a lo anterior, otra característica importante de las máquinas de corriente alterna es el par. Si tomamos como ejemplo una máquina de inducción, la cual es muy usada en accionamientos industriales para arrancar y accionar cargas mecánicas a una velocidad dada, veremos que dependen de la relación que existe entre el par eléctrico y el par mecánico, y analizando dicha relación se pueden obtener dos casos que son:

- a) Par eléctrico menor ó igual al par mecánico ($T_e \leq T_m$).
- b) Par eléctrico mayor al par mecánico ($T_e > T_m$).

Si el par eléctrico de arranque es igual o inferior al par mecánico que requiere la carga en reposo para comenzar a moverse, el rotor no se acelerará y la máquina permanecerá detenida, lo que genera un serio riesgo de daño por calentamiento excesivo dado que la corriente que circularía, sería varias veces la nominal.

Por otro lado, si el par eléctrico de arranque es mayor que el par mecánico de la carga, habrá un par resultante que acelerará el rotor hasta un punto de la característica par eléctrico – deslizamiento, donde se equilibrarán los pares de la máquina y de la carga. Si

la velocidad alcanzada en este punto es cercana a la sincrónica, la corriente disminuirá a un nivel que permite la operación en régimen permanente.

En la figura 20, se logra apreciar que el par eléctrico de arranque de una máquina de inducción es mayor en la medida que la resistencia del rotor aumenta y a su vez, al tener una alta resistencia en el rotor se tendrán deslizamientos de operación más grandes. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las pérdidas también se incrementan por causa de una mayor resistencia en el rotor, lo que afecta adversamente la eficiencia de la máquina.

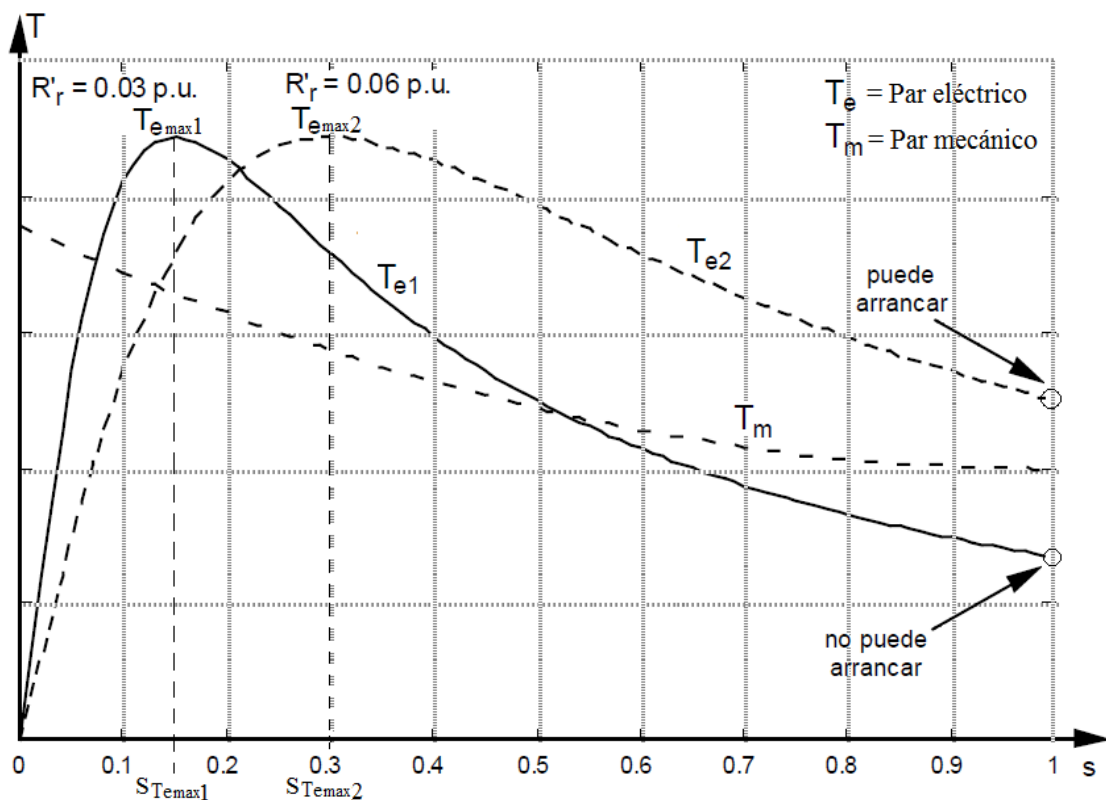


Figura 20. Arranque de una máquina inductiva al variar su resistencia del rotor [Curva par eléctrico – deslizamiento, tomada de Prof. Aller Univ. Simón Bolívar]

En el gráfico de la figura 20 se destaca también, otro punto importante de la característica par eléctrico – deslizamiento para cada máquina, como es el par máximo.

Estas características de la máquina se contraponen con respecto a la variación de la resistencia del rotor y por esta razón la máquina generalizada cuenta en el eje del

rotor con anillos deslizantes, conectados a un extremo de las fases del rotor, que permiten acoplar elementos en el exterior de la máquina con las bobinas del rotor.

Una de las ventajas de los motores asíncronos trifásicos es su rápida adaptación para cambiar el sentido de giro. Para ello es suficiente intercambiar dos fases cualesquiera de la línea de alimentación. Pues dado que en el diseño de la máquina generalizada se estableció el sentido de giro anti horario, si se ve el conjunto desde la máquina de carga D.C. es necesario respetarlo. Por tanto, si al encender la máquina generalizada como una máquina de inducción se observa que no gira en dicho sentido, entonces quitar la alimentación, intercambiar las dos fases y encender nuevamente con el sentido correcto de giro para trabajar con ella.

Por otra parte, entre las máquinas de corriente alterna, existen algunas a las que hay que darle una atención especial, como por ejemplo los Motores Sincrónicos, puesto que en ellos, convencionalmente los polos del rotor son alimentados con corriente continua mientras que los bobinados del estator están conectados a la red eléctrica A.C. Sin embargo, en el caso de la máquina generalizada, es importante resaltar que ese arreglo es al revés a cómo comúnmente lo encontramos en una máquina sincrónica convencional, es decir, en la máquina generalizada los bobinados del estator se alimentan con D.C. y los polos del rotor se conectan a la red eléctrica, pero esta variante no debe representar ninguna dificultad pues más allá de eso, el principio de su funcionamiento en sí es el mismo: generar un flujo en el entrehierro resultante, para poner en marcha la máquina.

También se debe recordar que las máquinas sincrónicas pueden funcionar como generador o motor y sólo son capaces de operar a la velocidad de sincronismo, o dicho de otra forma, a la velocidad mecánica equivalente a la velocidad de rotación del campo magnético rotante (C.M.R.), y la máquina generalizada bajo esta configuración tendrá las mismas consideraciones.

4.2. Verificación del Estado de los Componentes del Conjunto de la Máquina Generalizada.

Antes de hablar del estado de los componentes el conjunto, es necesario recordar y mencionar someramente la constitución del mismo como se hace a continuación.

El conjunto consta de un tacómetro generador A.C. para medir la velocidad angular del conjunto conectado por un extremo de una máquina D.C. (Máquina de Carga DY2215), que a su vez, está acoplada por el rotor por medio de un torquímetro transitorio a la máquina generalizada. Al otro extremo de la máquina generalizada se encuentra pequeño motor D.C. dispuesto para hacer girar un juego de escobillas y también tiene conectado un tacómetro generador pero en este caso D.C. para registrar la velocidad angular tanto de las escobillas como de la máquina generalizada.

Además de lo ya mencionado, también cuenta con una bornera donde se hacen la mayor parte de las conexiones para que el conjunto funcione y un panel de control y operaciones donde se hacen las conexiones restantes y las mediciones que se deseen hacer en los diversos experimentos posibles con este conjunto.

Ahora que ya se tiene una idea general, si es posible hablar de la verificación del estado de sus componentes o equipos y de los trabajos realizados para poner a punto este conjunto, como se mencionan a continuación en una serie de puntos debidamente explicados:

- **Habilitación y puesta en funcionamiento del tablero eléctrico:** Aunque no pertenece al conjunto, fue necesario hacerle una reparación al interruptor de dicho tablero y habilitarlo para hacer posible la alimentación A.C. del conjunto.

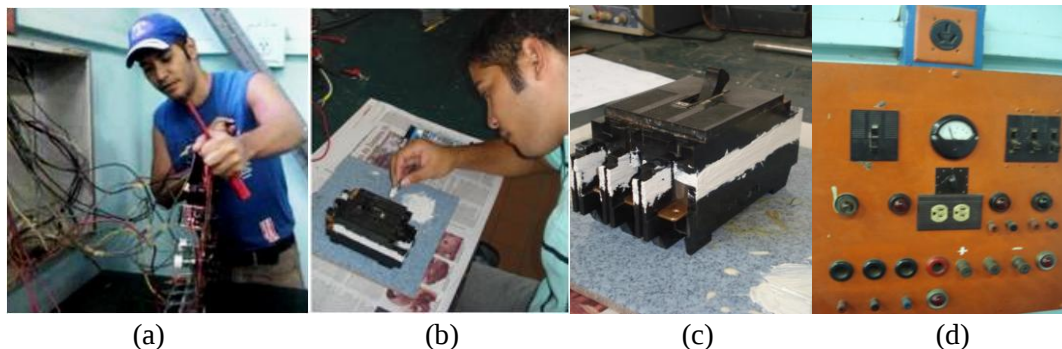


Figura 21. Habilitación del tablero eléctrico.

- Limpieza de la máquina generalizada y todo el conjunto.

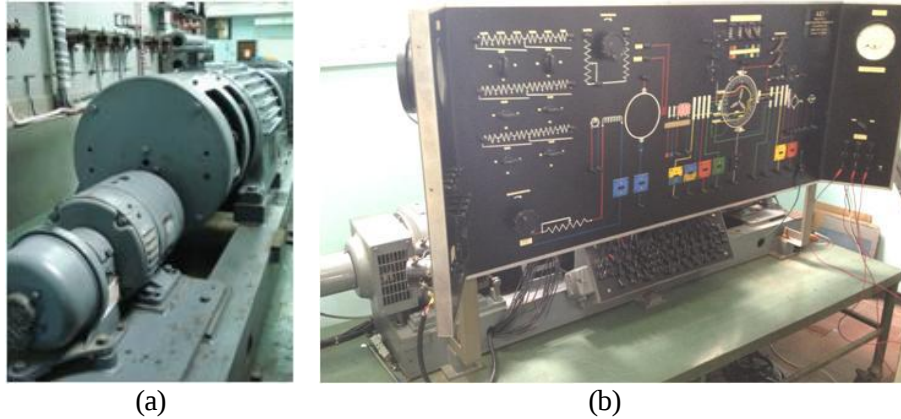


Figura 22. Limpieza del conjunto de la máquina generalizada.

- Verificación del estado interno del conjunto de la máquina generalizada: Se revisaron las conexiones internas a las que se le podía tener acceso como los acoples entre las distintas máquinas y los cables que llegan tanto a la bornera como al panel de control y operaciones; también se verificó el estado de las escobillas, las cuales, se extrajeron y se notó que no tenían desgaste significativo. Asimismo se observó cuidadosamente las delgas del colector descartando fisuras en alguna de las láminas o que se encontrara alguna levantada.

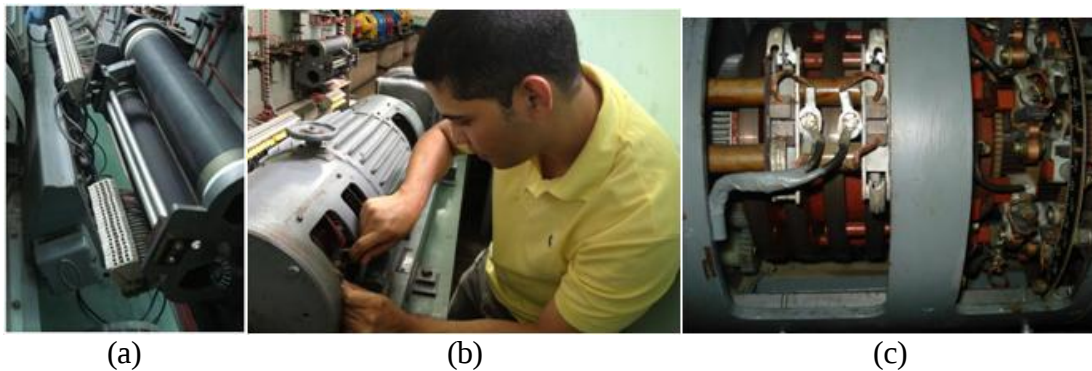


Figura 23. Verificación del estado interno del conjunto de la máquina generalizada.

- Re engrase de los rodamientos del conjunto de la máquina generalizada: Para ello fue necesario extraer algunas piezas para acceder directamente al rodamiento y aplicar la grasa necesaria dado que no todas las máquinas implicadas contaban con graseras. En las partes que si tenían graseras, se utilizó una engrasadora con la presión suficiente para la tarea.

- Limpieza y ajuste de todas las escobillas de las diferentes máquinas que comprende el conjunto de la máquina generalizada para evitar que el polvo o carboncillo produjeran alguna chispa o cortocircuito entre las delgas del colector.

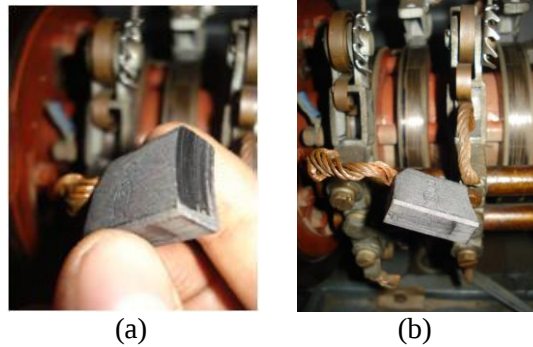


Figura 24. Limpieza y ajuste de todas las escobillas.

- Acondicionamiento de cables de conexión: Se colocaron terminales amarillos de punta a los cables de conexión de la carga, de la bornera y del panel de control y operaciones para que quedasen bien asegurados a la regleta que dispone dicho panel. También se habilitó un cable con el alcance y capacidad suficiente para soportar hasta 220V D.C. que contara en un extremo con un terminal tipo horquilla adecuado para conectarlo a la alimentación e interruptores de protección por medio de los cuales se suministra la energía y al otro extremo con terminales de punta para la conexión al panel de control y operaciones.

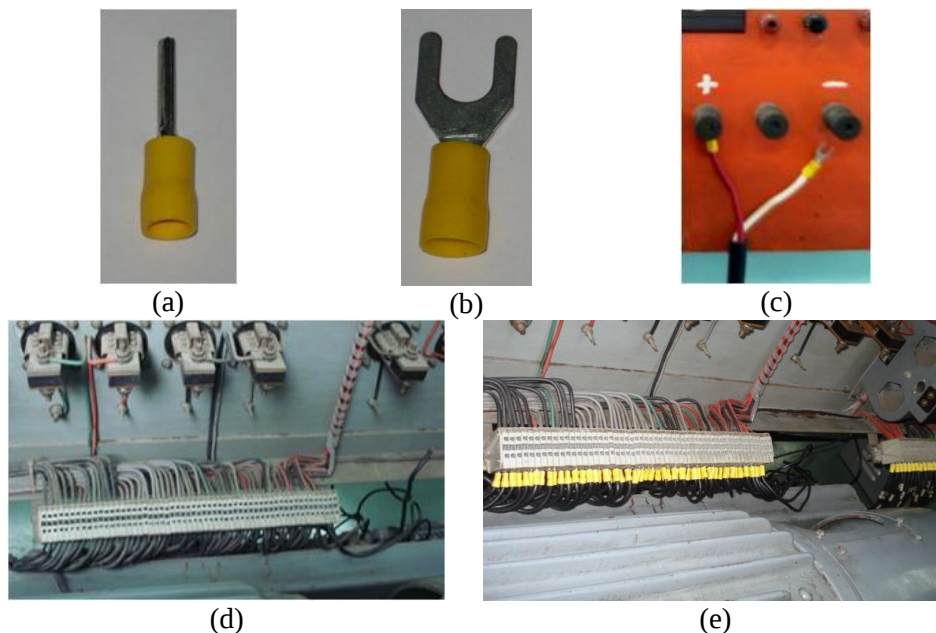


Figura 25. Acondicionamiento de cables con terminales.

- Verificación y reconexión de cables en la bornera: Ya instalados los terminales apropiados para la conexión se procedió a la rectificación y reconexión de cada uno según lo indicado en el manual del conjunto de forma ordenada.



Figura 26. Verificación y reconexión de cables en la bornera.

- Reparación de pieza de apoyo para el tornillo de ajuste del reóstato dispuesto en el panel de control y operaciones: Dicha pieza se encontraba rota y la misma fue reparada y reforzada con un pegamento de 2 toneladas de marca Epoxy para darle una mayor dureza y poder habilitar este reóstato.

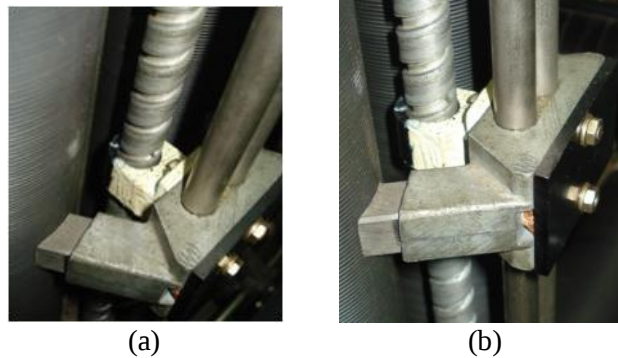


Figura 27. Reparación de pieza para tornillo de ajuste de un reóstato.

- Conexión y puesta en funcionamiento del reóstato: Con la pieza de apoyo para el tornillo de ajuste reparada, se procedió a la reconexión de este reóstato.

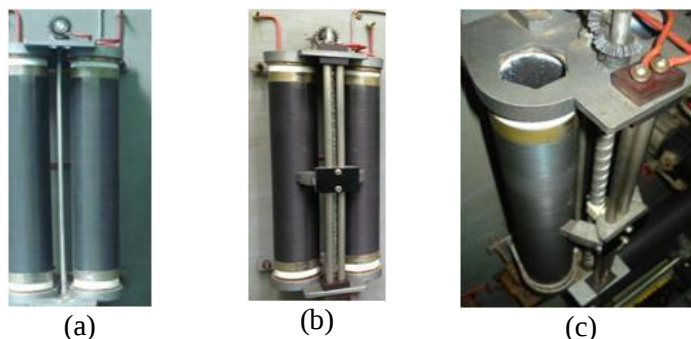


Figura 28. Conexión y puesta en funcionamiento del reóstato.

- Reajuste de acople y dispositivo de medición de par.



Figura 29. Reajuste del acople y dispositivo de medición de par.

- Reconexión del tacómetro generador A.C.: Este tacómetro se encontraba desconectado debido a que faltaba una pieza de acople la cual se fabricó para habilitarlo.

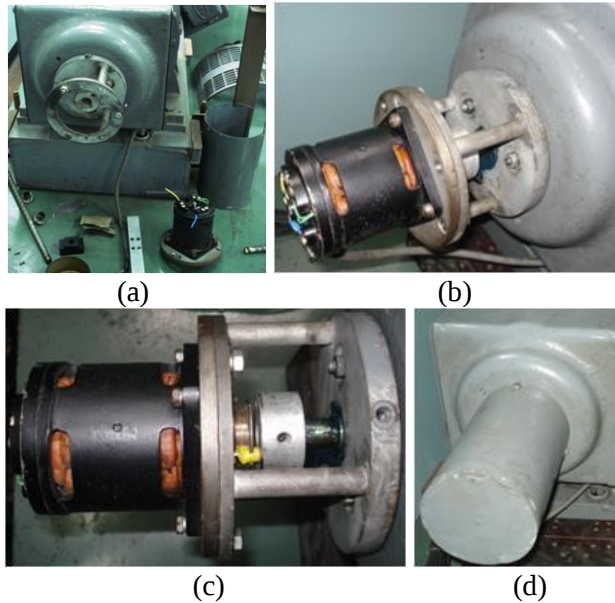


Figura 30. Reconexión del tacómetro generador A.C.

- Reajuste de un Interruptor en el Tablero de Control y Operaciones: Fue necesario extraer uno de los interruptores dispuesto para variar la resistencia o carga en el tablero de control y operaciones, debido a que al cambiar de posición patinaba y no se aseguraba que hiciera la conmutación. El mismo fue reparado y reinstalado.



Figura 31. Reajuste de un interruptor en el tablero de control y operaciones.

- Conexión y medición de la carga: Se verificó la continuidad de los cables de la caja de resistencia y se conectaron a la bornera del tablero de control y operaciones. Además con la ayuda de un multímetro digital se midieron las distintas cargas R1, R2 y R3 en todas las posibles combinaciones producidas por las diferentes conmutaciones de los interruptores A y B tal y como se muestra en la siguiente foto y arrojando los valores que se expresan en la tabla 3, donde se tomó el valor exacto más próximo como el valor nominal:

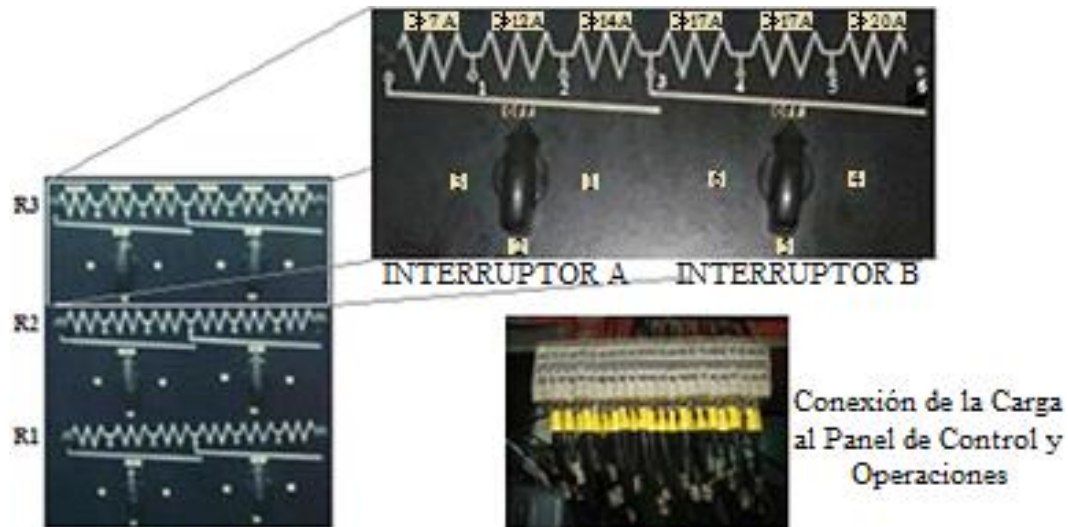


Figura 32. Conexión de la carga

Tabla 3. Medición de la carga.

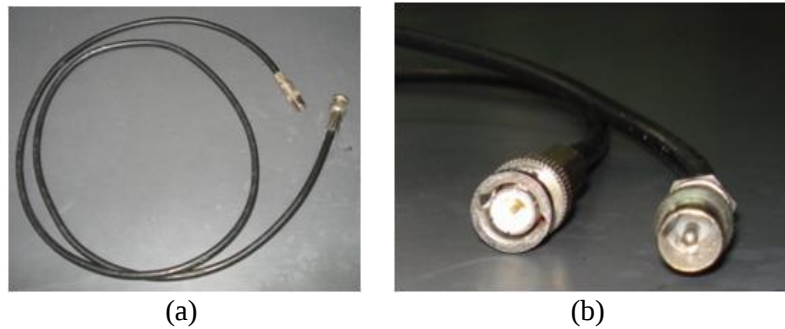
		Interruptor B				Lecturas			Nominal (Ω)	Corriente Max. Eficaz
		Off	4	5	6	R1(Ω)	R2(Ω)	R3(Ω)		
Interruptor A	Off	•				39,6 $\pm$ 0,1	39,5 $\pm$ 0,1	39,7 $\pm$ 0,1	40	7
	1	•				20,3 $\pm$ 0,1	20 $\pm$ 0,1	20,1 $\pm$ 0,1	20	12
	2	•				14,2 $\pm$ 0,1	14 $\pm$ 0,1	14,1 $\pm$ 0,1	14	14
	3	•				9,8 $\pm$ 0,1	10,2 $\pm$ 0,1	9,6 $\pm$ 0,1	10	17
	Off		•			36,2 $\pm$ 0,1	36,2 $\pm$ 0,1	36,3 $\pm$ 0,1	36	7
	1		•			17,3 $\pm$ 0,1	16,6 $\pm$ 0,1	16,7 $\pm$ 0,1	17	12
	2		•			11,1 $\pm$ 0,1	10,6 $\pm$ 0,1	10,7 $\pm$ 0,1	11	14
	3		•			6,6 $\pm$ 0,1	7,4 $\pm$ 0,1	6,2 $\pm$ 0,1	7	17
	Off			•		33,1 $\pm$ 0,1	32,7 $\pm$ 0,1	32,8 $\pm$ 0,1	33	7
	1			•		13,8 $\pm$ 0,1	13,2 $\pm$ 0,1	13,3 $\pm$ 0,1	13	12
	2			•		7,7 $\pm$ 0,1	7,1 $\pm$ 0,1	8,1 $\pm$ 0,1	8	14
	3			•		3,1 $\pm$ 0,1	2,9 $\pm$ 0,1	2,8 $\pm$ 0,1	3	20
	Off				•	30,7 $\pm$ 0,1	30,3 $\pm$ 0,1	30,3 $\pm$ 0,1	30	7
	1				•	11,3 $\pm$ 0,1	10,8 $\pm$ 0,1	10,8 $\pm$ 0,1	11	12
	2				•	5,2 $\pm$ 0,1	4,8 $\pm$ 0,1	4,8 $\pm$ 0,1	5	14
	3				•	0,7 $\pm$ 0,1	0,5 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0	20

- Elaboración de barra para la calibración del torquímetro: Se trabajó una barra de metal para que tuviera en uno de sus lados un orificio para sostener una pesa y del otro lado una cuña que se ajustase a uno de los tornillos del acople para que la barra no deslizase a la hora de hacer la calibración del torquímetro.



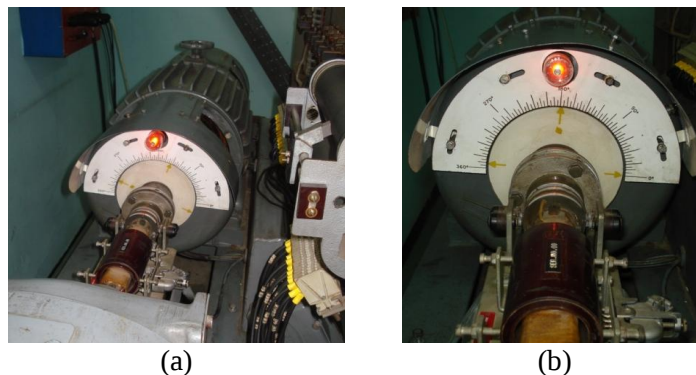
(a) (b) (c)
Figura 33. Elaboración de barra para la calibración del torquímetro

- Adaptación de cable para la adquisición de datos desde el torquímetro hasta el osciloscopio.



(a) (b)
Figura 34. Cable para la adquisición de datos.

- Se realizó la prueba de funcionamiento del estroboscopio.



(a) (b)
Figura 35. Prueba del estroboscopio.

- Diseño de fuente bifásica: Para ello se utilizaron dos transformadores monofásicos de 3 y 10 KVA respectivamente de los existentes en el laboratorio en conexión Scott, para incluir un nuevo arreglo dentro de las pruebas posibles de realizar con la máquina generalizada.

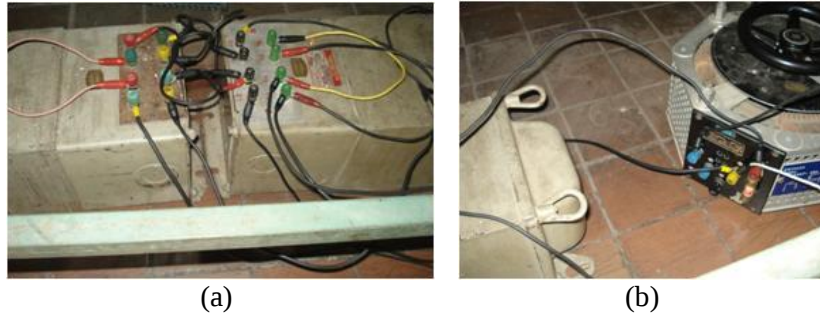


Figura 36. Fuente bifásica.

- Pruebas de accionamiento del conjunto de la máquina generalizada bajo distintos modos de operación.

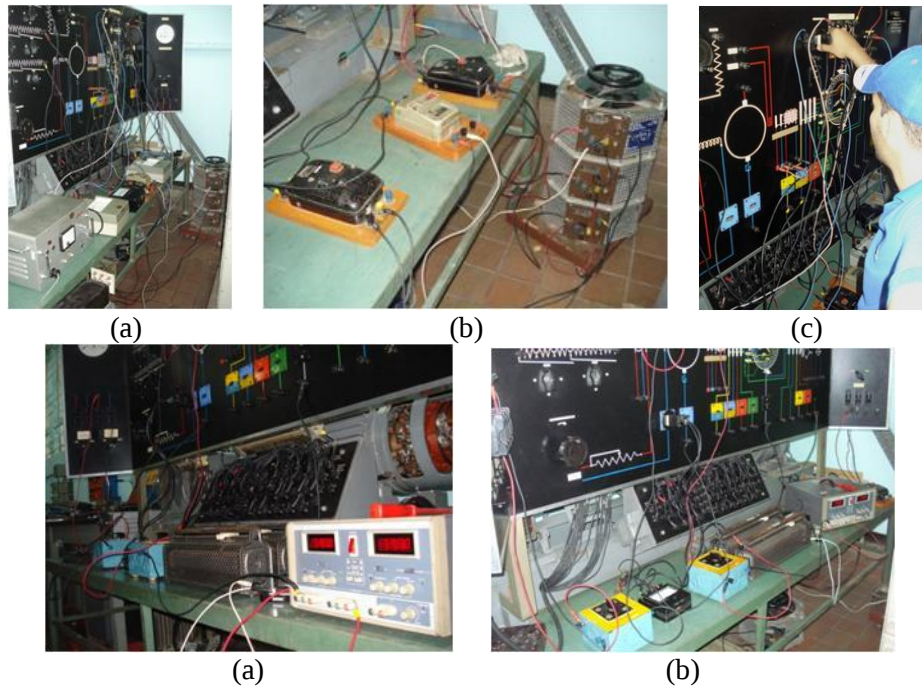


Figura 37. Pruebas de accionamiento

CAPITULO V

5. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL CONJUNTO DE LA MÁQUINA GENERALIZADA.

5.1. Fuente de Alimentación y Panel de Control y Operaciones

Para trabajar con el conjunto se requieren dos fuentes, una D.C. y otra A.C. trifásica, con capacidad de hasta 220 V para las distintas configuraciones posibles con la máquina generalizada y también en algunos casos es deseable, más no esencial, que pueda fluir un máximo de 45A de corriente directa, en un corto tiempo.

La fuente D.C. puede ser controlada por resistores en serie debidamente conmutados como los que provee el panel de control y operaciones; también pueden emplearse para iniciar el conjunto tanto por la máquina de carga como por la máquina generalizada. Por otro lado, un autotransformador variable trifásico (por ej. un Variac de 4,5 kVA o un valor cercano) es lo adecuado para el suministro de corriente alterna y es usualmente la mejor manera de iniciarlo.

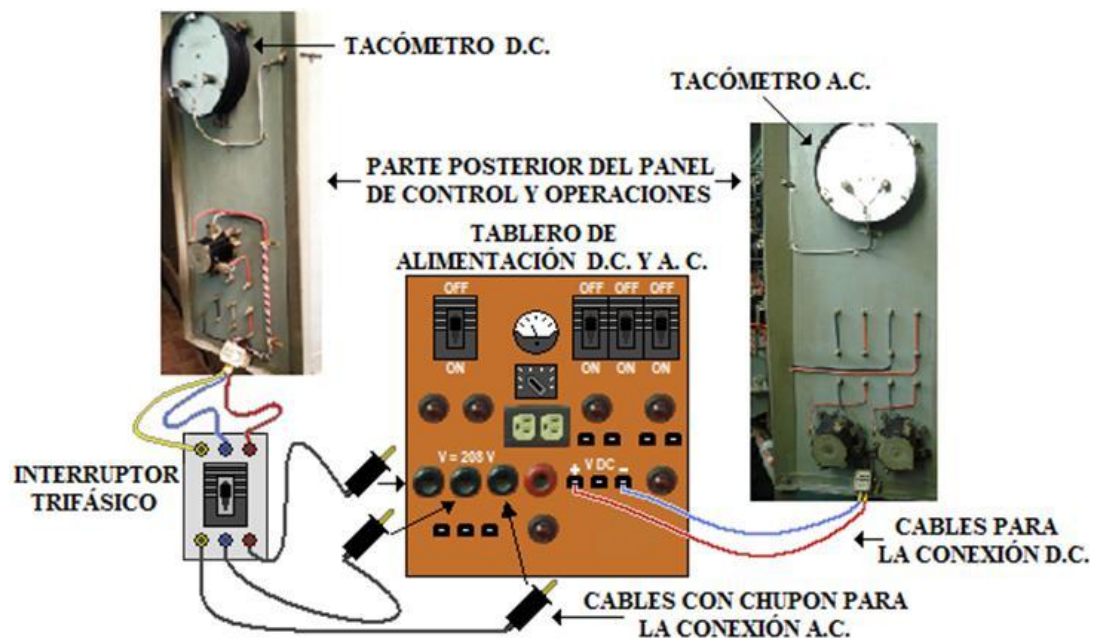
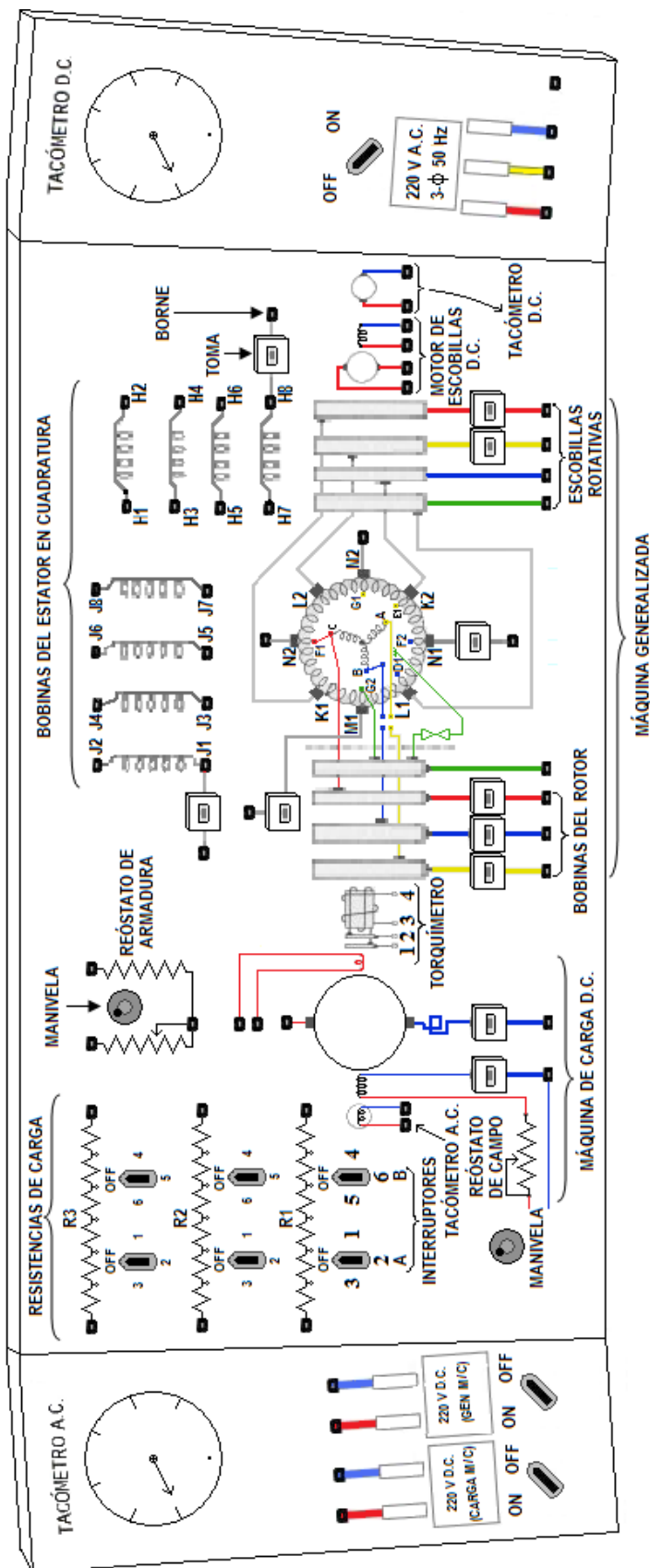


Figura 38. Alimentación y vista posterior del panel de control y operaciones

En la figura 38, se puede apreciar como suministrar la energía desde un tablero de alimentación eléctrica como los existentes en el laboratorio de la escuela de ingeniería eléctrica “Melchor Centeno V.” hasta el panel de control y operaciones.

Por otra parte, en la figura 39 se muestra un bosquejo del panel de control y operaciones, donde se indican los componentes del conjunto y los puntos de acceso tanto para las conexiones como para las mediciones.

Si se observan las figuras 6 y 7 mostradas en el capítulo III, en el apartado 3.1, se verá detalladamente que existen tres posibles modos de conexión de las bobinas del rotor de la máquina generalizada, por lo que hay que destacar que su conexión depende de la posición de un disco dispuesto en el rotor que cuenta con tres posiciones distintas para ajustarse a la configuración que se requiera, sin embargo, a fin de no sobrecargar la figura del panel de control y operaciones, no se dibujaron algunas de las líneas de conexión de estos devanados como se puede apreciar directamente del diagrama mímico en el panel, pero si se deja constancia de los puntos de conexión de los mismos. Por otra parte estos detalles se pueden apreciar claramente en los anexos del manual de la máquina generalizada así como en los del presente trabajo.



A fin de no sobrecargar el bosquejo del panel de control y operaciones, no se dibujaron algunas de las líneas de conexión de los bobinados del rotor de la máquina generalizada, sin embargo se deja constancia de los puntos de conexión de los mismos. Se recuerda que estas conexiones están sujetas a la posición del rotor que se designe.

Figura 39. Diagrama del panel de control y operaciones

5.2. Claves Para Operar el Conjunto de la Máquina Generalizada

Cuando se inicia la maquina generalizada desde un suministro D.C., es conveniente incrementar el voltaje gradualmente desde un valor bajo, usando para ello el conjunto de resistores conmutados (R1, R2 o R3) proporcionados en el panel de control y operaciones o un reóstato externo. Igualmente, para iniciar desde un suministro de corriente alterna, es recomendable usar un autotransformador trifásico continuamente variable (variac). Además, a fin de reducir el ruido eléctrico y la fricción, hay que desconectar todas las escobillas que, ya sean del colector, rotativas, o de cualquier maquina que compone el conjunto y que no intervienen en la configuración que se desee experimentar, levantándolas fuera de las agarraderas y posicionando los resortes de presión hacia los lados dado que no estarán en uso.

Antes de operar el conjunto en cualquiera de las configuraciones posibles, es necesario verificar el sentido de giro correcto del mismo el cual es en sentido anti-horario viendo el conjunto desde la máquina de carga. Igualmente, en el caso que se requiera trabajar con la máquina de carga D.C. y la máquina generalizada al mismo tiempo, (como por ejemplo en la operación como motor sincrónico trifásico), se debe verificar que ambas tengan el mismo sentido de giro impuesto por la máquina generalizada como ya se definió antes. Para lograr esto, se energiza solo la máquina de carga D.C. y se verifica que gire en el mismo sentido ya probado de la máquina generalizada indicado anteriormente. De no ser así, cambiar la polaridad con que se está alimentando a dicha máquina de carga en el panel de control y operaciones para obtener el sentido correcto.

Actualmente, el reóstato de campo de la máquina de carga D.C. está conectado, pero su valor de resistencia no se puede variar por medio de la manivela dispuesta en el panel de control y operaciones dado que falta una pieza de ajuste para habilitarlo, sin embargo, es posible ajustarlo moviendo el contacto del reóstato manualmente con un material aislante para no tocarlo directamente, pero no se recomienda hacer esto con la máquina encendida debido a los peligros asociados a la corriente de campo (I_f) que por allí circula. Para verificar la I_f se puede colocar un amperímetro D.C. en la toma dispuesta para esto por medio de las clavijas correspondientes.

En la mayoría de las configuraciones presentadas en este proyecto, aparece en su respectivo diagrama de conexiones, un arreglo serie / paralelo de reóstatos que al sacar el equivalente nos daría como resultado el mismo valor correspondiente a colocar uno solo de ellos, sin embargo, esto se hace así para la protección de los propios reóstatos al evitar el sobrecalentamiento del equipo al dividir la corriente que atravesaría a uno solo de ellos, por dos caminos sin alterar el diseño establecido para el funcionamiento de cada modo de operación.

Al momento de cambiar la posición en el disco del rotor, no se debe apretar muy fuerte los tornillos que ajustan dicha posición, debido a que se pudieran dañar las tuercas donde se sujetan y porque además se requerirá cambiar la mencionada posición entre los diversos experimentos que se pueden efectuar con el conjunto. Es por eso que se recomienda apretar estos tornillos solo hasta que queden ajustados.

Aunque los valores de resistencia e inductancias propias y mutuas de la máquina generalizada se indican en la tabla 2 referente al diseño y detalles del bobinado. Estos valores deben considerarse solo como aproximados ya que las resistencias varían con la temperatura y las inductancias con la saturación magnética. Por tanto, se deben medir los valores relevantes en cualquier experimento. El método del voltímetro-amperímetro y vatímetro, provee la forma más simple de medir las resistencias y las inductancias (propias y mutuas).

Se debe recordar que para hacer las mediciones de corriente en el conjunto, existen las tomas de acceso tanto al rotor y estator de la máquina generalizada como a al campo y armadura de la máquina de carga, y los cables de conexión para las mediciones de corrientes llamados C.T. por sus siglas en ingles (Current Tester), se conectan directamente al amperímetro adecuado para las medidas a realizar en los casos en A.C. ó a una resistencia Shunt adecuada para los valores de corriente D.C. que se vayan a medir en combinación con un milivoltímetro apropiado.

Por otra parte, las mediciones de los voltajes pueden hacerse directamente entre los puntos que se deseen dado que el panel de control y operaciones cuenta también con tomas apropiadas para la conexión de los voltímetros.

De las averías más comunes que pueden presentarse en las máquinas que componen el conjunto, y a las que se les debe tener especial atención se encuentran las chispas abundantes, un calentamiento en exceso ó par motor débil durante el funcionamiento de las cuales las causas posibles se enumeran a continuación para solventar estos inconvenientes en el caso de producirse:

- Escobillas desgastadas o mal acomodadas.
- Sucio o polvillo de las escobillas que hacen cortos circuito entre delgas.
- Láminas de mica salientes.
- Sentido de rotación invertidos.
- Falta de engrase en los rodamientos.
- Sobrecarga.

Ahora que se cuenta con la información pertinente para trabajar con el conjunto de la máquina generalizada, a continuación se muestran algunos modos típicos de operación con sus respectivos diagramas de conexión, sin embargo, es necesario aclarar que estos modos no agotan las posibilidades de la máquina.

5.3. Operación de la Máquina en Modo D.C.

5.3.1. Operación de la Máquina D.C.

En el capítulo IV, apartado 4.1.1 referente al principio de funcionamiento como máquina de corriente continua, se estableció que la máquina generalizada está diseñada para funcionar como varios tipos de máquinas D.C. sin embargo, aquí se estudia la denominada máquina D.C. “convencional” en la que aparte de conocer la forma de ejecutarla, es importante resaltar que también existen distintos modos de operación que dependen del tipo de excitación que se haga.

Primero se debe recordar que si el funcionamiento es como generador, lo que se hace es convertir energía mecánica en energía eléctrica, por lo tanto, para lograr tal fin con el conjunto en estudio, es necesario usar la máquina de carga D.C. como motor para impulsar a la máquina generalizada ya que está acoplada a la misma, y al haber movimiento en el rotor, se obtiene una f.e.m. en el inducido. Si por el contrario, el funcionamiento es como motor, lo que se hace es convertir energía eléctrica en energía mecánica, por lo que en este caso se trabaja directamente con la máquina generalizada y a esta, se le debe aplicar una corriente continua para obtener entonces un par mecánico.

Para las respectivas alimentaciones de las dos máquinas mencionadas, el panel de control y operaciones dispone de las clavijas necesarias para la conversión de energía en cualquier dirección, (motor o generador).

Por otra parte, también se debe recordar que existen diversas formas de excitación de una máquina D.C. como son:

- a) **Excitación independiente:** La corriente que circula por el devanado inductor viene de una fuente externa y es distinta a la de la propia máquina. (figura 40 (a)).
- b) **Autoexcitación:** La corriente de excitación proviene de la misma máquina y hay tres formas de obtenerla que son: excitación en derivación (shunt), excitación serie y excitación compuesta, (figura 40 (b), (c) y (d) respectivamente).

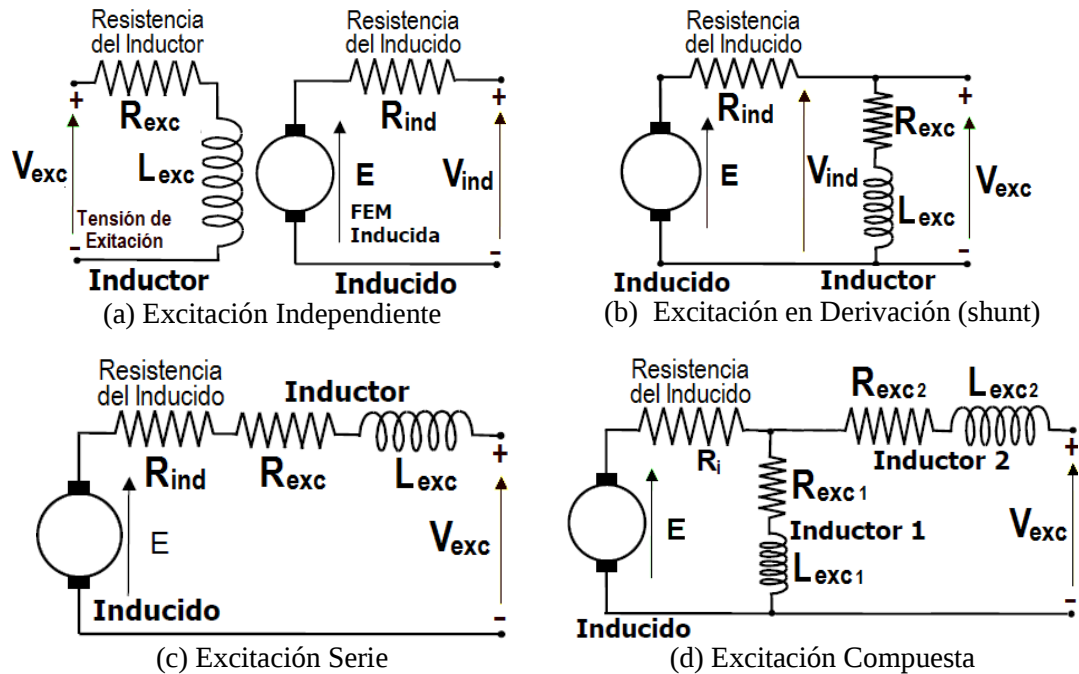


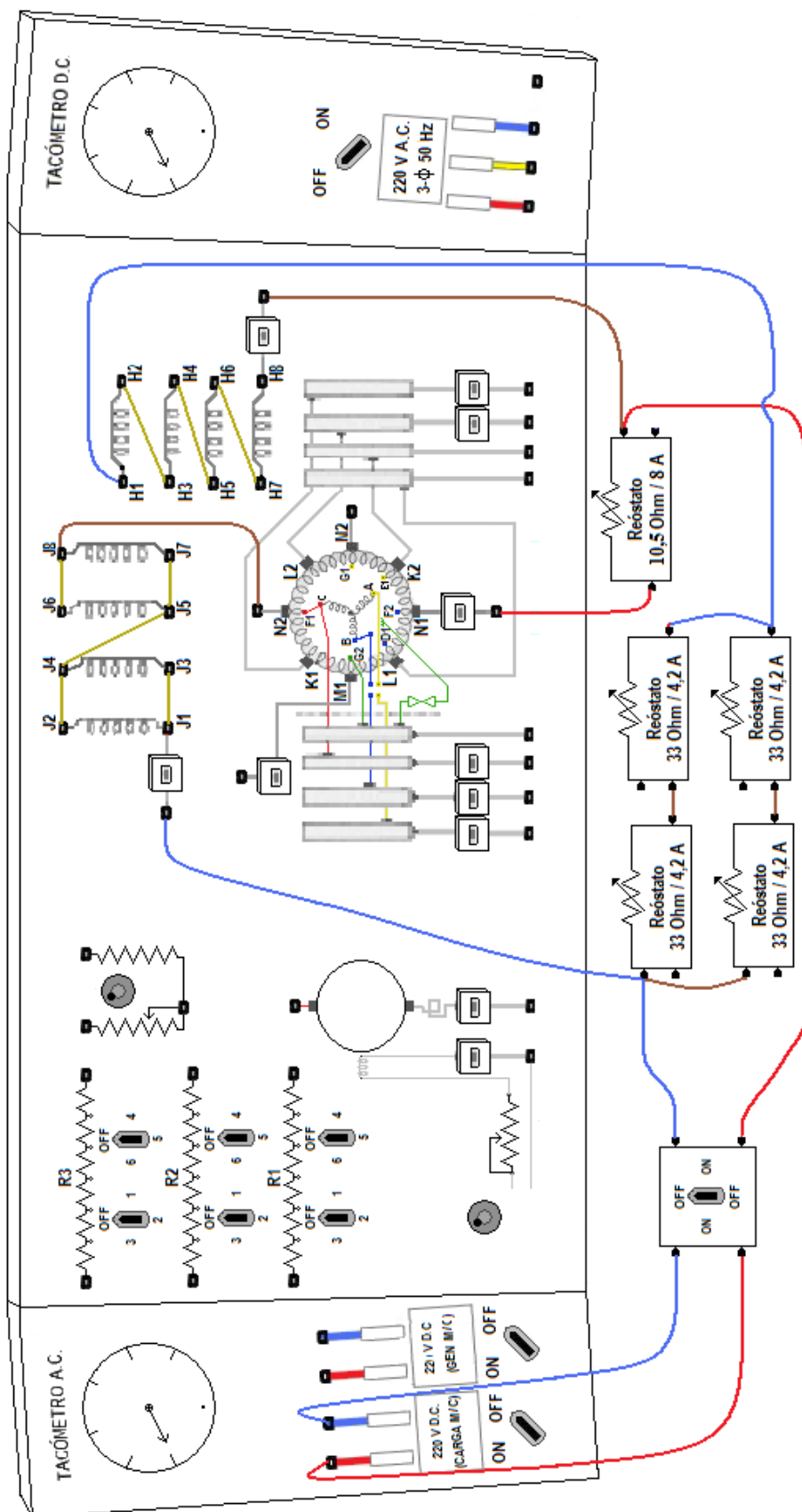
Figura 40. Formas de excitación de la maquina D.C.

En esta sección del presente proyecto solo se proponen como ejemplo las disposiciones de los funcionamientos con excitación en derivación (Shunt) y con excitación independiente, cuyas conexiones necesarias se muestran más adelante. Sin embargo cualquiera de los otros modos se pueden realizar siguiendo como ejemplo los esquemas mostrados en la figura 40 referente a las formas de excitación de la maquina D.C.

En el caso del motor con excitación en derivación (Shunt), es necesario añadir una resistencia en el rotor para aumentar el par de arranque y alimentar el estator con la misma tensión que el inducido como se puede apreciar en la figura 41, mientras que en el caso de un motor con excitación independiente, el estator y el inducido se alimentan con fuentes separadas o independientes tal y como se observa en la figura 42. En ambos casos, al realizar las pruebas de accionamiento bajo estas configuraciones, se demostró que el desempeño de la máquina generalizada fue óptimo.

Además de estas 2 configuraciones existen otros tipos de máquinas D.C. como ya se ha mencionado antes, pero debido a las consideraciones especiales para la conexión y características de las mismas, se estudiarán como puntos aparte más adelante.

Operación como Máquina D.C. (Con Excitación en Derivación).



Colocar el disco del rotor en la posición 3

Figura 41. Diagrama de operación como motor D.C. con excitación Shunt.

Operación como Máquina D.C. (Con Excitación Independiente).

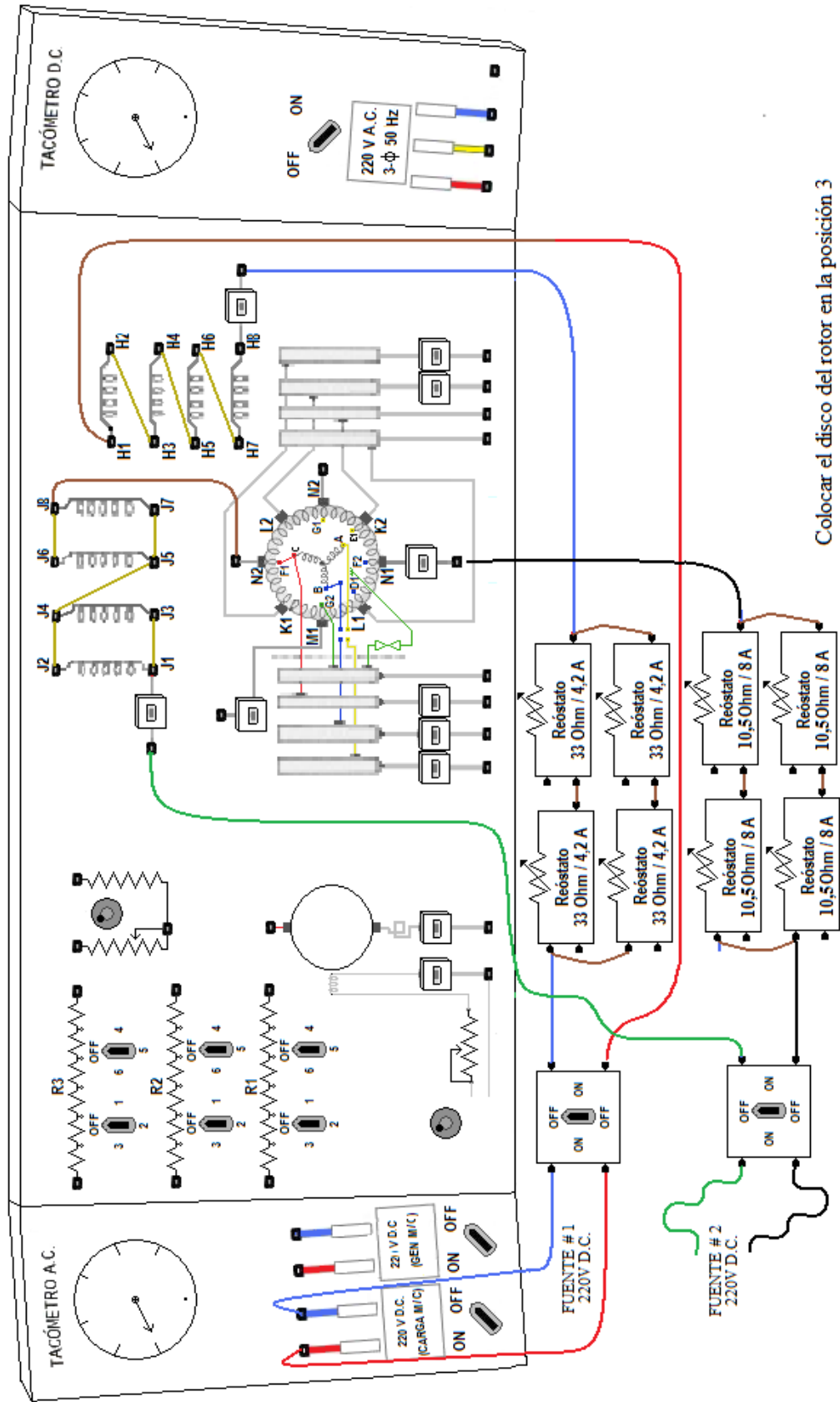


Figura 42. Diagrama de operación como motor D.C. con excitación independiente.

5.3.2. Operación como Amplidina

La amplidina, en pocas palabras es un amplificador electromecánico con el cual es posible conseguir altas potencias. Siendo más específicos, es una máquina de campo transversal con varios arrollados en los polos y escobillas transversales cortocircuitadas que se utiliza generalmente como amplificador de potencia y también con funciones de regulador. Como amplificador dinámico se pudieran conseguir ganancias de potencia del orden de 10000. También se utilizan en sistemas de ciclo cerrado como de regulación automática de tensión de alternadores de potencia entre otros.

El concepto es como si se tuviesen dos máquinas D.C. conectadas en cascada, tal como se muestra en la figura 43(a), donde la tensión de armadura de una primera máquina (máq. 1), se hace pasar por la bobina de campo (R_{f2}) de la siguiente máquina (máq. 2), para obtener así una tensión y por ende una potencia aún más grande a la salida de la segunda máquina D.C. que, como se notará, está siendo controlada por tensiones bajas de la bobina de campo (R_{f1}) de la primera máquina D.C. Sin embargo, en realidad la amplidina es una sola máquina con la que se consigue el mismo efecto, al colocar un bobinado de excitación en serie que controla la realimentación provocada por la reacción de inducido y cortocircuitando las escobillas dispuestas a 90° como se muestra en la figura 43(b). La realimentación será negativa o positiva según el número de vueltas de este bobinado.

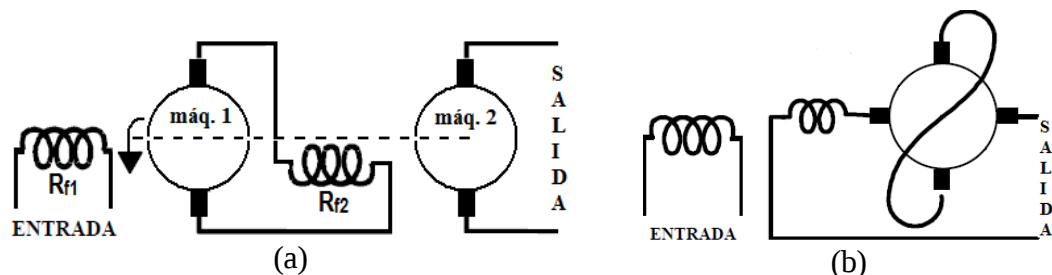


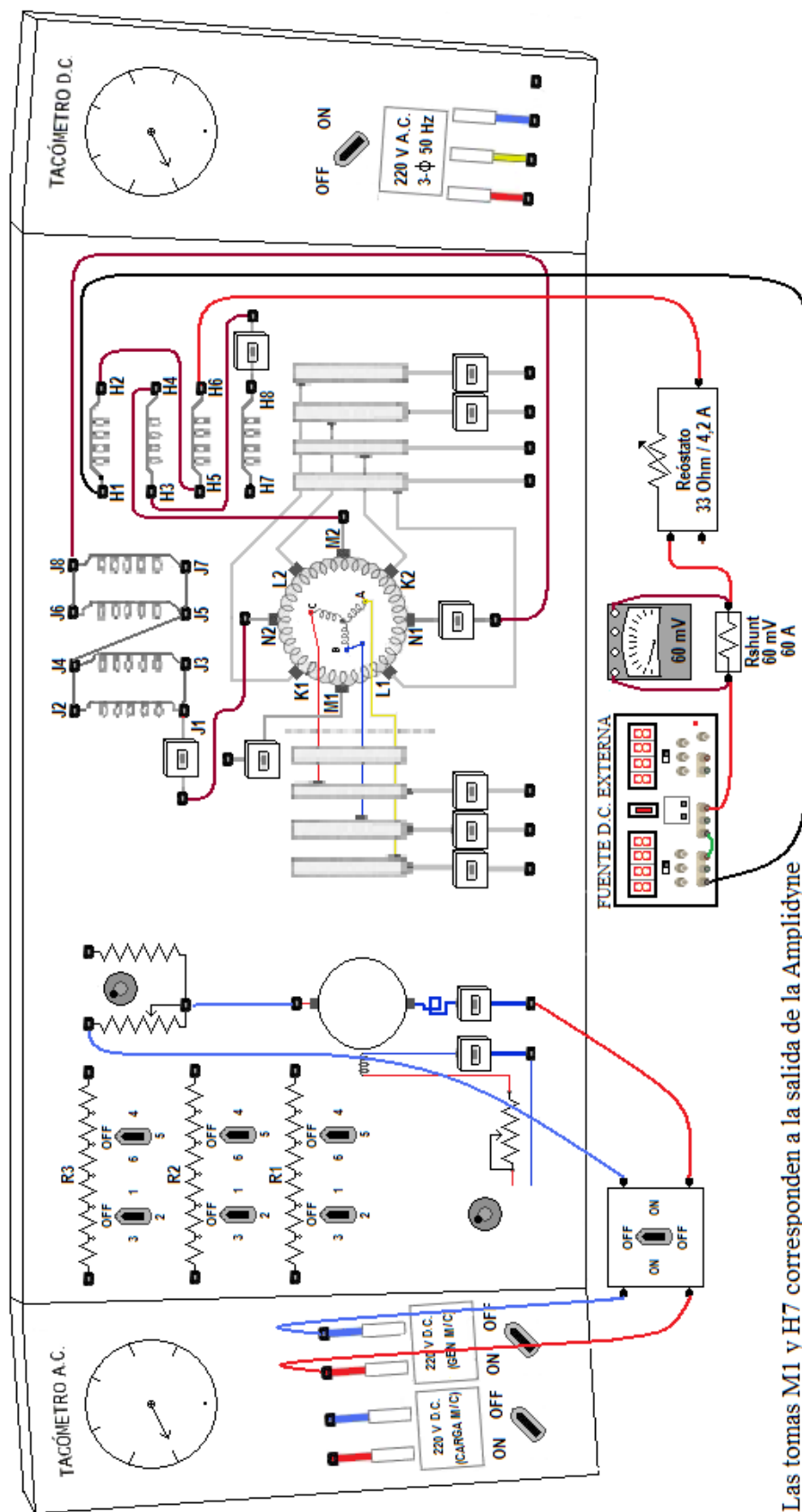
Figura 43. La amplidina

En el caso de la maquina generalizada, la bobina de campo R_{f1} (simulando la primera máquina DC) puede ser el devanado J y la R_{f2} el devanado H. Por otro lado la salida de tensión de armadura de la primera máquina DC se conecta entre las escobillas N1 y N2, siendo M1 y M2 la salida de la segunda maquina D.C. (ver figura 44).

Para realizar esta configuración es importante tener en cuenta que se debe poner en marcha la máquina de carga D.C. para lograr que la máquina generalizada funcione como una amplidina.

La entrada se alimenta en DC con una fuente externa, que puede ser una fuente D.C. regulada BK PRECISION TRIPLE OUTPUT DC POWER SUPPLY 1660A dado que está disponible en el laboratorio a la que se le debe colocar un reóstato en serie con el circuito para poder hacer la alimentación; también se coloca una R_{shunt} y un milivoltímetro para medir la corriente en la entrada y asegurarse de no sobrepasar los 32A permitidos para esta configuración tal como se muestra en la figura 44.

Además, a la hora de des energizar este montaje, se debe apagar primero la fuente externa y luego la del conjunto.



Las tomas M1 y H7 corresponden a la salida de la Amplidyne

Colocar el disco del rotor en la posición 3

Figura 44. Diagrama de operación como amplidyna

5.3.3. Operación como Metadina.

Al igual que la amplidina, la metadina es un amplificador electromecánico de dos etapas, pero sin contar con el bobinado de excitación en serie que principalmente funciona como un convertidor de energía eléctrica a tensión constante en energía eléctrica a corriente constante y tiene las características de un amplificador de realimentación negativa de corriente.

Dada la similitud, si se utiliza la explicación hecha anteriormente para la amplidina, se sabe que de una pequeña potencia que alimenta a los arrollamientos de excitación de una máquina D.C., se puede controlar una potencia de salida relativamente grande de un devanado de otra máquina D.C. La disposición es, en efecto, dos máquinas DC sencillas superpuestas en un marco, donde la salida de la primera proporciona la potencia de excitación para la segunda, destacando que aunque se superpongan las corrientes en el rotor, estas son independientes en sus efectos y la reacción de una sobre la otra es insignificante.

Asimismo, la construcción real de la metadina también se efectúa sobre una sola máquina cortocircuitando las escobillas de salida y colocando un nuevo par de escobillas cuyo eje está a 90° del anterior como se aprecia en la figura 45.

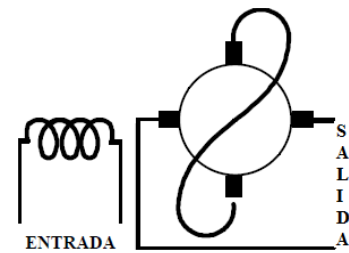


Figura 45. La metadina

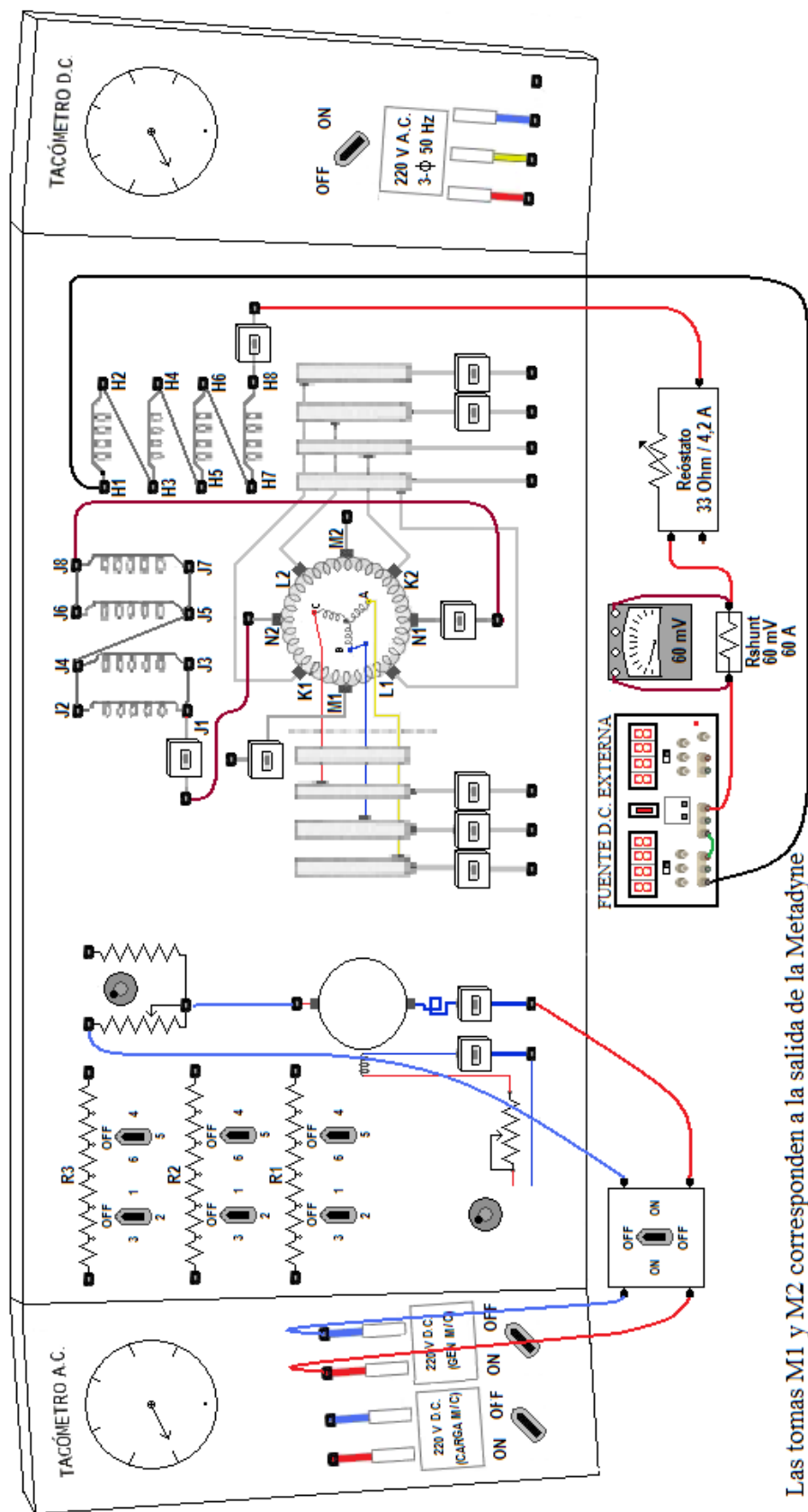
Por tanto y en tal disposición, se alimenta con una pequeña potencia de excitación a un devanado del estator colocado en (y por lo tanto definiéndolo en este modo) el eje directo, y produce un flujo pequeño en dicho eje que da como resultado una tensión pequeña entre las escobillas en el eje de cuadratura que están en cortocircuito, ya sea directamente o a través de otro devanado también en el eje de cuadratura en el estator, que sólo aumenta la fmm por unidad de corriente en dicho eje.

Como resultado de esta corriente de cortocircuito, se producirá entonces una gran corriente y por lo tanto un gran flujo en el eje de las escobillas (eje en ángulo recto con el pequeño flujo original), el cual conduce a una gran tensión entre las escobillas en el eje directo y la salida del dispositivo que se toma de estas escobillas.

Por ley de Lenz, la corriente de salida está en una dirección tal que tienden a destruir su causa originaria, en otras palabras, la corriente de salida produce una fmm que tiende a anular la fmm de control original, que es en el mismo eje. El resultado de esta realimentación negativa es un equilibrio de fmm(s) que lleva a una característica de salida prácticamente de corriente constante, independiente de la resistencia de la carga. Sólo se requiere una diferencia muy pequeña de las dos fmm en los ejes directos para producir un gran flujo en el eje en cuadratura.

Además, la metadina se comporta como una fuente de corriente, donde la corriente de salida es aproximadamente proporcional a la corriente de control.

Para configurar la máquina generalizada como una metadina se deben cumplir las conexiones mostradas en figura 46 del panel de control, siguiendo los mismos pasos propuestos para la amplidina salvo los niveles de corriente que son distintos a los que se establecen para esta configuración, y a la hora de des energizar este montaje, se debe apagar primero la fuente externa y luego la del conjunto.



Las tomas M1 y M2 corresponden a la salida de la Metadyne

Colocar el disco del rotor en la posición 3

Figura 46. Diagrama de operación como metadyna

5.3.4. Operación como Transformador D.C.

El sentido de esta configuración es proporcionar una tensión continua a la salida del circuito, resultante de un proceso de transformación de la tensión D.C. suministrada.

El transformador rotativo de corriente continua básicamente se conecta como se muestra en la figura 47. Bajo esta configuración la relación de transformación de tensión, depende de la velocidad a la que es impulsada y al valor de la resistencia de carga que se le conecte.

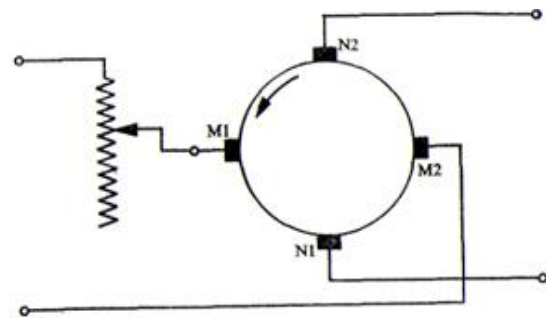


Figura 47. Transformador D.C.

En este sentido, se debe hacer girar la máquina de carga D.C. para arrastrar la máquina generalizada y a través de un interruptor hacer la configuración propuesta en el manual. Colocar voltímetros en la entrada y salida para registrar las tensiones respectivas y obtener la relación de transformación correspondiente. Verificar la corriente que circula por los reóstatos de regulación de la tensión de entrada por medio de un amperímetro.

En el diagrama de la figura 48, se observa una línea punteada desde el punto N2 al bobinado denominado devanado de compensación, esto es así para denotar que la conexión de estas bobinas es alternativa.

5.3.5. Operación como Máquina de Inducción D.C.

El motor de inducción D.C. tiene cierto interés teórico. Lo que sucede básicamente es que un flujo magnético es creado por el paso de corriente directa entre las escobillas del colector que se encuentran diametralmente opuestas como se muestra en la figura 49.

Entonces, debido a la conducción de las escobillas externas, el campo magnético es obligado a girar, logrando las condiciones para la operación de la máquina bajo este modo. Por otra parte, se requiere una corriente aproximada de 20A para este funcionamiento y el motor de las escobillas rotativas puede ser accionado alrededor de 40 rev/min.

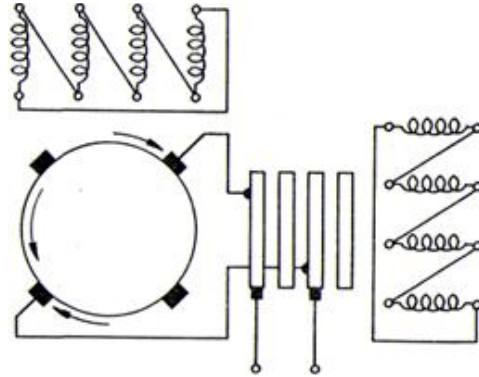


Figura 49. Máquina de Inducción D.C.

Además, el devanado de campo del motor de accionamiento de escobillas giratorias se puede alimentar a su tensión nominal D.C. y el suministro al inducido, con un reóstato para elevar gradualmente el voltaje desde cero hasta alcanzar la velocidad deseada.

Entonces, para este montaje, los dos devanados del estator se cortocircuitan por separado y es necesario hacer girar la máquina de carga D.C. como motor, para vencer la inercia en el rotor cuando se conecta la máquina generalizada como de inducción D.C. pero es importante destacar que esto se hace a través de un interruptor (Int. 1) con el cual se deshabilitará la máquina de carga a la hora de hacer la alimentación D.C. como realmente se requiere y lo establece la figura 49. Dicha conexión debe hacerse también por medio de un interruptor (Int. 2) como se aprecia en el diagrama de la figura 50.

El procedimiento es simple, primero se hace funcionar la máquina de carga D.C. por medio del interruptor dispuesto para esto (Int. 1), verificando que el sentido de giro sea antihorario. Luego se pone en marcha el motor de escobillas rotativas y se comprueba que el sentido de giro sea opuesto al de la máquina de carga D.C. (Sentido horario si se ve el conjunto desde la máquina de carga D.C.). Por último se debe operar el interruptor (Int. 1), para apagar la máquina de carga y casi al mismo tiempo (pero después), operar el interruptor (Int. 2), para alimentar la máquina generalizada como lo establece el diagrama 50.

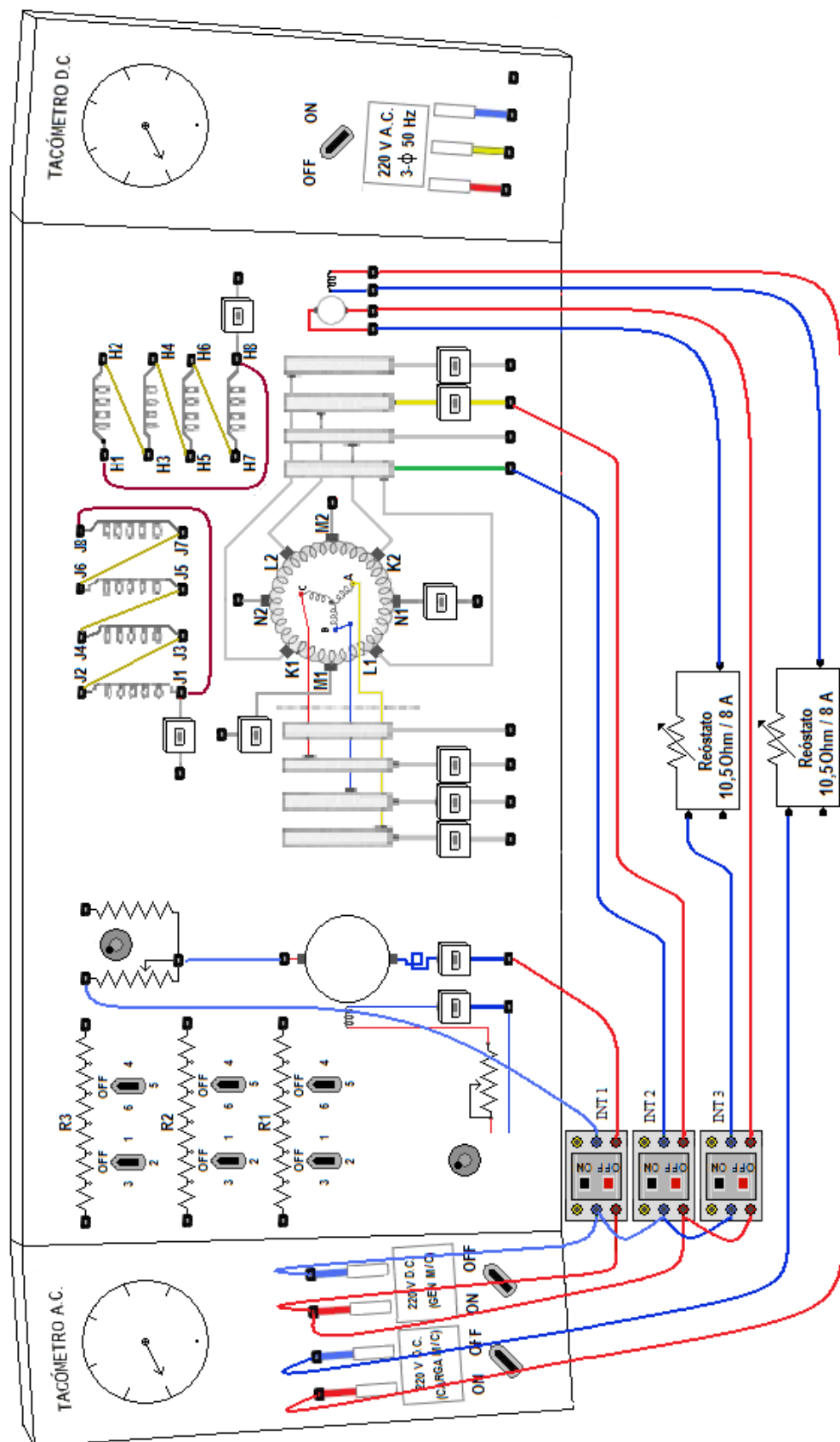


Figura 50. Diagrama de operación como máquina de inducción D.C.

5.4. Diagnóstico de la Máquina Generalizada Operando como Diversos Tipos de Máquina D.C.

5.4.1. Diagnóstico como Máquina D.C. “convencional”

Para verificar el funcionamiento bajo el modo de operación como máquina D.C. “convencional” como se le llamó en este proyecto para diferenciarla aún más de los otros modos de operación en D.C., se energizó el conjunto con 40 V en las dos configuraciones mostradas en las figuras 41 y 42 (con excitación Shunt y con excitación independiente respectivamente), obteniendo como resultado de estas pruebas de accionamiento un suave giro del rotor, y un buen desempeño de la máquina sin ruidos o perturbaciones. Solo es necesario recordar estar atentos de tener levantadas las escobillas que no estén en uso para no tener inconvenientes. Asimismo se debe elevar la tensión lentamente desde cero teniendo cuidado de no sobrepasar las corrientes y tensiones establecidas para los devanados del estator y del rotor de la máquina generalizada.

5.4.2. Diagnóstico como Amplidina y como Metadina.

En los casos de operación tanto como Amplidina como Metadina, cuyas configuraciones y funciones son en parte similares, se puede decir que el comportamiento del conjunto también fue muy bueno, y para verificar el desempeño en estos modos, y ofrecer una comparación entre ellas se colocó la máquina de carga DC trabajando arbitrariamente a 1500 rpm para impulsar a la máquina generalizada y se hicieron las conexiones tal como se indican en los diagramas de las figuras 44 y 46 con la fuente externa en 45 V que alimentaba a un reóstato de 33 Ω con 2A en ambos casos, lo que provocaba efectivamente una amplificación que por la semejanza de las dos configuraciones se trabajó con los mismos valores para poder mostrarlos en la siguiente tabla comparativa:

Tabla 4. Comparación de pruebas de accionamiento entre Amplidina y Metadina

	Máquina de Carga D.C.	Fuente Externa	Tensión en Reóstato	Tensión en Rshunt	Tensión de Entrada	Tensión de Salida
Amplidina	1500 rpm	45 V	44,7 V	0,014 V	286 mV	25V
Metadina	1500 rpm	45 V	44,2 V	0,01 V	0,7 V	40 V

Hay que destacar que la combinación fuente externa – reóstato era necesaria para poder hacer la alimentación de estos arreglos manteniendo una carga a la entrada del circuito como seguridad de dicha fuente, dado que el conjunto también se encontraba alimentado y funcionando, por lo que el verdadero valor que se está amplificando son los expresados como tensión de entrada en la tabla anterior.

5.4.3. Diagnóstico como Transformador D.C.

Bajo este modo de operación no se logró conseguir la transformación de tensión como lo indican las conexiones establecidas en el manual de operaciones de la máquina generalizada, aunque se siguieron las instrucciones al pie de la letra como se puede apreciar en el diagrama de la figura 48, no obstante se trató de averiguar las causas, físicas o teóricas por las cuales no funcionó este montaje, pero la poca utilidad y la poca información sobre este tipo de máquina, constituyeron grandes limitantes para desarrollar eficazmente la prueba bajo este modo de operación y entender plenamente esta configuración, y por tal motivo se desconocen las razones por las cuales no se pudo hacer funcionar la máquina generalizada como transformador D.C.

5.4.4. Diagnóstico como Máquina de inducción D.C.

Se realizó el montaje indicado en el manual de operaciones de la máquina generalizada descrito en el diagrama de la figura 50, pero motivado a que no se cuenta con mucha información sobre este tipo de máquina que pudiera ayudar a entender plenamente esta configuración, no se pudo hacer funcionar la máquina generalizada como máquina de inducción D.C. correctamente, y debido a que las corrientes en este montaje eran muy elevadas no se pudo continuar con las pruebas ya que continuamente se disparaban las protecciones del banco de trabajo del centro de control de mando (C.C.M.) a cada intento de accionar la máquina, imposibilitando así su operación bajo este modo.

5.5. Operación de la Máquina en Modo A.C.

5.5.1. Operación como Máquina de Inducción con Alimentación Monofásica.

En el sector industrial, comercial y residencial, se utilizan una gran variedad de máquinas llamadas erróneamente máquinas de inducción monofásicas, comprendidas en el rango de potencia entre fracciones de kW y 2 kW aproximadamente para accionar electrodomésticos, bombas, extractores, compresores, cadenas de montaje, y transporte de materias primas entre otras. Pero aun cuando se les denomine máquinas monofásicas, este nombre se refiere a la fuente de alimentación, porque en su estructura interna deben poseer al menos dos fases donde se producen campos magnéticos pulsantes cuando se excitan con corriente alterna para que sea posible producir par eléctrico a cualquier deslizamiento.

Ahora bien, aunque existen diversas formas de máquinas de inducción monofásicas como por ejemplo **“Motor a Fase Partida”** y **“Motor con Condensador”** las cuales se explican brevemente más adelante, aquí se propone solo la configuración con condensador para su estudio, por las razones que se explican en el punto 5.6.1 referente al diagnóstico de la máquinas generalizada funcionando como máquina de inducción con alimentación monofásica. Sin embargo, es importante destacar que como el motor de inducción “monofásico” no tiene par en reposo, independientemente de las dos configuraciones planteadas, la idea es trabajarlo más o menos equivalente a un motor bifásico equipado con devanados primarios de 2 fases, en otras palabras, un devanado principal y un devanado de arranque o auxiliar como los que son posibles disponer en la máquina generalizada.

Si se tuviera una sola fase en el bobinado del estator para ser recorrida por una corriente alterna, se crearía un flujo también alterno pero de dirección constante, dado que está en fase con dicha corriente y por lo tanto, el rotor no giraría. Es por esto y en vista que un motor monofásico no puede ponerse en marcha por sí solo, que para generar un campo giratorio hace falta el segundo devanado denominado auxiliar o de arranque, que forme un ángulo de 90°.

Teniendo esto en cuenta, una de las fases se alimenta directamente de la fuente mientras que el otro, el devanado de arranque, se alimenta con una corriente hecha para diferir en fase de la primera mediante la conexión de una resistencia o de un condensador en serie antes de conectar el bobinado a la fuente, como lo indica el manual de operaciones de la máquina generalizada, y representado en la figura 51.

La resistencia y el devanado auxiliar normalmente no se mantendrán en el circuito durante el funcionamiento y en el caso que se requiera mantener el condensador en el circuito se suele utilizar generalmente una reducción del valor de la capacitancia para ejecutarla.

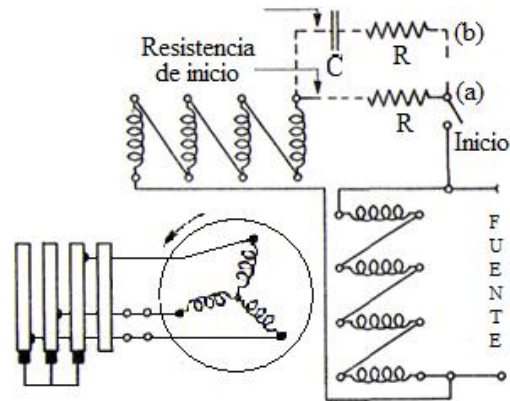


Figura 51. Máquina de Inducción “Monofásica”

En el caso de solo conectar la resistencia, se tendría la máquina que se conoce como **Motor a Fase Partida** y como ya se mencionó anteriormente, al estar ambos arrollamientos desfasados en el espacio, como se puede apreciar en la figura 52, se obliga a las corrientes que las recorren, a estar desfasadas también en el tiempo, por lo que la contribución de ambos flujos dará lugar a un campo magnético giratorio que permitirá el arranque. De hecho, este tipo de máquinas según algunos autores, suelen desarrollar pares de arranque comprendidos entre 0,75 y 2 veces el par a plena carga.

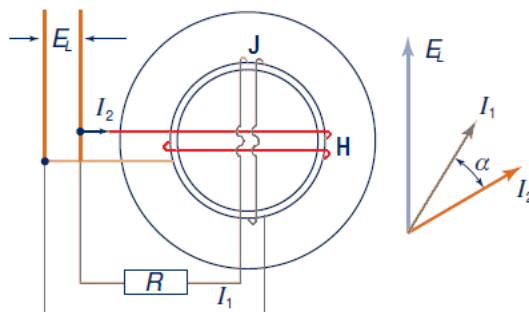


Figura 52. Motor de fase partida

Las corrientes I_1 e I_2 estarán retrasadas respecto a la tensión E , pero existirá un ángulo α de desplazamiento entre ambas. Si se descompone I_1 en sus dos componentes:

- $I_1 \sin(\alpha)$ retrasada 90° respecto a I_2
- $I_1 \cos(\alpha)$ en fase con I_2

Entonces podemos apreciar que la única que contribuye a formar el par de arranque, junto con I_2 , es $I_1 \sin(\alpha)$, por lo que dicho par vendrá dado por la siguiente ecuación:

$$T_a = K I_2 I_1 \sin \alpha$$

Ec [8]

El **Motor con Condensador**, consiste en intercalar un capacitor en serie con el arrollamiento auxiliar (J) como se observa en la figura 53, para que la corriente que circula por él (I_1) adelante aproximadamente 90° a la corriente que pasa por el otro enrollado (I_2). Así, los flujos magnéticos de ambos enrollados producen un flujo resultante rotatorio, de magnitud constante, y con una velocidad "síncrona", logrando así, mejorar considerablemente las condiciones de arranque.

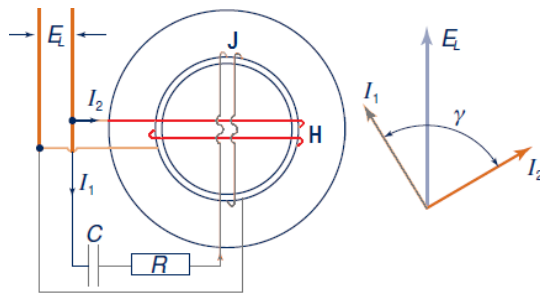
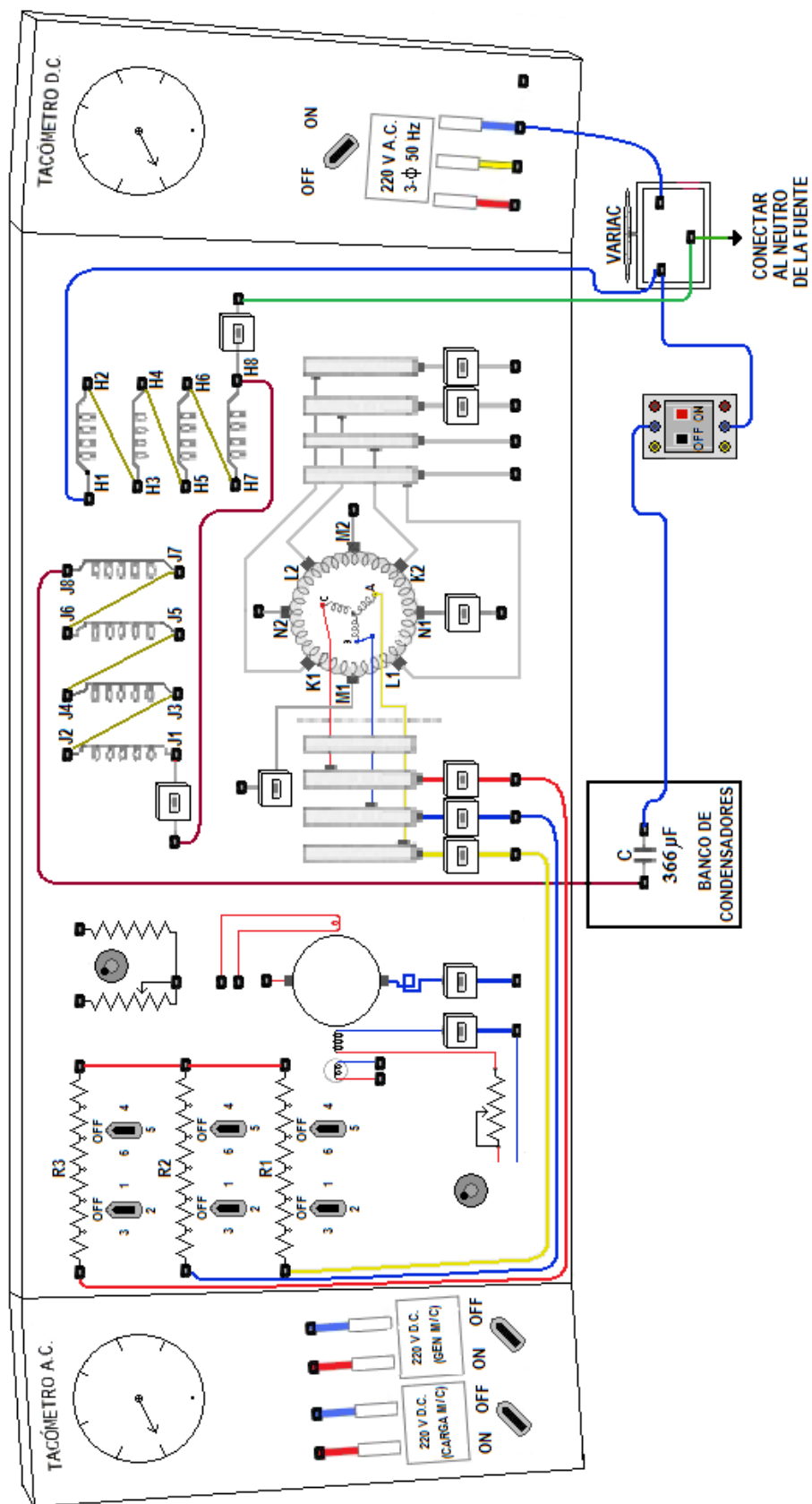


Figura 53. Motor con condensador

En este caso, el desfase γ entre I_1 e I_2 está sujeto entonces a la capacidad del condensador, y según algunos autores, si este es adecuado, se puede obtener incluso un par de arranque superior a 3,5 veces el par a plena carga,

En el diagrama de la figura 54 se pueden observar las conexiones pertinentes a este modo de operación pero omitiendo la resistencia por las razones expuestas en el diagnóstico bajo este modo de operación en el punto sin embargo se hace énfasis en que el disco del rotor debe ser colocado en la posición 2.



Se debe colocar el disco del rotor en la posición 2.

Figura 54. Diagrama de operación como máquina de inducción con alimentación monofásica

5.5.2. Operación como Máquina de Inducción con Alimentación Bifásica.

Se puede decir que el motor de inducción bifásico es prácticamente idéntico a un motor monofásico con condensador dado que la única diferencia es que en el caso monofásico se crea el desfase de 90° entre las corrientes que circulan por los devanados dispuestos en cuadratura por medio del condensador, mientras que en el caso bifásico se cuenta con una fuente de alimentación que provee esa característica directamente.

Pues bien, dado que la máquina generalizada también tiene dos arrollados idénticos en el estator, desplazados en el espacio a 90° eléctricos, y alimentados con voltajes V_a y V_b provenientes de una fuente bifásica equilibrada; es decir V_a y V_b tienen igual magnitud, y están desfasados entre sí 90° , las corrientes balanceadas inyectadas también están desfasadas en 90° en el tiempo. Estos hechos producen flujos iguales en ambas bobinas pero en dos grados de libertad, al generarse un campo en la dirección del primer arrollado y uno en la dirección del segundo arrollado. Es decir el flujo magnético ϕ_1 de la bobina “H”, adelanta en 90° al flujo ϕ_2 de la bobina “J”, produciéndose un flujo magnético resultante rotatorio, de magnitud aproximadamente constante, y con una velocidad "síncrona".

La fuente de voltaje bifásico en este caso, es la salida de la denominada conexión Scott, que se construye con la ayuda de dos transformadores monofásicos existentes en el laboratorio, uno de 3 kVA con relación 1:1 y otro de 10 kVA de relación 2:1, para poder crear la tensión bifásica y abastecer el montaje de la figura 58 desde la fuente de alimentación trifásica con la cual se cuenta. Por ello, es pertinente que antes de utilizar el conjunto bajo este modo de operación, se estudie previamente como diseñar una fuente bifásica como se hace a continuación.

5.5.2.1. Diseño de una Fuente Bifásica a Partir de la Red Trifásica.

A principios de la transmisión de la corriente alterna, los sistemas de potencia bifásicos y trifásicos eran muy comunes y esto generaba la necesidad de interconectar ambos sistemas entre sí para poder unificar y abastecer a los distintos sectores bajo una sola red de transmisión. Esta factibilidad fue posible gracias a un arreglo sencillo de transformadores dispuestos para tal propósito denominado conexión Scott.

Es decir, la conexión Scott no es más que una herramienta para obtener dos fases de igual magnitud pero separadas 90° eléctricos en el tiempo y el espacio, a partir de una fuente de alimentación trifásica, cuyas fases se hallan separadas 120° eléctricos en el espacio y en el tiempo. También es posible hacer la conversión inversa (de una fuente bifásica a una trifásica), por medio de esta conexión, pero es rara su aplicación ya que hay muy pocos generadores bifásicos en uso.

Pues bien, esta conexión consiste en dos transformadores monofásicos, con la suficiente capacidad para el sistema que se desee trabajar (idealmente con la misma potencia nominal aunque no es esencial). Un ejemplo de esto es la fuente bifásica diseñada para abastecer la máquina generalizada bajo la configuración como máquina de inducción bifásica, donde se utilizó un transformador de 3 kVA (TR1) y uno de 10 kVA (TR2), teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Alimentación trifásica de 220V (regulables) desfasadas a 120° entre sí.
- b) Alimentación bifásica requerida de 220V (regulables) desfasadas a 90° entre sí.

Para entender bien este diseño, a las bobinas correspondientes a cada transformador se les dio un nombre específico, como se puede apreciar en la figura 55, para facilitar la comprensión de las próximas ilustraciones así como de la conexión Scott en sí misma.

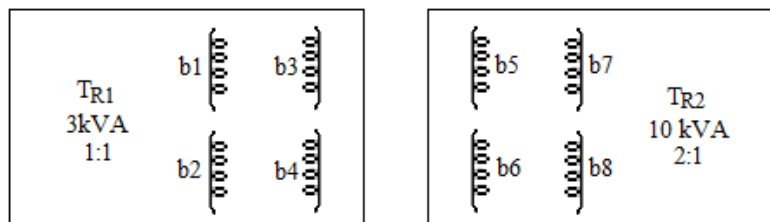


Figura 55. Transformadores usados para la conexión Scott.

En la figura 56(a) se pueden apreciar las tensiones de una red trifásica balanceada desfasadas 120° entre sí, pero como se puede observar en la figura 56(b), al conectar dicho sistema a los transformadores, la alimentación inyectada a TR2 por medio de las bobinas b5 y b6, corresponde a la tensión existente en la conexión entre V_A y el punto M que se ha denominado V_1 como se puede ver en la figura 56(c); mientras que por otra parte, la alimentación de entrada del transformador TR1 a través de las bobinas b1 y b2, corresponde a la tensión vista entre dos fases provenientes de la red.

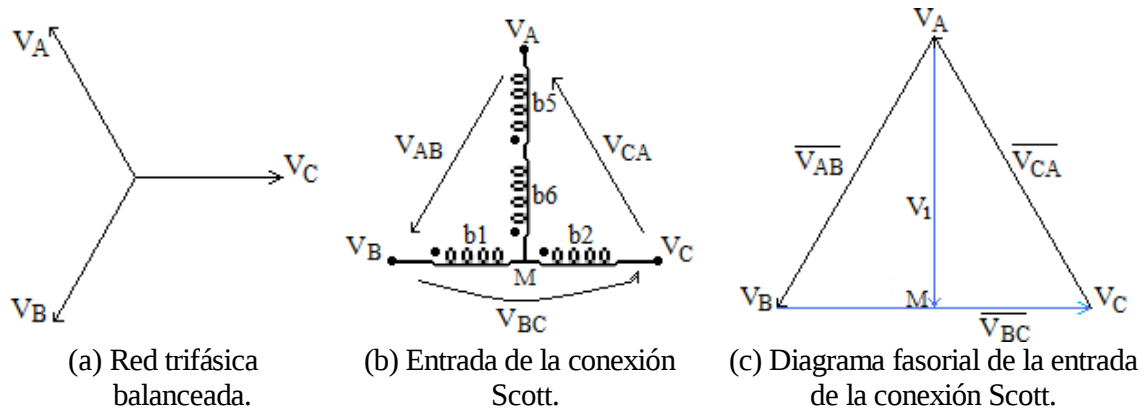


Figura 56. Conexión de la red trifásica a los transformadores TR1 y TR2

Si por ejemplo se toma una alimentación entre dos fases de 220V, el valor de V_1 se puede obtener por medio del diagrama fasorial, a través de la siguiente ecuación:

$$V_1 = \sqrt{(V_{AB})^2 - \left(\frac{V_{BC}}{2}\right)^2} = \sqrt{(220V)^2 - (110V)^2} \Rightarrow V_1 \approx 190,5V \quad \text{Ec [9]}$$

Entonces, la tensión de entrada del transformador TR2 entre las terminales de las bobinas b5 y b6, es de aproximadamente 190,5V y dado que su relación de transformación es 2:1, se obtendrá a la salida de este una tensión calculada por medio de la siguiente resolución:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{2}{1} \quad \text{Ec [10]}$$

$$\text{despejando:} \quad V_2 = \frac{1}{2}V_1 \Rightarrow V_2 = \frac{190,5V}{2} = 95,25V \quad \text{Ec [11]}$$

En el caso del transformador TR1, dado que su relación de transformación es de 1:1 entonces la tensión en el secundario (bobinas b3 y b4), será de igual magnitud, es decir, los mismos 220V.

Sin embargo, la tensión que ha resultado de la ecuación anterior no es la requerida por la fuente bifásica, ya que ambas fases deben tener la misma magnitud (220V en el caso que estamos estudiando). Esto implica la necesidad de incrementar dicho valor de 95,25V a 220V, lo que se puede hacer con un autotransformador variable (variac) como se representa en la figura 57(a), donde además se notará, que la salida de la conexión Scott está diseñada para lograr la alimentación bifásica y la disposición realizada ayudará a comprender los desfases obtenidos de estas tensiones mostrados en la figura 57(b):

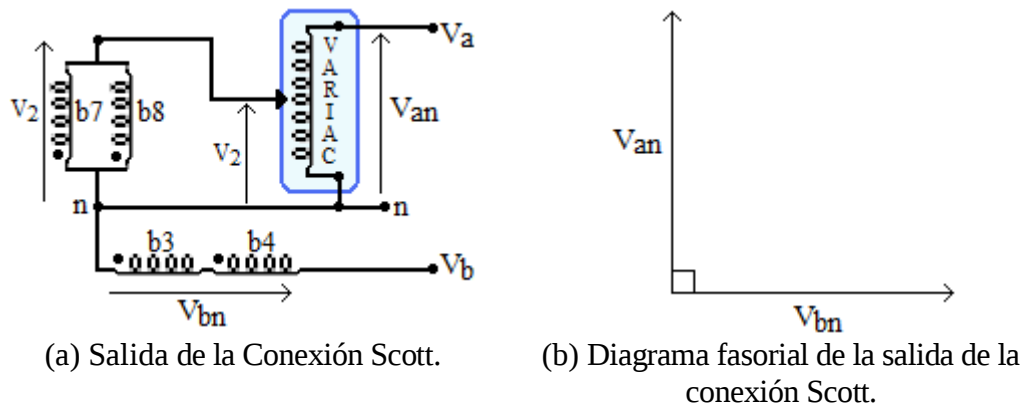


Figura 57. Salida de la conexión Scott

Una vez hechas estas consideraciones se tiene una fuente bifásica a partir de la alimentación trifásica de la red, cuyas fases están separadas 90° entre sí con una magnitud de 220V cada una, por medio de la conexión Scott en combinación con el variac. Cabe destacar que la alimentación no tiene que ser necesariamente 220V ya que se puede elegir un nivel de tensión más bajo o regularlo a través de un variac trifásico a la entrada de este montaje, dado que el razonamiento es el mismo y que en realidad es lo más recomendable a la hora de trabajar con la máquina generalizada (un nivel de tensión de 60V entre las fases es suficiente).

Con este montaje ahora se puede trabajar la máquina generalizada en la configuración de máquina de inducción bifásica, dado que se tienen las condiciones necesarias para su alimentación, como se muestra en el diagrama de la figura 58.

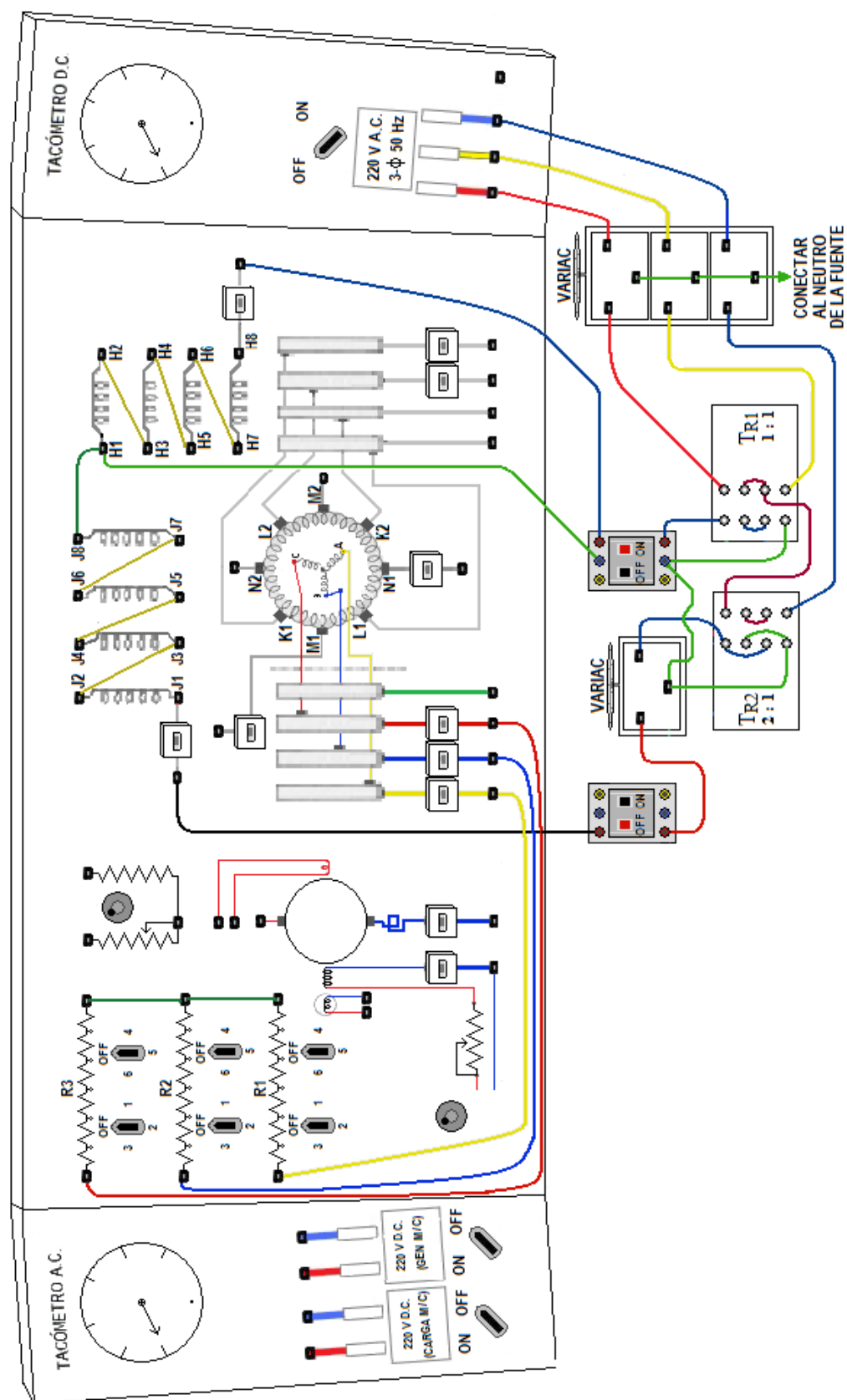


Figura 58. Diagrama de operación como máquina de inducción con alimentación bifásica

5.5.3. Operación como Máquina de Inducción Trifásico

En la operación como máquina asincrónica el devanado trifásico del rotor conectado en estrella se excita 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.

Si los dos devanados del estator están en cortocircuito, entonces es evidente que las corrientes fluirán en ellos a una frecuencia igual y a la misma velocidad a la de los voltajes inducidos. Este último es un ejemplo de un arrollamiento bifásico de 2 ejes portadora de corrientes bifásicas balanceadas a una frecuencia mayor que cero pero mucho menor que la frecuencia de alimentación.

Para cualquier velocidad, tanto menor y mayor que el valor sincrónico, la velocidad del campo magnético giratorio producido por la corriente en el devanado del estator es igual a la del campo producido por el rotor. Se ha encontrado que las dos velocidades son siempre iguales, es decir, que existen dos patrones de componentes de campo magnético que funcionan a la misma velocidad, a pesar de que las varía la velocidad real con la medida en que la velocidad del rotor difiere del valor síncrono, lo que es igual a decir, por el deslizamiento. Así, las condiciones para la conversión de energía electromecánica se han alcanzado.

El dispositivo se llama una máquina de inducción porque la corriente polifásica que fluye en el devanado secundario es inducida por la alimentación de corriente en el bobinado primario.

Entonces, el flujo neto del entrehierro es aproximadamente constante si un voltaje constante se aplica al devanado primario y por lo tanto la tensión neta inducida en el arrollamiento secundario es aproximadamente proporcional al deslizamiento.

Por otra parte, el valor máximo de “par motor” posible para la conversión de energía se alcanzará cuando la combinación más ventajosa de los componentes de flujo y el ángulo de torsión entre ellos se logre. Más allá de ese punto, los componentes de flujo aumentarán, pero el par se reducirá.

También, cuando se aplica un par en el eje de una máquina de inducción, el rotor reduce su velocidad si el par es de frenado o la acelera si el par es de accionamiento.

Para accionar la máquina generalizada como una máquina de inducción trifásica (necesariamente en paralelo con un sistema de suministro, que establece el flujo necesario para el funcionamiento), 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 c/s la velocidad de sincronismo será 1800 rev/min.

Dicho esto podemos apreciar en la figura 59 el montaje del conjunto de la máquina generalizada como máquina de inducción trifásica.

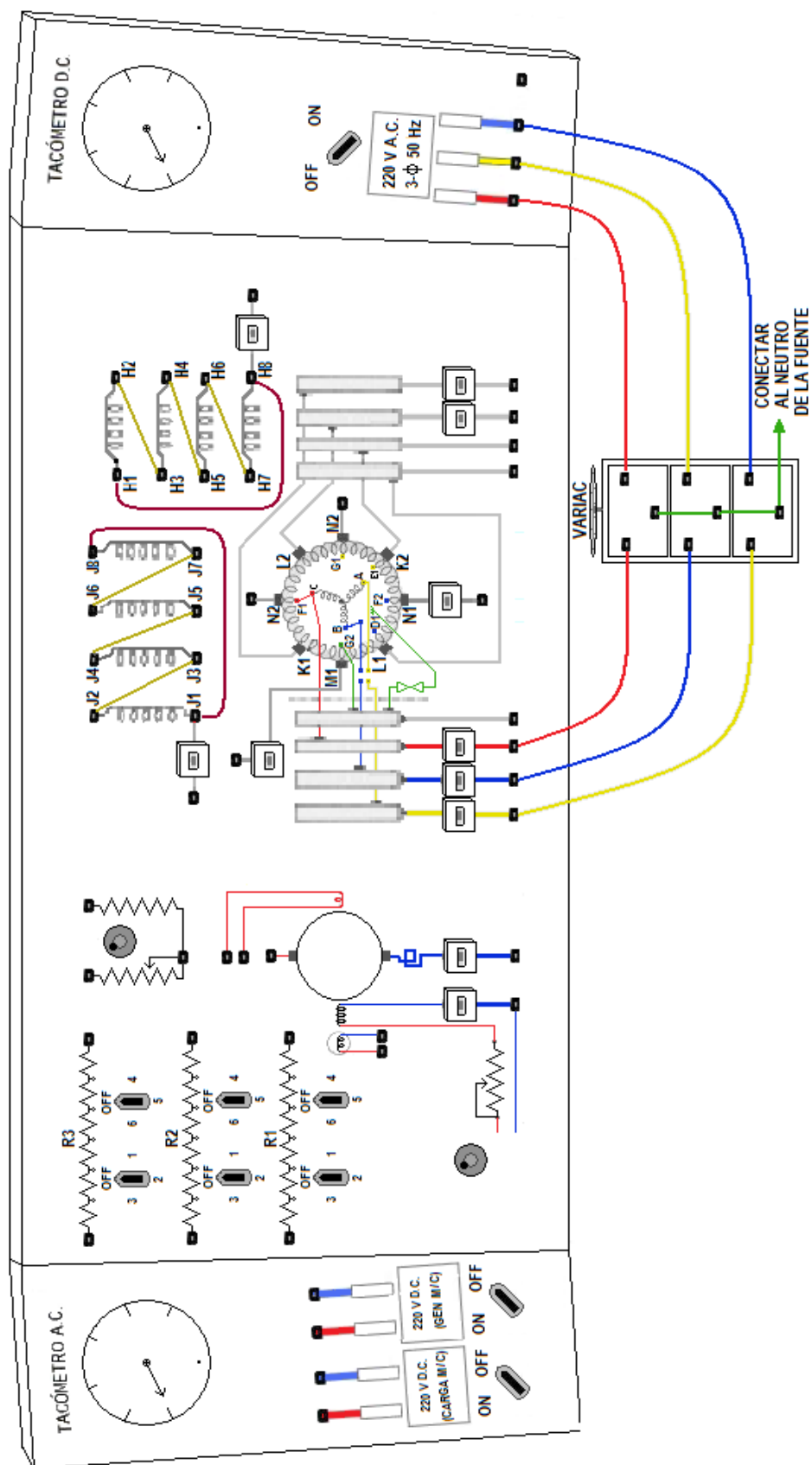


Figura 59. Diagrama de operación como motor de inducción trifásico

5.5.4. Operación como Máquina Síncrona Trifásica

La mayor aplicación de estas máquinas se puede ver en sistemas a altas potencia, particularmente como generadores a bajas revoluciones como por ejemplo en centrales hidroeléctricas, y también a altas revoluciones como los usados en centrales con turbinas de gas o de vapor.

Por tal motivo se debe destacar, que cuando la máquina síncrona se encuentra conectada a la red eléctrica, la velocidad de su eje depende directamente de la frecuencia de la corriente y del número de polos, razón por la cual se le llama máquina síncrona, ya que se dice que está operando en sincronismo con la red. Sin embargo, hay que aclarar que si no se encuentra acoplada de la red, la frecuencia de las corrientes generadas, dependen directamente de la velocidad mecánica que impulse la rotación del eje; lo que constituye una aplicación que ha sido relevante en el desarrollo de centrales de generación a partir de recursos renovables como por ejemplo la energía eólica.

Adicionalmente a la operación como motor y generador, el control de la alimentación D.C. hace que la máquina síncrona pueda operar absorbiendo o entregando reactivos a la red. Particularmente esta última aplicación es utilizada para mejorar el factor de potencia del sistema eléctrico el cual tiende a ser inductivo debido a las características típicas de los consumos.

En cuanto a la máquina generalizada se refiere, para configurarla bajo el este modo, se debe colocar el disco del rotor en la posición 2, y es muy importante entender que 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, y en caso contrario, si desea estudiar un motor síncrono, entonces deberá ser la máquina generalizada la que impulse a la máquina de carga D.C.

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 60 para poder generar las corrientes alternas en las salidas del devanado trifásico conectado en estrella del rotor.

Cuando la máquina generalizada trabaja como motor síncrono, simplemente se desconecta del montaje la máquina de carga D.C., y en su lugar se debe excitar el devanado trifásico del rotor conectado en estrella con corrientes trifásicas balanceadas. Además, la corriente directa se pasa esta vez, por uno solo de los dos devanados del estator para lograr las condiciones necesarias para la conversión de energía electromecánica. En este caso se verá que el motor funcionará a la velocidad de sincronismo de la red eléctrica, (1800 rev/min para el suministro a 60Hz).

Más allá de esto, la conversión de energía en el modo sincrónico entre sistemas eléctricos y mecánicos en cualquier dirección (motor o generador), conllevan una alimentación A.C. en uno de los elementos (la armadura), que produce un campo magnético que gira a una velocidad fija, y una alimentación D.C. en el otro elemento (el sistema de campo), que produce un campo magnético estacionario respecto a la tendencia a la alineación entre ambos campos y que conducen a la torsión.

Lo que ocurre es que las componentes de ambos campos magnéticos, y dicha tendencia a alinearse, no varían entre sí debido a que el campo magnético giratorio producido por el devanado del inducido trifásico, y el provocado por el estator excitado con D.C. rotan sincrónicamente, lo que a su vez origina que el ángulo del par se mantenga también constante.

Esto quiere decir, que si por ejemplo se aplica un par al eje mayor al par máximo que pueden soportar los elementos excitados, se perdería el sincronismo provocando que la máquina se vuelva inestable y que los dos campos magnéticos giren a velocidades diferentes lo cual es indeseable.

Otro aspecto importante al trabajar con la máquina generalizada es que se debe garantizar que la corriente que pasará por el estator no exceda los 27A permitidos por estas bobinas, y para ello, se debe energizar solo la máquina de carga D.C. como primo motor y colocar una R_{Shunt} y un mili-voltímetro en la toma

dispuesta para esto en el estator, para medir y saber con exactitud que corriente hacemos llegar a dicho devanado antes de hacer las pruebas pertinentes.

Según esta configuración, para hacer funcionar la máquina generalizada como maquina sincrónica trifásica debe controlarse la corriente de campo I_f por medio de un reóstato que según las pruebas sería suficiente uno de $33\ \Omega$ y 4,2A pero dado que por las bobinas del estator puede circular una corriente alta (hasta un máximo de 27A), la potencia es bastante grande y calentaría demasiado al reóstato, por eso, es preferible colocar varios reóstatos interconectados entre sí de manera tal que se conserve la misma resistencia equivalente pero que se pueda manejar la potencia que se disipa en los mismos sin sobrecalentarlos. También es conveniente, interponer un interruptor adicional entre el habilitador de tensión del panel de control y las bobinas del estator de la máquina generalizada para hacer la conmutación como se muestra en el diagrama de la figura 60.

Alternativamente solo uno de los devanados del eje puede ser alimentado en DC y el otro puede ser un cortocircuito.

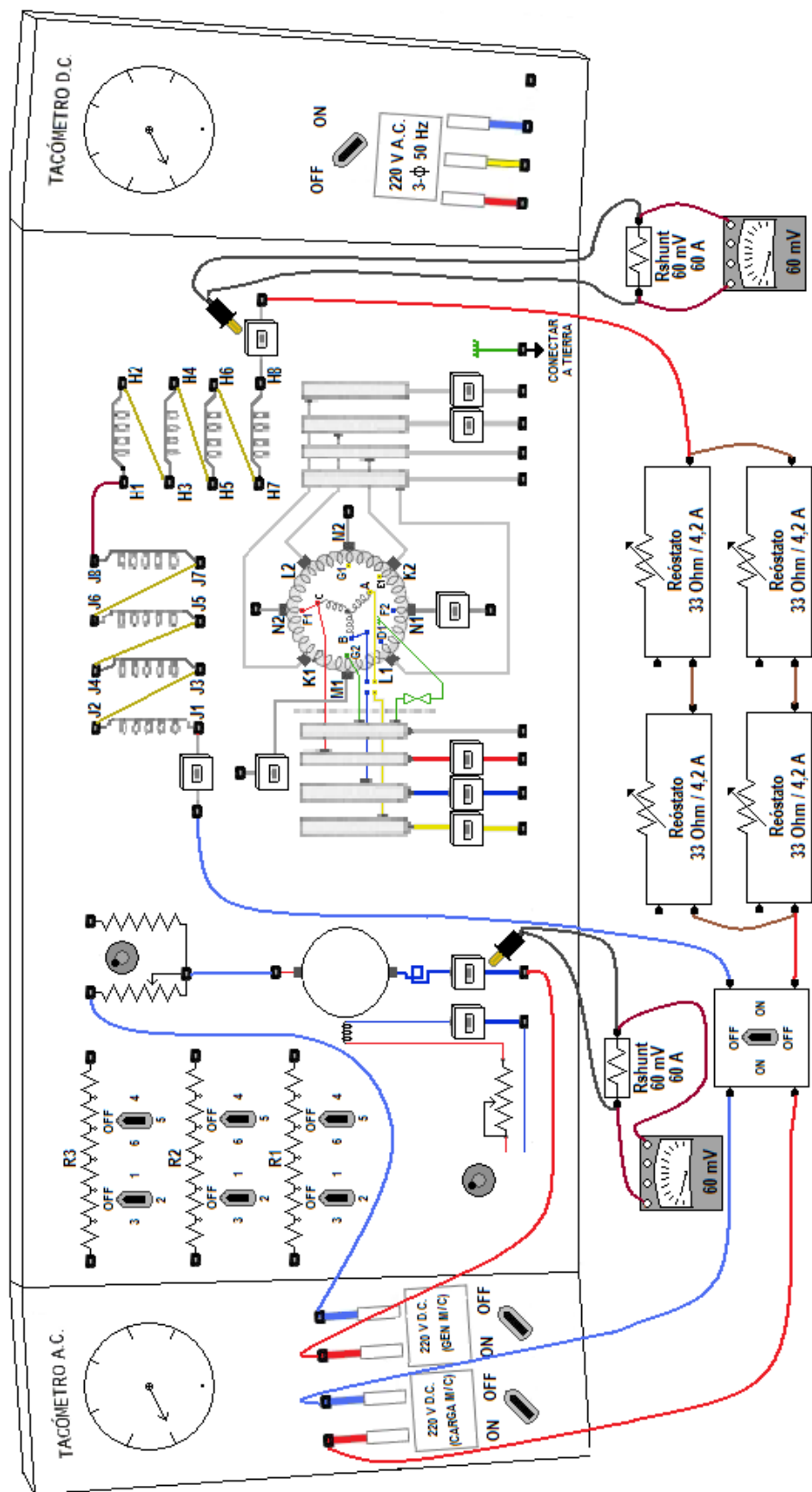


Figura 60. Diagrama de operación como generador sincrónico trifásico

5.5.5. Operación como Motor de Repulsión

El motor de repulsión es una variante del motor serie, en el que la corriente de armadura se crea inductivamente. Por ejemplo, si en el motor serie básico de la figura 61(a), se coloca otro arrollamiento de excitación en el eje transversal y se cortocircuitan las escobillas, como en la figura 61(b), se puede crear inductivamente una corriente del inducido.

Como este motor opera es en A.C., en lugar de tener dos devanados de excitación se coloca uno sólo en la dirección de la fmm de excitación resultante, como se ve en la figura 61(c), ó se reubican los ejes longitudinal y transversal para definir un nuevo ángulo de escobillas θ_e' como el suplemento de θ_e menor a 90° eléctricos como se ve en la figura 61(d) y como en realidad se hace en la máquina generalizada al ajustar los ejes con el balancín a -39° eléctricos (6° eléctricos adelante del eje fmm del estator).

En resumen, al conectar este motor a una corriente A.C. monofásica se crea un campo magnético en el estator que induce otro campo en el inducido por lo que, si ellos están separados a cierto ángulo, se crea un par de arranque que hace girar el rotor. He aquí, el principio de que polos iguales se repelan, del que el motor de repulsión toma su nombre. No obstante, a este motor no se le puede aplicar una tensión mayor a 84V según el manual de la máquina generalizada

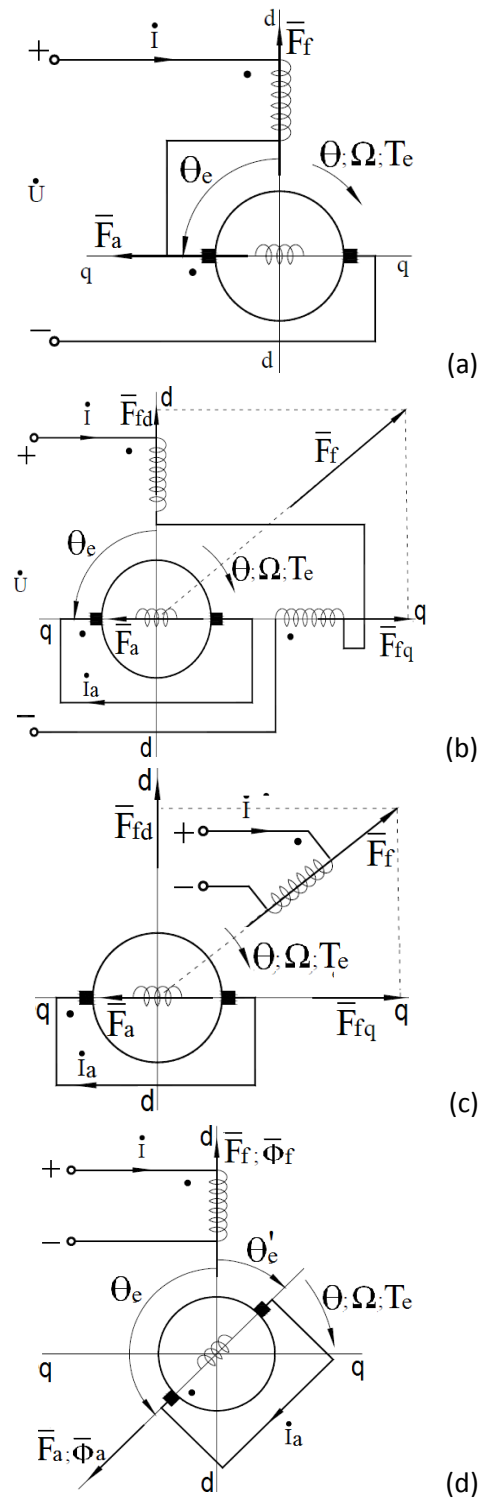


Figura 61. Máquina de repulsión

5.5.6. Operación como Motor Schrage.

El motor de velocidad variable, denominado motor Schrage en homenaje a su inventor, tuvo cierto éxito entre las máquinas trifásicas de corriente alterna, no obstante, en la actualidad ya no se utilizan y han sido reemplazados por motores asíncronos de rotor en cortocircuito alimentados con variadores electrónicos de velocidad.

Hay que destacar que esta máquina funciona normalmente a una velocidad prácticamente constante, a un pequeño porcentaje (deslizamiento) por debajo de la velocidad de sincronismo, por lo que si queremos variar la velocidad en esta configuración, la manera más eficiente es valerse del deslizamiento y voltajes inducidos sin que se produzcan pérdidas de la siguiente forma:

Cuando la máquina generalizada funciona como un motor Schrage el devanado del rotor conectado en estrella conforma el devanado primario, y las escobillas sobre el colector son evidentemente estacionarias para el devanado secundario. Los pares de escobillas en el colector definen bobinas con deslizamiento y tensiones inducidas en ellos, por el campo magnético que gira tan lento como lo hagan los devanados secundarios. Por eso, mediante la selección de pares de escobillas dispuestas apropiadamente en el colector, se puede obtener el deslizamiento y voltajes de fase apropiados que varían en magnitud con la separación angular de las escobillas.

Entonces, por medio de la conexión de las escobillas rotativas a los arrollamientos secundarios, es decir, mediante la inserción de las tensiones y deslizamientos ajustables en los circuitos secundarios, se puede lograr variar velocidad eficientemente en esta máquina de corriente alterna. Por ello y con el fin de hacer esto, podemos decir que el colector se comporta como un cambiador de frecuencia.

Para la configuración como motor Schrage se dispone del colector y escobillas para la alimentación de la armadura de forma similar a un motor de

inducción trifásico (posición 2 en el disco del rotor), pero la gran diferencia es que este diseño permite variar la velocidad si se modifica la posición de apoyo de las escobillas respecto al bobinado de campo. Esto es debido a que en el rotor existen dos juegos de escobillas, los cuales uno es fijo y se conecta a través del colector y el otro es un juego de escobillas rotativas adicional, conectado por medio de los anillos rozantes.

Además es muy importante asegurarse de no sobrepasar los valores nominales de tensión y corriente reflejados en la placa del fabricante. Para esto, se debe colocar un amperímetro A.C. en la alimentación trifásica (en cualquiera de las entradas dado que se trabaja con un sistema balanceado), para observar que no se sobrepasen los 14 A permitidos por las bobinas del rotor configuradas en estrella. También es recomendable colocar otro amperímetro A.C. en alguna de las tomas dispuestas en el estator, para asegurarse de que la corriente que por allí circula no exceda los 20A (Ver figura 63).

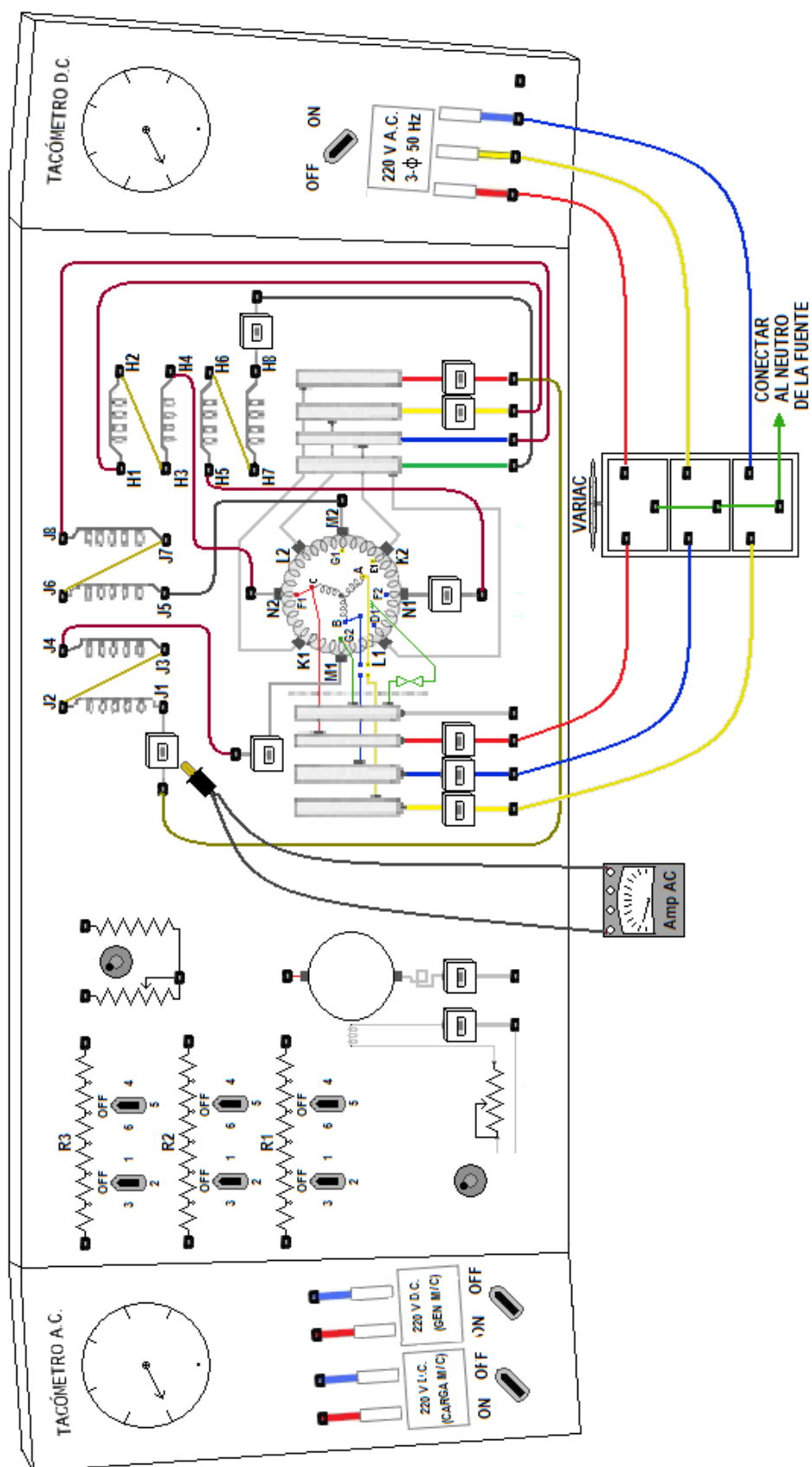


Figura 63. Diagrama de operación como motor Schrage

5.6. Diagnóstico de la Máquina Generalizada Operando como Diversos Tipos de Máquina A.C.

5.6.1. Diagnóstico como Máquina de inducción con alimentación monofásica:

Durante las pruebas realizadas bajo las configuraciones establecidas por el manual de operaciones de la máquina generalizada se observó lo siguiente:

En el caso de motor a fase partida, (solo con la resistencia conectada), la maquina no gira, y se presume que lo que está ocurriendo es que a pesar de estar ambas bobinas del estator desfasadas 90° en el espacio, no se logra conseguir el desfasaje en tiempo bajo esta configuración.

Para el caso del motor monofásico con condensador se colocó un capacitor de $366\ \mu\text{f}$ dado que según los cálculos que se verán más adelante, y lo indicado en el manual de la máquina, el mismo debe ser mayor a $230\ \mu\text{f}$ y menor a $2000\ \mu\text{f}$, además se realizaron varias mediciones para poder determinar el comportamiento como maquina de inducción con alimentación monofásica arrojándonos los siguientes resultados:

Tabla 5. Máquina de inducción monofásica con capacitor dada en el manual

Tensión	Corriente	Rpm	Descripción
42 V	7,5 A	500	La maquina vence la inercia y comienza a girar, luego estos valores decaen un poco (40V y 7A) debido al proceso de estabilización
45V	oscilación	600	Al aumentar la tensión poco a poco con el variac hasta llegar a esos valores la maquina registra una oscilación mantenida alrededor de 8 y 8,5A.
50V	10,5A	650	El giro del rotor no es uniforme, sino que presenta variaciones y la maquina comienza a vibrar fuertemente

Por tanto, se concluye de las pruebas que para estos dos casos que:

- No se puede hacer funcionar la máquina en el modo de fase partida.
- Aunque se pudo hacer girar el rotor al agregar el condensador, esta configuración propuesta en el manual de la máquina no funciona correctamente pues presenta bastante vibración.

Motivado a estos resultados, es importante aclarar que el diagrama de conexiones presentado en el punto 5.5.1, es otro arreglo que no corresponde al propuesto por el manual de operaciones de la máquina generalizada, debido a que no se consiguió que el equipo funcionara bajo tales modos impuestos. Pero esta eventualidad no impidió el ingenio y se pudo realizar una configuración propia, para lograr estudiar una máquina de inducción monofásica dadas las bondades de la máquina generalizada, demostrando así lo que ya se ha mencionado antes, en cuanto a que todas las configuraciones presentadas en este proyecto no agotan las posibilidades.

Sin embargo, para complementar toda la información posible sobre dicha configuración propia, era imprescindible establecer algunas consideraciones como las que se mencionan más adelante en cuanto a los elementos necesarios para que la máquina generalizada funcionara bajo este nuevo modo.

Por ejemplo, para saber cuál era el valor del condensador para el arranque bajo este modo de operación, se procedió a hacer el montaje como una máquina de inducción bifásica (ver diagrama 58), debido a que con este experimento se podía obtener fácilmente los valores adecuados y suficientes para calcular los parámetros necesarios para la configuración como motor de inducción monofásico con condensador.

De dicho montaje bifásico, se realizó la prueba a rotor trabado obteniendo los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 6. Valores obtenidos de la máquina de inducción bifásica.

Estator	Tensión Medida	Corriente Medida	Potencia		
			Medición	Multiplicador de la escala del vatímetro	Potencia media
Devanado H	46 V	5 A	98	2	196 W
Devanado J	47 V	5,7 A	100	2	200 W

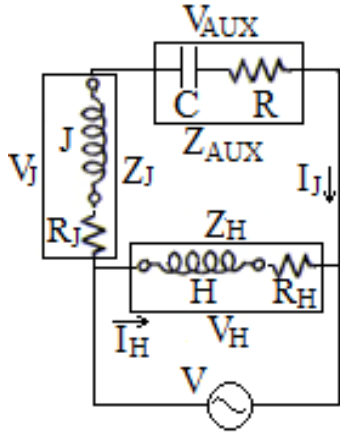


Figura 64. Esquema bifásico

Luego, se tomó en cuenta el montaje monofásico del circuito de la figura 64, donde los devanados fueron dibujados convenientemente en la misma posición que en el panel de control, y se consideraron los valores obtenidos de la prueba en bifásico, para encontrar fácilmente el valor de la tensión V_{AUX} y posteriormente el de los elementos R y C. Para ello se procedió a calcular los parámetros que aparecen en la figura 65, de la siguiente forma:

$$\vec{V}_H - \vec{V}_J - \vec{V}_{AUX} = 0 \Rightarrow \vec{V}_{AUX} = \vec{V}_H - \vec{V}_J \quad \text{Ec [12]}$$

$$\Rightarrow \vec{V}_{AUX} = 46V \angle 0^\circ - 47V \angle 90^\circ = 65,7647V \angle -45,616^\circ$$

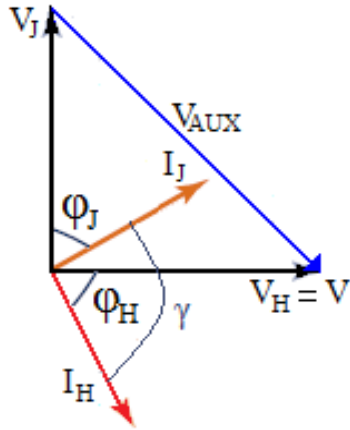


Figura 65. Diagrama fasorial

Teniendo esta tensión, solo falta conocer el ángulo de la corriente I_J para obtener la impedancia deseada (Z_{AUX}), dado que, como se aprecia en el circuito de la figura 64, y de la prueba bifásica, ya la conocemos pero en magnitud, y por tanto, para determinar este ángulo ϕ_J utilizamos la siguiente expresión:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi \quad \text{Ec [13]}$$

$$\cos \phi = \frac{P}{V \cdot I} \Rightarrow \phi = \cos^{-1} \left(\frac{P}{V \cdot I} \right) \quad \text{Ec [14]}$$

$$\text{de donde: } \phi_H = \cos^{-1} \left(\frac{196}{(46) \cdot (5)} \right) = 31,5512^\circ \quad \text{y} \quad \phi_J = \cos^{-1} \left(\frac{200}{(47) \cdot (5,7)} \right) = 41,7078^\circ$$

Además, con el valor de ϕ_J sabemos entonces que la corriente que buscamos corresponde a:

$$\vec{I}_J = |\vec{I}_J| \angle 90^\circ - \phi_J \quad \text{Ec [15]}$$

$$\Rightarrow \vec{I}_J = 5,7 \angle 48,2922^\circ$$

Por último, como ya tenemos todos los valores necesarios, calculamos el condensador y la resistencia de la siguiente manera:

$$\vec{Z}_{AUX} = \frac{\vec{V}_{AUX}}{\vec{I}_J} \quad \text{ó en su forma rectangular} \Rightarrow \vec{Z}_{AUX} = R + jX_C \quad \text{Ec [16]}$$

$$\Rightarrow \bar{Z}_{AUX} = \frac{65,7647V \angle -45,616^\circ}{5,7 \angle 48,2922^\circ}$$

De donde se obtiene que:

$$\bar{Z}_{AUX} = 11,5376\Omega \angle -93,9082^\circ = -0,7863 - j11,5108 \quad \Rightarrow \begin{cases} R = -0,7863 \Omega \\ X_C = -11,5108 \end{cases}$$

Evidentemente no existe una resistencia cuyo valor sea negativo tal y como se obtuvo hace un momento. Esto se debió a que las tensiones utilizadas en el cálculo anterior, no estaban realmente en cuadratura como se presumía en un principio, y esto originó que el ángulo entre la tensión V_{AUX} y la corriente que circularía por la carga, fuese mayor a 90° . Sin embargo, al ser esta resistencia un valor tan pequeño y al observar que la fase de la carga Z_{AUX} se acerca a los -90° , se puede aproximar el modelo a una carga puramente capacitiva (omitiendo la resistencia).

Ciertamente, el circuito funcionó a pesar de que las tensiones no estaban en cuadratura, debido que en realidad, las componentes entre ellas eran suficientes para generar un flujo rotativo que aceleró el rotor de la máquina. Por tal motivo, el objetivo principal por el cual se hizo todo este procedimiento se cumple al poder determinar el valor del condensador mediante las siguientes ecuaciones:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega X_C} \quad \text{Ec [17]}$$

$$\omega = 2\pi f \quad \text{Ec [18]}$$

$$\text{Donde: } f = 60\text{Hz}$$

Sustituyendo se obtiene que el valor de C es:

$$C = \frac{1}{(376,98)(11,5108)} = \frac{1}{4339,3634} \Rightarrow C = 230,4485 \mu F$$

En el laboratorio existe un banco de condensadores con tres unidades de $366 \mu F$ cada uno, con el cual es posible trabajar este montaje y hacer las pruebas requeridas. Por lo ya expuesto, la figura 54 muestra entonces como realizar las conexiones pertinentes para este arreglo, el cual funcionó satisfactoriamente al realizar la prueba de accionamiento bajo esta configuración.

5.6.2. Diagnóstico como Otras Operaciones de la Máquina en Modo A.C.

Para cada una de las configuraciones de la máquina generalizada bajo los otros modos de operación vistos, (de inducción bifásica, de inducción trifásica, sincrónica trifásica, de repulsión y como motor schrage), se realizaron las conexiones establecidas por el manual de operaciones de la máquina generalizada en su diagrama correspondiente, tal y como fueron presentados en el punto 5.5, notando que el desempeño del equipo, en general fue bastante bueno en cada prueba de accionamiento y no fueron necesarias mayores consideraciones que las ya explicadas previamente, en los puntos concernientes, y en los diagramas que se plantearon respectivamente.

5.7. Maquinas que Pueden Operar en D.C. y en A.C.

5.7.1. Operación como Máquina Universal D.C. o A.C.

Puede conectarse indistintamente en corriente continua o alterna y por esa razón se le denomina “universal”. Su construcción así como su conexión y sus características de funcionamiento, son muy semejantes a las de un motor D.C. serie, con algunas modificaciones a fin de obtener un funcionamiento aceptable en corriente alterna.

La capacidad de la máquina generalizada para funcionar como este tipo de motor, es tal que cuando los devanados del inducido e inductor están unidos en serie y circula una corriente por ellos, se forman dos flujos magnéticos que al reaccionar provocan el giro del rotor, tanto si la tensión aplicada es continua como alterna. Por otra parte, para trabajar bajo estos modos de operación, es recomendable incrementar la tensión desde un nivel bajo y es importante levantar las cuatro escobillas alternativas que no están siendo usadas, ubicadas en el engranaje del motor de escobillas para evitar desgastes innecesarios de las mismas y perturbaciones al montaje que se desee trabajar.

Cuando el motor universal funciona en D.C. se caracteriza por disponer de un fuerte par de arranque y una velocidad igual a los motores serie de corriente continua, pero cuando funciona en A.C. la velocidad depende de la carga (a más carga, menos velocidad y viceversa) y es por ello que para poder regularla, normalmente se intercalan resistencias. Estas propiedades son lo más característico del motor universal. En cuanto al devanado de compensación se puede decir que no es más que una bobina dispuesta especialmente para contrarrestar los problemas de la reacción de armadura y entre otras cosas, se debe mencionar que la máquina generalizada puede adaptarse a cualquier velocidad de giro permitida (hasta 2500 rpm) y resulta fácil regularla con sólo conectar un reóstato en serie con el inducido como se ve en las figuras 66 y 67, cosa que no puede conseguirse con otros motores de A.C.

En general, un motor universal puede llegar a ser muy compacto y dar más par por amperio que cualquier otro motor monofásico, por lo que su uso es muy común y se emplean en herramientas de mano como por ejemplo taladros, sierras, etc., y muchos electrodomésticos como batidoras, licuadoras, etc.

Con devanado de compensación.

Con devanado de compensación.

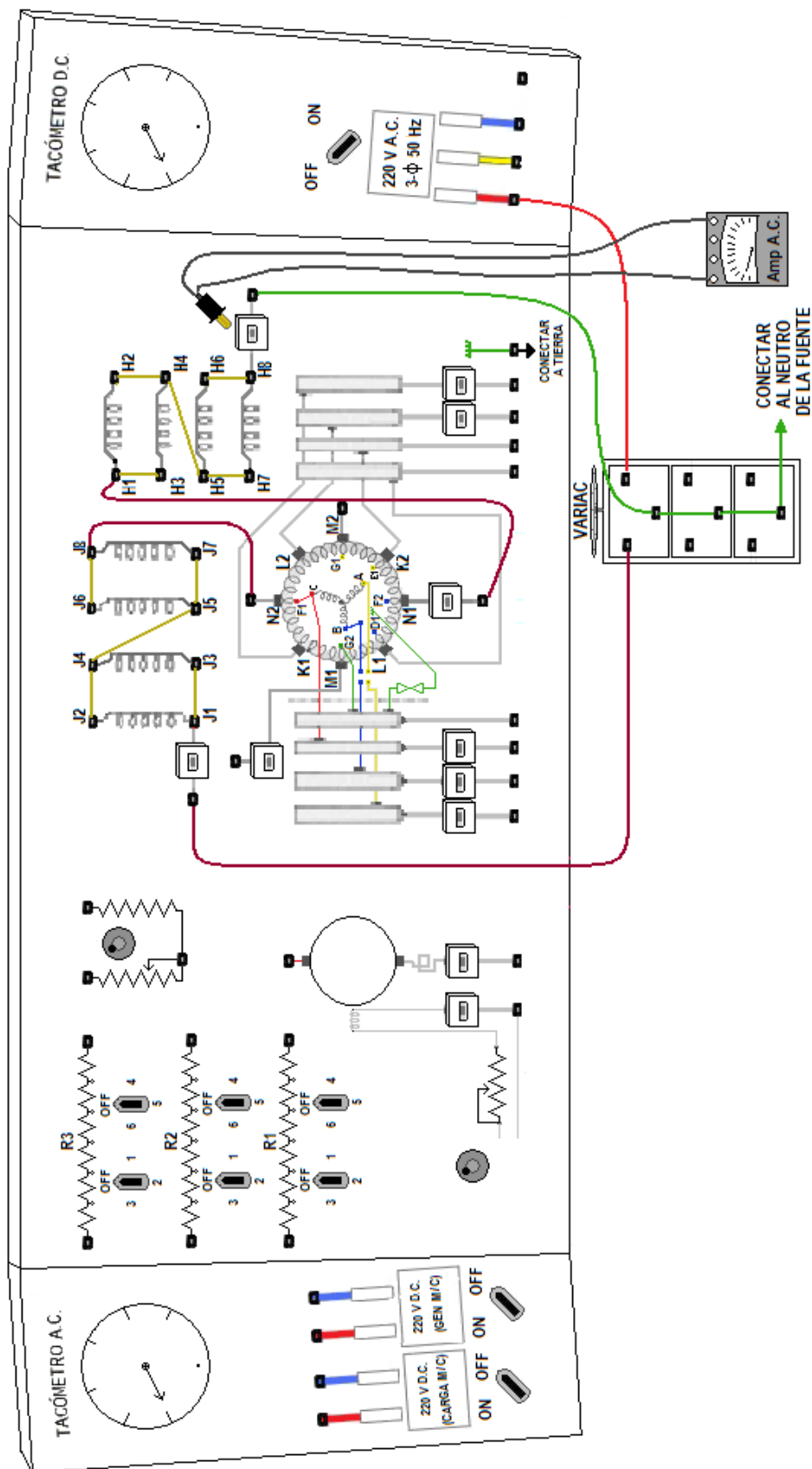


Figura 67. Diagrama de operación como motor universal A.C.

5.7.2. Operación como Convertidor Rotatorio

Se utilizan para la obtención de un suministro de corriente continua a partir de otra corriente alterna o viceversa. Las conexiones adecuadas son como las que se muestran en las figuras 68 ó 69. (Sin embargo, hoy en día los Rectificadores son más convenientes y baratos).

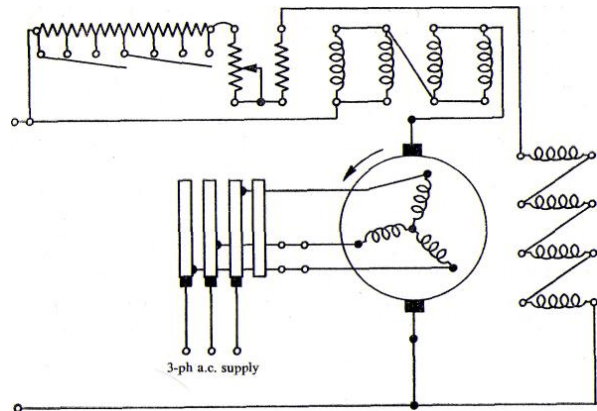


Figura 68. Convertidor rotatorio

Cualquiera de las tomas del devanado trifásico conectado en estrella, o de las 3 fases en el devanado cerrado (obtenidas al colocar la posición 1 del disco del rotor), puede ser alimentado desde la relación variable trifásica del autotransformador (variac) en el voltaje apropiado para cada uno, pero bajo esta configuración es necesario hacer un arranque suave o se correrá con el riesgo de embalar la maquina.

La máquina bien puede iniciarse desde el lado de corriente continua como un motor en derivación (shunt), usando uno de los bancos de resistencia como un motor de arranque en serie con el inducido y las mediciones pueden realizarse con un multímetro digital en las tomas dispuestas para ello.

Para el convertidor rotativo es necesario iniciar con baja tensión, y además, obligatoriamente se debe colocar una resistencia de arranque (reóstato de 10,5 ohm) en serie con la armadura para aumentar el par de arranque como se puede ver en la figura del diagrama 69.

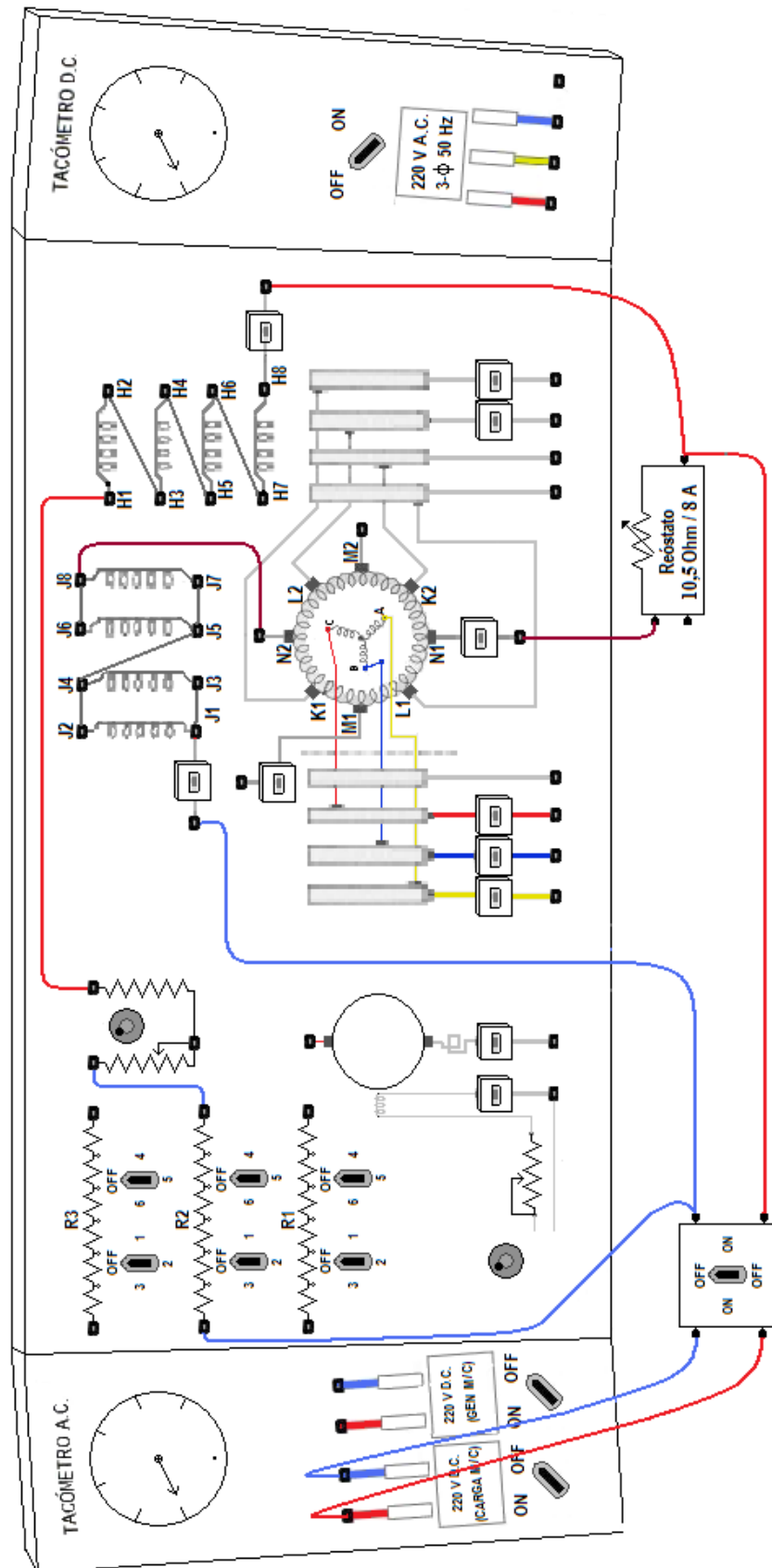


Figura 69. Diagrama de operación como convertidor rotatorio.

5.8. Diagnóstico de la Máquina Generalizada Operando como Máquinas que Trabajan en D.C. y en A.C.

5.8.1. Diagnóstico como Motor Universal en D.C. y en A.C.

En el caso de la operación de la máquina generalizada como un motor universal en D.C. como se muestra en el diagrama de la figura 66, se levantaron las cuatro escobillas alternativas que no serían usadas ubicadas en el engranaje del motor de escobillas.

Para verificar su buen funcionamiento se fue elevando la tensión lentamente hasta llegar aproximadamente a los 40V con la que se obtuvo 1200 rpm en la máquina, notando que al variar la tensión de entrada variaba la velocidad. Durante el proceso, no se presentaron ruidos o perturbaciones en la máquina mientras se estaba operando y se podían registrar, con los equipos apropiados, los valores de tensión y corriente en todas las partes de la máquina donde se tenía el acceso para las mismas por medio de las tomas dispuestas para esto en el panel de control.

Por otra parte, cuando se operó como un motor universal en A.C. se conectó la máquina generalizada como se muestra en el diagrama 67, la alimentación monofásica aplicada se fue incrementando lentamente hasta llegar a los 53V aproximadamente para alcanzar las mismas 1200 rpm.

En esta configuración tampoco se observaron perturbaciones ni problemas con el conjunto por lo que se llegó a la conclusión que bajo este modo de operación, ya sea en D.C. o en A.C. el funcionamiento es el óptimo y se puede hacer cualquier práctica en cualquiera de las configuraciones ya mencionadas.

5.8.2. Diagnóstico como Convertidor Rotativo

En el caso de la operación como Convertidor Rotativo tampoco se tuvieron inconvenientes y se pudo observar la conversión al alimentar el arreglo con una entrada D.C. y obtener una salida A.C. También se verificó que se podía hacer esta conversión en el sentido inverso, logrando nuevamente un resultado satisfactorio.

CAPITULO VI

6. PROPUESTAS DE ESQUEMAS DE ADQUISICIÓN Y REGISTRO DE VARIABLES PARA LA MÁQUINA GENERALIZADA

A groso modo, se entiende por “Adquisición de Datos” a la acción de medir variables, convertirlas a formato digital, almacenarlas en un computador y procesarlas en cualquier sentido. En nuestro caso, para este proceso es necesaria una "interface" que transforme y transmita un conjunto de señales como tensiones, corrientes, velocidades y par, de manera tal, que se pueda interpretar o analizar lo que sucede entre el mundo físico de las diferentes configuraciones posibles de la máquina generalizada, y un computador. Estos equipos especialmente diseñados para la adquisición y registro de datos suelen ser una tarjeta de adquisición ó un osciloscopio digital con tales funciones.

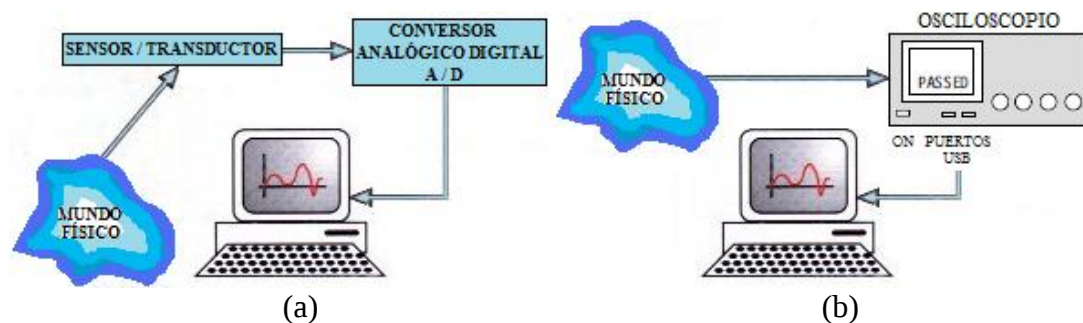


Figura 70. Adquisición de datos

Los procesos para registrar datos del mundo físico que vemos en la figura 70 (a) y (b), muestran un diagrama conceptual de la adquisición de datos, en el cual se sintetizan los siguientes pasos fundamentales:

- Utilización de un sensor/transductor adecuado para la variable que se desea medir, el cual permite detectar y convertir la variable física a una señal analógica de voltaje o corriente eléctrica.
- Traducción de esta señal analógica al lenguaje propio del computador (lenguaje digital). Proceso que se conoce técnicamente como una conversión ANALOGO / DIGITAL (A/D).

- c) Adquisición propiamente dicha de los datos que, en forma digital, podrán ser almacenados en la memoria de la computadora, mostrarlos en la pantalla, imprimirse o simplemente enviarse por correo electrónico.

El Mundo Físico:

En las máquinas eléctricas rotativas existen muchos parámetros que pueden ser analizados con el fin de entender su comportamiento. Sin embargo, las principales variables que caracterizan su rendimiento son las relacionadas con la potencia de entrada y salida de la máquina, y a su vez, las variables relacionadas con estas como la tensión, la corriente, el par y la velocidad. Por lo tanto, estas se definen como las variables a monitorear, teniendo en cuenta que la máquina puede conectarse en sus distintas configuraciones sin realizar modificaciones en su parte constructiva.

En este punto, se debe decir que el conjunto de la máquina generalizada posee ciertos atributos que no tienen otras máquinas existentes en el laboratorio, y que pueden ser aprovechados al máximo a la hora de hacer mediciones, adquirir y registrar los diferentes datos que se quieran estudiar.

La principal ventaja es que en el panel de control y operaciones, se tiene acceso a diversos elementos de las distintas máquinas que componen el conjunto, pero además, también tiene las tomas de accesos a varios dispositivos, como los tacómetros generadores D.C. y A.C. y el torquímetro, dispuestos para la fácil observación del comportamiento de la máquina sin tener que llegar a tocarlas directamente lo que representa una gran ventaja tanto en temas de seguridad, como de enseñanza e incluso en el aspecto económico al no tener que contar con equipos adicionales para medir el par o la velocidad.

La Selección de los Sensores:

Un sistema de adquisición de datos para monitorear las variables mecánicas y eléctricas en el conjunto de la máquina generalizada, consiste en la implementación de sensores adecuados que capturen señales como tensión, corriente, par y velocidad, con el fin de ser enviadas a una computadora, para observar así su comportamiento y relación entre sí en los diversos modos de operación presentados en este proyecto.

En la selección de los sensores a implementar se deben tomar en cuenta los rangos de operación de la máquina, costo y disponibilidad en el laboratorio. Un ejemplo de algunos sensores que pueden ser elegidos, son los que se muestran en la tabla 7 junto con sus rangos de medida y relación para adquirir los datos que se deseen estudiar.

Tabla 7. Selección de Sensores

Variables	Sensor	Rango de Medidas	Relación
Tensión	Puntas Atenuadas	0 – 500 V	x100
Corriente	Sensor de Efecto Hall	0 – 50 A	5mV/A
	Puntas de Corriente Tektronix	15 A DC + Pico AC	Hasta 50 A Picos Pulsantes
Par	Torquímetro Tipo MTM3	0 – 15 lbf.ft	0 – 20,3445 Nm
Velocidad	Tacómetro Generador D.C.	0 – 2500 rpm	-
	Tacómetro Generador A.C.	0 – 2500 rpm	-

Es importante destacar que las puntas de corriente especificadas en la tabla 7, al combinarlas con un osciloscopio Tektronix, ya sea el modelo existente en el laboratorio o el propuesto en este proyecto, que se verán más adelante, le permiten al usuario hacer mediciones directas de corriente DC y AC directamente en la pantalla del osciloscopio, mostrando el resultado sin hacer cálculos adicionales de escalas o conversiones en la medición y guardarlo en un diskette como en el caso del osciloscopio existente en el laboratorio, ó en una memoria extraíble con puerto USB como en el caso del osciloscopio que se propone más adelante, para luego ser visto y analizado en cualquier computadora que acepte estos dispositivos, por medio de programas como por ejemplo Mathcad o Excel.

Dicho todo esto se concluye entonces que todo sistema de adquisición de datos, es básicamente una herramienta de laboratorio que permite la visualización y el análisis del comportamiento que no solo puede ser utilizado para este conjunto en estudio, sino para cualquier máquina eléctrica rotativa, promoviendo formas alternativas en los procesos de enseñanza, tanto en esta área como en ámbitos como la programación e instrumentación.

Entre las distintas e infinitas opciones posibles, aquí se proponen tres alternativas para la adquisición y registro de datos y variables en estudio que son:

6.1. Adquisición y Registro de Variables con Osciloscopio de fósforo Digital

Disponible en el Laboratorio

Una forma de adquirir y registrar datos, es por medio de un osciloscopio de fósforo digital marca Tektronix de la serie TDS3000 modelo TDS3012, que se muestra en la figura 71, el cual cuenta de dos canales, un ancho de banda de 100 MHz, ya disponible en el laboratorio y

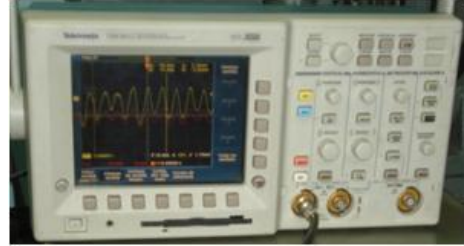


Figura 71. Tektronix TDS3012

con el cual se pueden capturar todas las señales obtenidas del estudio que se esté realizando, por medio de las múltiples funciones con las cuales este equipo dispone.

Aunque la mejor manera de entender este osciloscopio es consultar el manual del usuario, es importante mencionar algunas de las características más relevantes para la adquisición y registro de variables y señales, que forman parte de las bondades de este equipo, y así, entender mejor como utilizar sus beneficios. Entre algunos de ellos se pueden nombrar los siguientes:

Separate Digitizers (Digitalizadores separados): Aseguran mediciones precisas de tiempo con digitalizadores separados para cada canal. Cada digitalizador puede adquirir datos en todos los canales.

Normal Acquisition (Adquisición Normal): Adquirir 10.000 formas de onda de punto, capturar detalle horizontal y luego utilizar la función de zoom para analizar al detalle.

Fast Trigger Acquisition (Adquisición de disparo rápido): Adquirir hasta 3.000 formas de onda por segundo ver rápidamente cambiante señales o irregularidades intermitentes de la señal.

Pretrigger (Predisparo): Puede capturar señales que ocurren antes del punto de disparo. Además se puede situar un punto de disparo al comienzo de la adquisición, al final, o en cualquier lugar en el medio.

Delay (Retraso): Se utiliza cuando se quiere adquirir la señal en un tiempo específico después del punto de disparo.

Funciones de medición

Cursors (Cursores): Se Utilizan para tomar el valor de tensión, el tiempo, y mediciones de frecuencia.

Automatic Measurements (Las mediciones automáticas): Elige entre una lista de 21 medidas de forma de onda automáticas. Puede personalizar las mediciones mediante el cambio de los niveles de referencia.

Características de disparo (Trigger)

Triggers doble (Doble Disparo): Utilice el principal (A) sistema de disparo solo o añadir el gatillo B para capturar eventos más complejos.

Vídeo Trigger (Video de Disparo): Disparar en campos o líneas de vídeo para ver una presentación estable de señales de vídeo estándar.

Vídeo Quick Menu (Menu de video Rapido). Muestra un menú inferior y lateral que contiene las funciones de vídeo para visualizar y medir formas de onda de emisión estándar, incluyendo fuente de disparo, cuando para disparar, la retícula de vídeo y configuración automática de vídeo.

Vídeo Autoset (Autoajuste de Video). Disponible en el menú rápido de vídeo y en el de adquisición. Ajusta automáticamente la configuración de disparo vertical, horizontal y de vídeo para mostrar una forma de onda de vídeo activa en todas las líneas y campos.

Características de Conveniencia:

Autoset (Autoajuste): Se utiliza para configurar rápidamente los controles verticales, horizontales y de disparo.

Quick Menu (menú rápido): Se utiliza para un funcionamiento del osciloscopio simplificado.

Single sequence (Secuencia Unica): Establece los parámetros de disparo para una adquisición de disparo único (o una sola secuencia de adquisición).

Floppy Disk (Disco Flexible): Utilice el disco incorporado para almacenar y recuperar formas de onda y configuraciones, así como actualizar las formas de onda del osciloscopio e instale nuevas características.

Support Probe (Sonda de Apoyo): Utilice las sondas o elegir una sonda estándar o una punta de corriente específica opcional para cada aplicación.

Características Procesamiento de Señales:

Average (Promedio): Aplicar un promedio de la señal para eliminar el ruido no correlacionado y mejorar la precisión de la medición.

Envelope (Envolvente): El uso de sobres para capturar y mostrar la variación máxima de la señal.

Waveform Math (Matemáticas de Forma de Onda): Usar las matemáticas de forma de onda para sumar, restar, multiplicar o dividir las formas de onda. Por ejemplo, puede utilizar las matemáticas para analizar señales diferenciales o calcular una forma de onda de corriente.

6.2. Adquisición y Registro de Variables con Osciloscopio de Fosforo Digital con Puerto USB.

Como segunda opción para la adquisición y registro de datos y variables se propone adquirir el osciloscopio Tektronix MSO2014B de 100 MHz y 4 canales analógicos, mostrado en la figura 72, puesto que no existe ninguno de este tipo actualmente en el laboratorio, pero que es muy recomendable, dado que por ser de la misma línea de fabricantes Tektronix que el modelo anterior TDS3012 tratado en el punto 6.1, no representará ningún problema en la operación del mismo a pesar de ser más avanzado tecnológicamente hablando, ya que sus características son prácticamente iguales a las ya señaladas para el modelo anterior pero ofrece mayores beneficios como los que se mencionan a continuación en la tabla 8:



Figura 72. Tektronix MSO2014B

Tabla 8. Características del Osciloscopio Tektronix MSO2014B

Especificaciones del Osciloscopio	Funciones fáciles de usar
100 Hz de ancho de banda	Controles Wave Inspector proporcionan una búsqueda automática de los datos de forma de onda
4 canales analógicos	FilterVu™ Variable ; Filtro pasa bajo que elimina ruidos sin dejar de reflejar eventos de alta frecuencia.
16 canales digitales (MSO Serie)	Pantalla ancha TFT-LCD de color.
1 GS / s de frecuencia de muestreo en todos los canales	Disparo automático, decodificación y búsqueda en buses paralelos
5000 WFM / s Velocidad máxima de captura de forma de onda	Multicanal; establecimiento y retención Disparo
Juego de Triggers avanzado	

Además de estas características, este equipo cuenta con un puerto USB 2.0 Host en el panel frontal para almacenamiento de datos rápida y fácil y un puerto USB 2.0 en el panel posterior del dispositivo para facilitar la conexión a un PC o impresión directa a una impresora compatible. También cuenta con un puerto opcional 10/100 Ethernet para conexión de red y puerto de salida de vídeo para exportar la pantalla del osciloscopio a un monitor o proyector

Para la adquisición de datos, y el análisis de las señales, este equipo cuenta con las aplicaciones de software NI LabVIEW SignalExpress™ Edición Tektronix que ofrece más de 200 funciones incorporadas, incluyendo el tiempo y el análisis de dominio de frecuencia, pruebas de límites, registro de datos y reportes personalizables; el Open Choice Desktop que permite una comunicación rápida y sencilla entre el osciloscopio y la computadora, a través de USB, GPIB o LAN para transferir configuraciones, formas de onda e imágenes de pantalla; Microsoft Excel y barras de herramientas de Word para permitir la comunicación directa rápida y fácil con la PC.

Con estas funciones incorporadas a este osciloscopio es entonces muy fácil adquirir al instante, generar, comparar, importar y guardar los datos de medición y las señales sin ser necesario ningún tipo de programación especial o adicional.

6.3. Diseño de Tarjeta para la Adquisición y Registro de Variables.

Como ya se sabe, con las pruebas convencionales de laboratorio, en algunos casos es posible llegar a determinar de manera parcial y discreta el comportamiento de la máquina generalizada. Sin embargo, con el sistema que se presenta, se pueden integrar diversos recursos para controlar y monitorear diferentes variables de un proceso, los cuales se conocen genéricamente como sistemas de adquisición de datos o simplemente por sus iniciales como SAD.

Una forma muy útil para entender los SAD resulta si descomponemos el esquema general en varias etapas para su implementación de la siguiente manera:

1^{ra} Etapa: Determinar las variables del proceso que contiene la información requerida para el análisis y el tipo de transductores adecuados (Mundo Físico).

2^{da} Etapa: Acondicionamiento de las variables, con el propósito de convertirlas en señales que se adecúen a las especificaciones del SAD.

3^{ra} Etapa: Cuantificación y conversión de las señales adquiridas en un código digital equivalente, para enviarlas a un ordenador mediante un protocolo de comunicación.

4^{ta} Etapa: Utilización de un software especializado, con el fin de procesar los datos equivalentes a las variables registradas para su manipulación, de acuerdo con la aplicación específica del SAD (Madcad, Excel, LabVIEW, etc.).

En el mercado existen tarjetas comerciales como por ejemplo las U1056B que permiten generar un sistema de adquisición de datos completo con una combinación de PXI y Compact PCI (cPCI) de alta velocidad módulos convertidores de datos. Cada sistema incluye una selección de interfaces de PC o computadoras de placa única incrustada, con cajones y software para crear un sistema llave en mano con un máximo de 80 canales de adquisición digitalizador.

Sin embargo, debido al elevado costo que implica un SAD de este tipo, además que para su implementación se debe contar con hardware de adquisición de datos comerciales que digitalicen y cuantifiquen las señales capturadas, en este proyecto se

presenta una alternativa de bajo costo para monitorear las variables eléctricas y mecánicas de la máquina generalizada, en sus diferentes formas de conexión, con el fin de promover un proceso de enseñanza más profundo en las áreas de máquinas eléctricas rotativas.

Esta alternativa, puede ser la construcción de una tarjeta de adquisición de datos de bajo costo y características constructivas simples gracias al desarrollo de los microcontroladores que permiten la comunicación con el ordenador, memoria, conversión AD y DA, puertos, relojes, etc. Algunos fabricantes como Microchip han desarrollado incluso librerías que admiten la comunicación de tipo USB entre los microcontroladores y el PC, como la familia PIC18FXX5X, que logran discretizar las variables a monitorear en datos de 8 bits, obteniendo un código digital equivalente y almacenándolos en paquetes de 64 bytes para ser enviados al PC.

Además, la utilización de estos microcontroladores como tarjeta de adquisición de datos resulta útil para monitorear y controlar sistemas o procesos de forma sencilla y económica, debido a que estos equipos son altamente comerciales. Además el soporte ofrecido en los portales de Internet por los fabricantes, y en general en la red, es de gran utilidad brindando información referente a su programación, ejemplos de aplicación y últimas actualizaciones.

Sin embargo, es importante resaltar que de construir esta tarjeta, es necesario para la digitalización de las señales establecer un rango de variación entre 0 y 5 V, dada la alimentación requerida por el microcontrolador y las características el sistema de adquisición. Esto se puede hacer, por ejemplo, implementando en cada señal dos ajustes por medio de resistencias variables (*trimmer*) ó de amplificadores operacionales (uno suma o resta un nivel de tensión para fijar la señal en cero y el otro permite variar la ganancia para que la señal de salida tenga un rango de 0 a 5 V).

Entonces, los datos adquiridos de las posibles variables capturadas se deben relacionar con esta tensión del microcontrolador (5V); y luego ser llevados al valor equivalente de la variable que se está observando. Con el acondicionamiento de los sensores especificados, y con la conversión análogo-digital a 8 bits, se debe

especificar para cada señal el rango de medida definido, la resolución obtenida y la constante de proporcionalidad entre la tensión de entrada del microcontrolador y la variable capturada, como por ejemplo la mostrada en la tabla 9.

Tabla 9. Ejemplo de acondicionamiento de valores para observarlos en la PC.

Señal	Rango de Medidas	Resolución	Constante de Proporcionalidad
Tensión	0 – 260 V	1,2 V	52
Corriente	0 – 50 A	0,05 A	3 A/V
Par	0 – 30 Nm	0,05 Nm	0,557
Velocidad	0 – 2500 rpm	18	800 rpm/V

En cuanto al software para la adquisición también se puede utilizar la herramienta LabVIEW, la cual cuenta con funciones optimizadas para la adquisición de datos. Además maneja programación mediante un lenguaje gráfico que simplifica la manipulación de los datos y ofrece un entorno de visualización amigable.

Puesto que un objetivo de este trabajo es brindar una herramienta que promueva formas alternativas en los procesos de enseñanza que permitan determinar diversos parámetros de operación de la máquina tales como potencia eléctrica y mecánica, pérdidas de potencia y eficiencia. La tabla 10 resume las relaciones que pueden ser utilizadas entre las variables para el cálculo de estos parámetros.

Tabla 10. Relaciones entre las variables en estudio

Parámetros	Relación
Potencia absorbida	$P_{elec} = V.I$
Potencia útil	$P_U = T.n$
Perdidas de Potencia	$P_{per} = P_{in} - P_{out}$
Rendimiento	$\eta = (P_{out} / P_{in}) \cdot 100\%$

Ec [19]

Ec [20]

Ec [21]

Ec [22]

Este programa permite realizar diferentes gráficas de las variables adquiridas, así como entre las variables y los parámetros nombrados anteriormente, con el fin de observar en forma clara la relación existente entre estos, permitiendo además realizar la comparación del comportamiento de la máquina en sus diversas formas de conexión.

CAPITULO VII

7. PROPOSICIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

7.1. Practica 1. Maquina D.C. con excitación en paralelo

OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

El objetivo fundamental de la práctica es que el alumno se familiarice con los conceptos básicos relacionados a la máquina D.C., así como con la realización de algunos ensayos comunes con el conjunto de la máquina generalizada.

Concretamente, se pretende dar una idea general del funcionamiento de este equipo y que el alumno obtenga conocimientos en cuanto al modo de operación, conexión y puesta en servicio de la configuración como máquina D.C. y respuesta de las características de operación en estado permanente, así como en cuanto a la determinación de sus pérdidas, rendimiento, curvas características de funcionamiento.

PRECAUCIONES

Desconectar las escobillas que no serán usadas para evitar desgastes innecesarios de las mismas así como perturbaciones en los experimentos. Para evitar deterioros o averías de los instrumentos y equipos, **el alumno no debe accionarlos por ningún motivo, sin la aprobación previa del profesor**, y se deberá comprobar que la máquina gire en sentido antihorario si se ve el conjunto desde la máquina de carga para realizar cualquier experimento.

MEDICIÓN DE RESISTENCIAS

Se procederá a medir las resistencias del devanado cerrado del rotor (inducido), y del devanado en cuadratura del estator (inductor), de forma indirecta, es decir, se conocerán las resistencias de los devanados de la máquina generalizada, R_i y R_e respectivamente.

Para ello, la prueba se efectuará con la máquina en reposo, a temperatura ambiente (26°C) y aplicando una corriente menor al 10% de la nominal ($I_{iN}=45\text{A}$, $I_{eN}=27\text{A}$) para minimizar el efecto de calentamiento como condiciones del ensayo.

Tabla 11. Tabla propuesta registrar la medición de resistencias.

Ri (Ω)		Re (Ω)	
Vr (mV)	Ir (A)	Ve (V)	Ie (A)
	4,5		2,7

Donde el valor de las resistencias en cada medición, estará determinada por:

$$Rl = \left(\frac{V_{dc}}{I_{dc}} \right) \quad \text{Ec [23]}$$

Sin embargo se deberá realizar un promedio y el resultado obtenido será el que se tomará como el valor de la resistencia.

COMPORTAMIENTO COMO GENERADOR

Mediante estos ensayos se pretende ver la característica de funcionamiento de la máquina como generadora de corriente continua. Para ello, se arrastrará mediante el motor de carga D.C. que se encuentra acoplado al eje de la máquina y se alimentará, cuando sea necesario, el inductor de la máquina generalizada con una corriente continua.

Las dos curvas características más importantes de una máquina D.C. actuando como generador son:

a) Característica de Vacío ($E_i = f(I_e)$):

Al ser el flujo por polo (ϕ_p) proporcional a la corriente de inductor (I_e), el valor de la tensión inducida (E_i) será también proporcional, a esa corriente y a la velocidad de giro del rotor, según la expresión:

$$E_i = \frac{PN}{\pi} \omega_m \Phi_p = \frac{2PN}{60} n \Phi_p = K_E \cdot n \Phi_p \quad \text{Ec [24]}$$

Donde P corresponde al número de polos y N al número de espiras

El procedimiento que será utilizado es el establecido por la IEEE Std 113-1985, sección 5.1. “Magnetic Saturation” por lo que se deben cumplir las siguientes condiciones del ensayo.

- El ensayo debe realizarse a temperatura ambiente.
- Velocidad nominal constante (1800 rpm) sin alimentar carga eléctrica alguna
- La corriente del inductor se variará entre 0 y la I_{eN} mediante un reóstato en serie con el bobinado de inductor.

- No sobrepasar 125% tensión nominal.
- Se colocan interruptores de desconexión de la excitación y se energiza y des energiza el circuito antes de comenzar el experimento para asegurar que la curva parta efectivamente desde la tensión debida al magnetismo remanente en los polos.
- Se realizarán las mediciones para una curva de subida sin efectuar retrocesos en cada experiencia a fin de no cometer errores asociados con la histéresis del material ferromagnético. Igualmente para la curva descendente.

Los datos serán tomados en espacios apropiados que permitirán una exactitud de la curva. En la parte lineal pueden ser pasos del orden del 20% de la tensión nominal y alrededor del codo de saturación pasos de 10% de la tensión nominal.

Tabla 12. Tabla de mediciones propuesta para la curva de vacío

Curva ascendente		Curva descendente	
Tensión Inducida (V)	Corriente de excitación (A)	Tensión Inducida (V)	Corriente de excitación (A)
Tensión Remanente	0		
		Tensión Remanente	0

b) Característica de Salida o Regulación ($V=f(I)$):

Mediante esta curva característica se trata de ver cómo varía la tensión proporcionada por el generador en función de la carga eléctrica alimentada (o la corriente de salida del generador). Es, en realidad, la regulación del generador; es decir, la caída de tensión producida en su funcionamiento.

- El ensayo se realiza a velocidad y corriente de inductor fijas.

En concreto, en esta práctica se van a realizar dos ensayos actuando la máquina como generador. Dichos ensayos son los descritos a continuación.

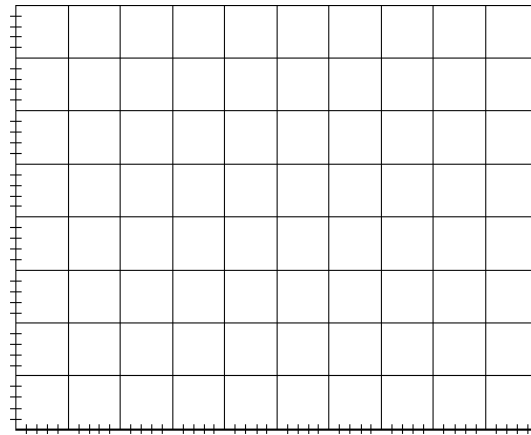
Ensayo 1: Generador en vacío

Se trata de ver cómo, al variar la velocidad de arrastre de la máquina de carga D.C. y por lo tanto, la velocidad de giro del rotor de la máquina generalizada, se genera una tensión D.C. Para ello, basta con arrastrar el generador D.C. para cinco velocidades diferentes y medir la tensión que se genera en la máquina generalizada configurada como

máquina D.C. Se representará la relación que expresa la tensión generada en función de la velocidad de giro.

Tabla 13. Tabla propuesta para la curva E_i vs n

E_i (V)	n (rpm)
	500
	800
	1200
	1500
	1800



Tensión generada en función de la velocidad “ n ”

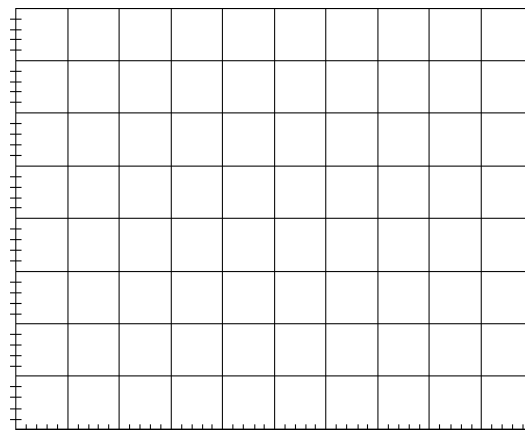
Ensayo 2: Generador con carga:

En este último ensayo como generador se trata de ver la relación existente entre la tensión suministrada por el generador y la carga eléctrica que se encuentre conectada a la salida del generador.

Este ensayo se realizará con la máquina con excitación en derivación (Shunt) y manteniendo constante la velocidad de giro del conjunto. Se variará únicamente el valor del reóstato que se encuentre conectado, midiendo en cada caso los valores de la tensión generada por la máquina y la intensidad que circula por la carga (mediante un voltímetro y un amperímetro). Posteriormente se dibujará la curva que muestra la relación entre ambas magnitudes.

Tabla 14. Tabla propuesta para la Curva de Carga

V_i (V)	I_i (A)



Curva de Carga (V_i vs I_i)

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO COMO MOTOR

El par electromagnético de un motor de D.C. viene dado por la expresión:

$$T = \frac{pN}{2\pi \cdot f} \Phi_p I_e = K_T I_e \Phi_p \quad \text{Ec [25]}$$

Entonces, se puede decir que el par motor es proporcional a la corriente de inducido cuando el flujo por los polos es constante.

Por otra parte, puesto que $E_i = V - R_i I_i$, si mantenemos el flujo constante la velocidad dependerá linealmente de E_i , ya que:

$$n = \frac{E_i}{K_E \Phi_p} = \frac{V - R_i I_i}{K_E \Phi_p} \quad \text{Ec [26]}$$

Donde n es la velocidad de la máquina en rpm, K_T es la constante del par y K_E la constante de la fuerza electromotriz, aunque realmente son iguales pero es conveniente representarlas por separado ya que los fabricantes suelen dar valores distintos según el sistema de unidades que utilicen.

Entonces si $K_T = K_E$ se puede despejar una de ellas y sustituirla en la otra ecuación dando como resultado una relación del par en función de la velocidad:

$$T = \frac{E_i I_i}{n} = \frac{(V - R_i I_i) I_e}{n} \quad \text{Ec [27]}$$

Además de lo ya mencionado, otras ecuaciones relevantes para el estudio del motor D.C. a considerar son las descritas a continuación:

$$\text{Potencia útil [W]} \quad \left\{ \begin{array}{l} P_u = T \cdot n \\ P_u = P_{AB} - P_{CU} - P_{Fe} - P_{mec} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Ec [28]} \\ \text{Ec [29]} \end{array}$$

$$\text{Potencia Eléctrica Absorbida [W]} \quad P_{AB} = V \cdot I \quad \text{Ec [30]}$$

$$\text{Perdidas por el cobre [W]} \quad P_{CU} = R \cdot I^2 \quad \text{Ec [31]}$$

$$\text{Perdidas por el hierro [W]} \quad P_{Fe} = E^2 / R_{Fe} \quad \text{Ec [32]}$$

$$\text{Rendimiento} \quad \eta = (P_u / P_{AB}) \times 100\% \quad \text{Ec [33]}$$

Las pérdidas mecánicas se puede obtener por medio de la curva $P_0(E^2)$, en el punto de corte con el eje $E^2 = 0$, donde P_0 es la potencia resultante del producto de la tensión por la corriente del inducido, cuando la máquina opera en vacío y E será la tensión caída en la armadura. Con este valor ya se tienen todos los datos para hallar R_{Fe}

Para comprobar el funcionamiento, se energiza y des energiza el circuito antes de comenzar la prueba para asegurar que la curva parta de la tensión remanente y luego se alimentará el motor y se dejará que gire en vacío. Manteniendo constante la tensión de excitación, se procederá a variar la tensión de inducido para cinco casos distintos y se medirán los valores de la intensidad de inducido I_i y velocidad n en cada caso.

Tabla 15. Tabla Propuesta para Mediciones de Laboratorio

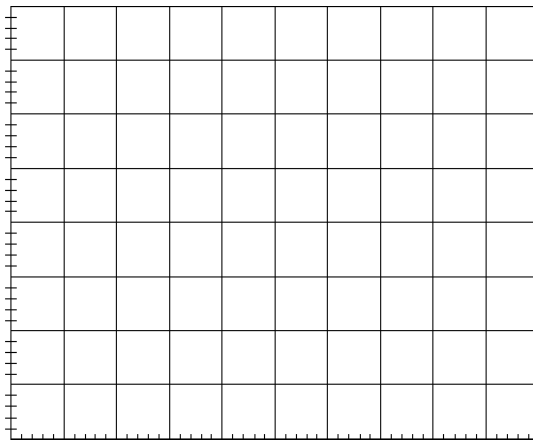
V_e (V)	I_e (A)	E_i (V)	I_i (A)	n (rpm)

Con los datos obtenidos en la práctica calcular las siguientes magnitudes:

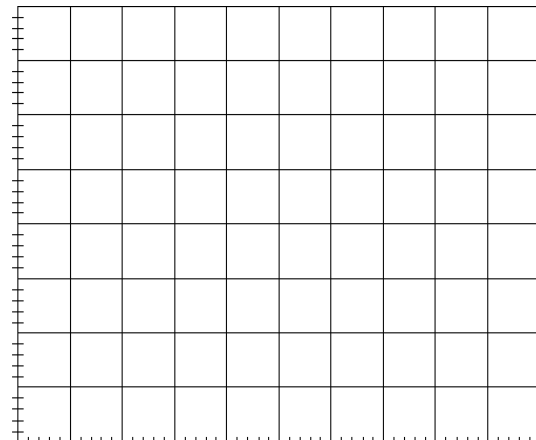
Tabla 16. Tabla propuesta para cálculos teóricos

T (Nm)	P_u (W)	P_{mec} (W)	η

Una vez obtenidos estos valores proceda a representar “ T_u ” en función de “ I_i ” y “ n ” en función de “ V_i ” en diferentes gráficas.



Par en función de la corriente generada



Velocidad n (rpm) en función de V_i

Realice un análisis de cada una de las gráficas realizadas tanto para la configuración como motor y como generador.

7.2. Practica 2. Máquina de Inducción Trifásica.

OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

El objetivo fundamental de la práctica es que el alumno se familiarice con los conceptos básicos relacionados con la máquina de inducción, así como con la realización de algunos ensayos comunes con el conjunto de la máquina generalizada.

Concretamente, se pretende dar una idea general del funcionamiento de este equipo y que el alumno sea capaz de determinar las curvas más características que definen su modo de trabajo, determinando el comportamiento que experimentan.

PRECAUCIONES

Levantar todas las escobillas, excepto la de los anillos colectores. Ajuste el disco del rotor en la posición 2, para habilitar el devanado conectado en estrella del rotor. Conecte la máquina como se indica en el diagrama 56, ajustando el variac, para un voltaje de salida cero. Antes de realizar cualquier experimento comprobar que la máquina gire en sentido antihorario si se ve el conjunto desde la máquina de carga.

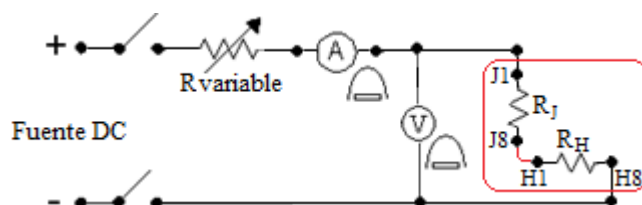
MEDICIÓN DE RESISTENCIAS

Condiciones del ensayo

- Realizar el ensayo solo en caso de que la máquina estuviese en reposo durante varias horas, de tal forma que los arrollados se encuentren a la temperatura ambiente.
- La prueba a aplicar se denomina ensayo DC (método del voltímetro - amperímetro).
- La corriente no debe exceder el 10% del valor nominal, para evitar el sobrecalentamiento por efecto joule.

Ensayo 1: Determinación de la resistencia estatórica:

Por medio del montaje representado en la figura 73, realizar los siguientes pasos:



Donde: $R_j = R_H$

y además $R_j + R_H = R_1$

siendo R_1 la resistencia estatórica

Figura 73. Diagrama circuital para la medición de la resistencia estatórica

Paso 1: Aplicar una tensión DC a los devanados del estator conectados en serie del motor de inducción.

Puesto que la corriente aplicada es DC, no habrá un voltaje inducido en el rotor y en este no fluirá una corriente resultante, por lo que lo único que limitará la corriente será la resistencia estatórica.

Paso 2: Registrar al menos tres valores de tensión y corriente presentes en los devanados del estator conectados en serie como se sugiere en la siguiente tabla de mediciones:

Tabla 17. Segunda tabla propuesta para la medición de la resistencia estatórica

Bobina J	# Medición	Voltaje (V)	Corriente (A)
bornes J1-H8	1		
	2		
	3		

Entonces como se puede deducir de la figura 73, el valor de la resistencia estatórica conectada en serie en cada medición, estará determinada por:

$$R1 = \left(\frac{V_{dc}}{I_{dc}} \right) \quad \text{Ec [34]}$$

Sin embargo se deberá realizar un promedio y el resultado obtenido será el que se tomará como el valor de la resistencia estatórica.

Ensayo 2: Determinación de la resistencia rotórica:

Por medio del montaje representado en la figura 74, realizar los siguientes pasos:

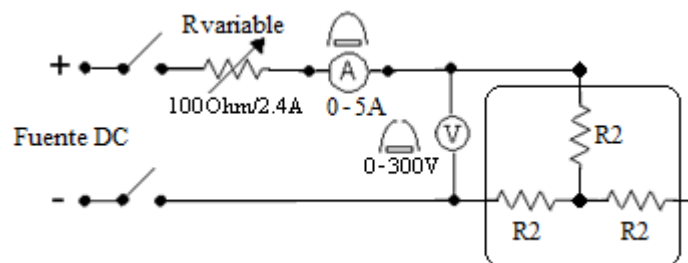


Figura 74. Diagrama circuital para la medición de la resistencia rotórica

Paso 1: Aplicar una tensión DC a los devanados del rotor conectados en estrella del motor de inducción.

Puesto que no habrá tensiones inducidas la única cantidad que limitará el flujo de corriente será la resistencia rotórica.

Paso 2: Registrar al menos tres valores de tensión y corriente para cada devanado del rotor conectados en estrella para poder obtener un valor promedio de la resistencia, tal y como se sugiere en la siguiente tabla de mediciones:

Tabla 18. Segunda tabla propuesta para la medición de la resistencia rotórica

Bobina J	# Medición	Voltaje (V)	Corriente (A)
bornes A-B	1		
	2		
	3		
bornes B-C	1		
	2		
	3		
bornes A-C	1		
	2		
	3		

Entonces como se puede deducir de la figura 74 para la conexión en estrella, el valor de la resistencia rotórica de cada medición estará determinada por:

$$R_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{dc}}{I_{dc}} \right) \quad \text{Ec [35]}$$

Sin embargo se deberá realizar un promedio y el resultado obtenido será el que se tomará como el valor de la resistencia rotórica.

Ensayo 3: Determinación de la reactancia mutua o de magnetización X_m y de la resistencia de pérdidas en el hierro R_{fe}

En un motor de inducción, la prueba de vacío mide las pérdidas rotacionales del motor y suministra información sobre su corriente de magnetización. El diagrama circuital es el mostrado en la figura 75. En este ensayo, la única carga que tendrá el motor será su rozamiento propio y el relacionado con el aire, por lo tanto la potencia consumida serán aproximadamente las pérdidas mecánicas.

Para determinar estos parámetros se realiza un ensayo conocido como **prueba de vacío** con la cual se podrá conocer las pérdidas $P_{2,0}$ y la corriente $I_{2,0}$ a tensión nominal, con la maquina funcionando sin carga, el estator cortocircuitado y girando a una velocidad cercana al sincronismo tal que $s \approx 0$.

Condiciones del ensayo

- Motor girando en vacío, es decir sin carga mecánica acoplada al eje.
- Tensión de alimentación variable (desde el valor nominal e ir disminuyendo).
- Dado que la corriente de arranque supera notablemente a la nominal se deben colocar los amperímetros después de que la máquina empiece a girar para evitar daños en los equipos.

Por medio del montaje representado en la figura 75, realizar los siguientes pasos:

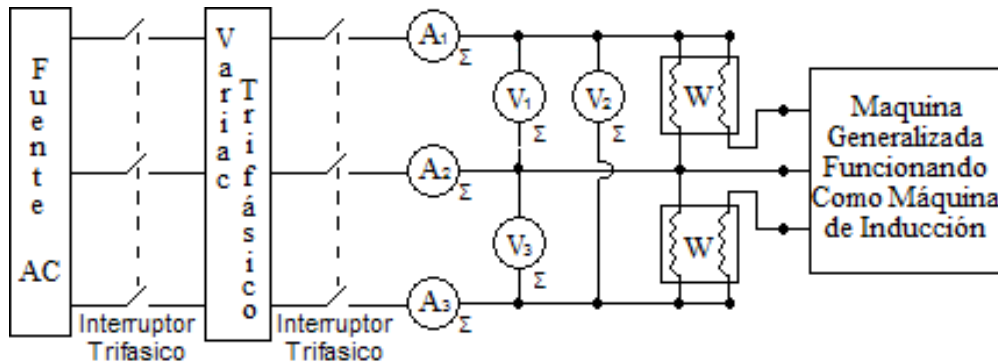


Figura 75. Diagrama circuital para determinar X_m y R_{fe}

Paso 1: Aplicar una tensión A.C. a los devanados del rotor conectados en estrella del motor de inducción por medio del autotransformador trifásico (variac), y suministrar dicha tensión de forma gradual pero constante. Cuando la máquina inicie el movimiento, comprobar que el giro sea en sentido antihorario viendo el conjunto desde la máquina de carga, de no ser así, se desconectar con el interruptor trifásico, llevar el variac a cero voltios e intercambiar dos de las fases para corregir el sentido de giro.

Paso 2: Una vez la máquina arranque, ajustar la alimentación a la tensión nominal y registrar los valores de tensión corriente y potencia en ese punto de operación para cada devanado del rotor conectado en estrella. Luego disminuir gradualmente la tensión nominal en pasos donde se noten cambios apreciables de potencia, a fin de poder calcular las pérdidas mecánicas (**teniendo en cuenta que la corriente también disminuya en cada cambio y que en caso de ocurrir un incremento de misma, se debe detener el ensayo**), Registre todos los parámetros en cada medición como por ejemplo se sugiere en la tabla:

IMPORTANTE:

Si se observa que la corriente se incrementa hay que detener la prueba porque la maquina puede colapsar. Este efecto corresponde a un compromiso de potencia propio de la máquina de inducción, dado que el rotor gira a una velocidad impuesta por el par y para que esta sea constante, el par mecánico debe ser igual al par electromagnético (ya que en régimen permanente, no existe aceleración); entonces, al disminuir la tensión, la potencia es disminuida por lo que el par electromagnético también, pero al mismo tiempo, la maquina busca equilibrar el sistema a fin de que no se acelere o desacelere, y es entonces como aumenta la corriente y por tanto, si se obliga a la maquina a mantener un régimen de tensión disminuido se corre el riesgo de que los niveles de corriente produzcan daños a los arrollados. Por ello, en el momento en que la corriente responda a un incremento abrupto ante la disminución de la tensión, se debe parar el ensayo

Tabla 19. Tabla propuesta para las mediciones para determinar X_m y R_{fe}

V1(V)	V2(V)	V3(V)	I1(A)	I2(A)	I3(A)	W1(W)	W2(W)

Ensayo 4: Determinación de la reactancia rotórica de dispersión X_2 .

Es necesario conocer las perdidas $P_{2,cc}$ y la tensión $V_{2,cc}$ a un valor de corriente rotórica $I_{2,cc}$ con el arrollado estatórico cortocircuitado y $s=1$. Para ello se realiza el ensayo de rotor trabado donde el rotor de la maquina se bloquea para que no se mueva y se aplica una tensión menor que la nominal.

Condiciones del ensayo

- Máquina Generalizada trabajando como motor.
- El rotor debe estar trabado mecánicamente.
- Tensión de alimentación reducida.
- Corriente nominal en el rotor

Entonces, por medio del mismo montaje representado en la figura 75, pero con el rotor trabado se deben realizar los siguientes pasos:

Paso 1: Trabajar mecánicamente el rotor con el dispositivo de enclavamiento dispuesto en el conjunto de la máquina generalizada.

Paso 2: Aplicar tensión A.C. por medio del autotransformador trifásico (variac), a los devanados del rotor, hasta que se obtengan lecturas de corriente nominal rotórica ($I_n = 14A$ ó cercana a ella pero por debajo), para asegurar la tensión reducida.

Paso 3: Registre los valores correspondientes a tensiones, corrientes y potencias en un tiempo estimado de 12 segundos (normas IEEE), como por ejemplo se sugiere en la siguiente tabla de mediciones:

Tabla 20. Tabla propuesta para la medición de variables.

V1	V1	V3	I1	I2	I3	W1	W2

Ensayo 5: Prueba de deslizamiento de la máquina funcionando como motor de inducción para diferentes condiciones de carga:

En esta prueba se tomarán mediciones de las corrientes de línea, voltaje de línea y potencia para la máquina trabajando como motor bajo carga. El esquema circuital es el que se muestra en la figura 76.

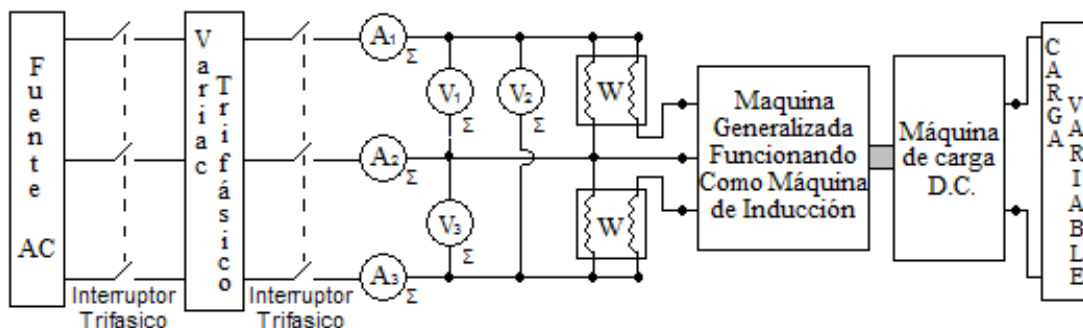


Figura 76. Máquina generalizada funcionando como motor.

Paso 1: Acoplar al eje de la máquina generalizada trabajando como motor de inducción, la máquina de carga D.C. como generador Shunt, para alimentar el banco de resistencias integrado al conjunto por medio del panel de control como se indica en la figura 77, y así poder hacerle un estudio a la maquina cuando tiene conectada una carga.

Recuerde que en un generador Shunt al operar en vacío se debe tener el reóstato de campo al máximo valor, e ir disminuyéndolo gradualmente para lograr un aumento

en la corriente de campo I_{exc} , la cual incrementa el flujo Φ interno de la maquina y que a su vez la tensión de armadura (E_A) lo que origina un aumento de tensión en los terminales del generador.

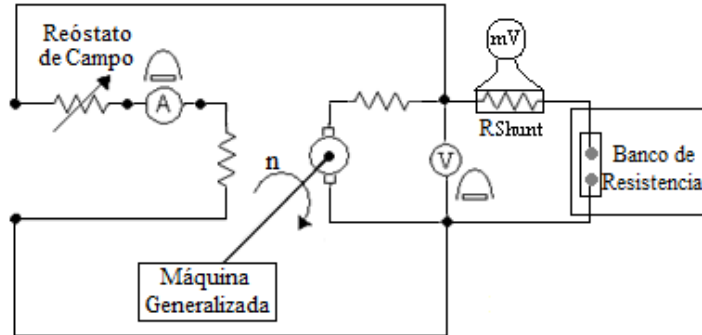


Figura 77. Diagrama circuital para el generador Shunt.

Paso 2: Con todos los elementos ya conectados como se indica en el diagrama circuital mostrado en la figura 76, alimente la máquina generalizada, ajuste su velocidad a 1200 rpm, y proceda a variar la carga incrementando su valor desde cero. Registre todas las variables de este ensayo en cada paso, como se sugiere en la tabla 21.

Tabla 21. Tabla propuesta para mediciones para el deslizamiento.

Carga [W]	V1(V)	V2(V)	V3(V)	I1(A)	I2(A)	I3(A)	W1 (W)	W2 (W)	W _{total} [W]	n [rpm]
0										1200

DETERMINACIONES

a) Con los datos obtenidos en los distintos ensayos determine el circuito equivalente de la máquina de inducción y calcule los valores de par, corriente, potencia y factor de potencia para las siguientes condiciones de funcionamiento:

- Arranque
- Par máximo
- Mejor factor de potencia

b) Elabore las siguientes gráficas y explique el comportamiento de esta máquina de inducción según lo observado en cada una de las curvas.

- $T=f(I)$
- $T=f(s)$
- $I=f(s)$
- $P=f(s)$
- $\cos\phi_1=f(S)$

7.3. Practica 3. Maquina de Inducción Bifásica.

OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

El objetivo fundamental de la práctica es que el alumno se familiarice con los conceptos básicos relacionados con la máquina de inducción, interconexión entre la red trifásica y un sistema bifásico, y la realización de ensayos comunes con el conjunto de la máquina generalizada.

Concretamente, se pretende dar una idea general del funcionamiento de este equipo y que el alumno sea capaz de determinar las curvas más características que definen su modo de trabajo, determinando el comportamiento que experimentan.

PRECAUCIONES

Levantar todas las escobillas, excepto la de los anillos colectores. Ajuste el disco del rotor en la posición 2, para habilitar el devanado conectado en estrella del rotor. Conecte la máquina como se indica en el diagrama de la figura 58, ajustando el variac trifásico, para un voltaje de salida cero. Recuerde que la máquina debe girar en sentido antihorario si se ve el conjunto desde la máquina de carga.

CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE BIFÁSICA A PARTIR DE LA RED TRIFÁSICA

Toda la información requerida en cuanto al diseño de la fuente bifásica que se va a implementar en esta práctica, se puede (y se recomienda) consultar en el punto 5.5.2.1 del trabajo de grado titulado “Estudio de la Operatividad de la Máquina Eléctrica Generalizada Marca A.E.I.” pero cabe destacar que no existe una forma única de obtener una fuente bifásica a partir de la red trifásica.

En este sentido, a continuación se describe el procedimiento de interconexión entre la fuente bifásica diseñada y la máquina generalizada en los siguientes pasos:

Paso 1: Ajuste un variac de manera tal que se puedan obtener las tensiones monofásicas que se indican a continuación en la figura 78:

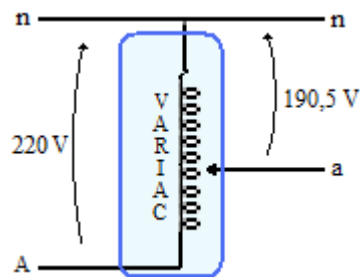


Figura 78. Ajuste de tensiones del variac.

Paso 2: Con la ayuda del variac (ajustado previamente) y dos transformadores monofásicos de potencia nominal (mayor o igual a 3kVA.), elaborar una conexión Scott para obtener una alimentación bifásica de hasta 220V desfasadas a 90° eléctricos entre sí, como la que por ejemplo se sugiere en la figura 79. **Note que la posición de entrada y salida del variac, ahora se cambian con respecto a cuándo se ajustó para así obtener 220V a la salida.**

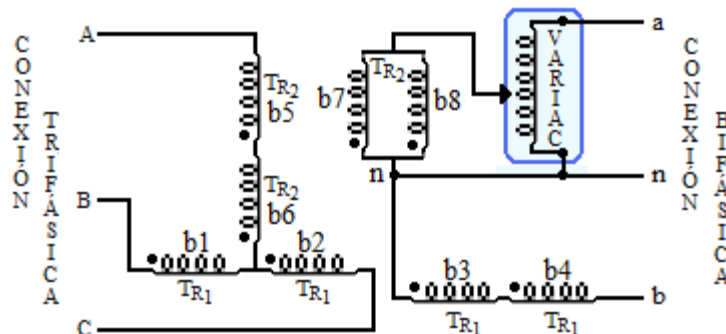


Figura 79. Diagrama circuitual de la conexión Scott.

Paso 3: Conecte la entrada de la conexión Scott a otro variac y la salida bifásica a los instrumentos de medición y de ellos a los devanados J y H de la máquina generalizada, como se sugiere en la figura 80:

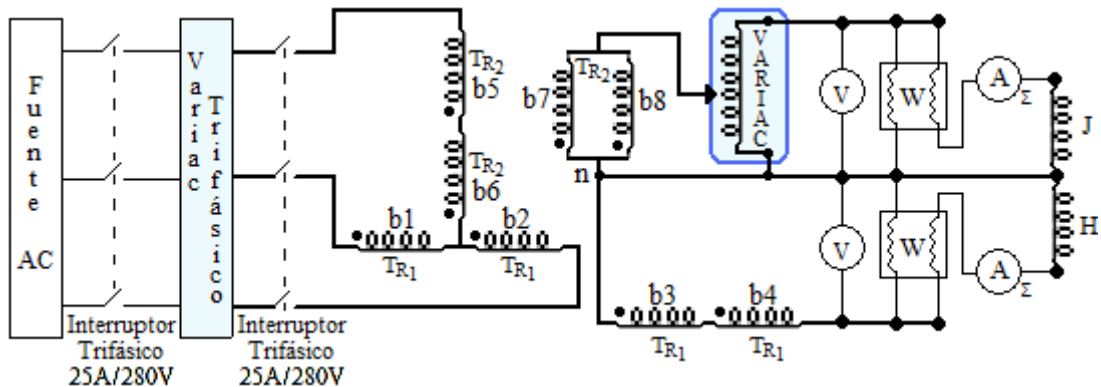


Figura 80. Diagrama circuitual de la fuente bifásica a la máquina generalizada.

Paso 4: Con la máquina generalizada dispuesta en la posición 2 en el disco del rotor, conecte las tomas del devanado en estrella del rotor, al banco de resistencias a través del panel de control.

Paso 5: Alimente la conexión trifásica de la conexión Scott, desde un nivel cero de tensión incrementándola en pasos pequeños, como se indica en la figura del diagrama 58, y verifique el sentido correcto del giro del rotor de la máquina y que efectivamente se logra la conversión de un sistema trifásico a uno bifásico mediante la observación de magnitudes iguales de las tensiones a la salida.

Ensayos: Realice todos los ensayos y determinaciones descritas para la práctica de la máquina generalizada trabajando como máquina de inducción trifásica, tratado en el punto 7.2 del capítulo VII del trabajo de grado titulado “Estudio de la Operatividad de la Máquina Eléctrica Generalizada Marca A.E.I.”, salvo la medición de las resistencias estatóricas y rotóricas si es que ya se realizaron los ensayos en dicha práctica anterior y se obtuvieron sus valores respectivos. **Es muy importante resaltar que en la práctica como inducción trifásica, la maquina generalizada es alimentada por el rotor, mientras que en el caso de inducción bifásica la alimentación se hace por el estator**, lo cual resulta interesante a la hora de plantear las ecuaciones y obtener el circuito equivalente. **Entonces, para el desarrollo de esta práctica, se debe considerar es el diagrama de circuitual mostrado en la figura 80**, y que como allí se observa, la extrapolación con la máquina asíncrona trifásica, consiste básicamente en medir las mismas variables a excepción de una tensión y una corriente menos en cada ensayo, para la máquina de inducción bifásica.

DETERMINACIONES

- a) Compare el comportamiento obtenido de la máquina generalizada en esta práctica con respecto al obtenido cuando se trabajó como máquina de inducción trifásica.
- b) Con los valores medidos en la prueba a rotor trabado, calcule la impedancia necesaria para operar la máquina como un motor de inducción monofásico.

CONCLUSIONES

El conjunto de la máquina generalizada es un equipo que se encontraba algo deteriorado por el tiempo y el desuso, del cual no se tenía mucha información por ser muy poco común, sin embargo, gracias a los trabajos de mantenimiento y acondicionamiento realizados al mismo, se ha logrado recuperar este conjunto que, como ya se ha expresado y corroborado a lo largo de este proyecto, posee muchas cualidades y nos brinda la posibilidad de estudiar distintos tipos de máquinas con un solo equipo, y que además las configuraciones que aquí fueron presentadas, existen otras que se pueden implementar por lo que no se agotan las facultades de esta máquina.

Es por eso y en vista de los resultados obtenidos, respecto a las pruebas de accionamiento y funcionamiento del conjunto de la máquina generalizada resaltados en los diferentes diagnósticos hechos en el capítulo V, que se puede concluir que este conjunto se encuentra operativo, y que junto a toda la información expuesta en estas páginas está listo para implementarse de inmediato, si así se desea, a cualquiera de los programas de las asignaturas del Departamento de Potencia e Industrial de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V. que estén relacionadas con el área de estudio de máquinas eléctricas, tomando en cuenta por supuesto, las recomendaciones para trabajar con dicho conjunto.

Algo que es importante destacar, es que con este equipo se puede estudiar el comportamiento de la máquina generalizada, tanto en el estado permanente como en el estado transitorio en cualquiera de sus configuraciones, y aunque estos análisis no eran parte de los objetivos de este proyecto, se quiso dejar la referencia para que se considerase hacer un estudio más profundo y caracterizar cada configuración en particular, que además, si se combina con alguna de las propuestas de automatización para la adquisición y registro de datos aquí mencionadas, pudieran constituir el máximo aprovechamiento de todos los beneficios del conjunto para el proceso enseñanza - aprendizaje. Por otra parte se concluye que la mejor forma de registrar los datos es por medio de la tarjeta SAD ya que esta ofrece mayores beneficios al ser la interfaz que nos permite procesar y analizar directamente las señales en una computadora personal.

RECOMENDACIONES

- a) Revisar y estar atentos de los valores nominales establecidos por el fabricante en las distintas placas en cada máquina que compone el conjunto de la máquina generalizada así como las indicadas en el panel de control y operaciones.
- b) Colocar interruptores, existentes en el laboratorio a la entrada de cualquier configuración elegida para accionarlos rápidamente y dejar sin energía el equipo de inmediato de surgir algún inconveniente.
- c) Antes de operar el conjunto en cualquiera de las configuraciones posibles, se debe verificar el sentido de giro correcto de la máquina generalizada el cual es en sentido anti-horario viendo el conjunto desde la máquina de carga.
- d) En el caso que se requiera trabajar con la máquina de carga D.C. y la máquina generalizada al mismo tiempo, (como en la operación como máquina sincrónica trifásica), verificar que ambas tengan el mismo sentido de giro impuesto por la máquina generalizada como ya se definió antes.
- e) Cuando se inicie la máquina generalizada en cualquier configuración tanto en D.C. como en A.C. incrementar el voltaje gradualmente desde un valor bajo cuidando siempre de no pasar de los valores permitidos por el conjunto. Para los casos en D.C. se puede usar el conjunto de resistores conmutados (R1, R2 o R3) o un reóstato externo, y en A.C. es recomendable usar un variac para incrementar igualmente la tensión poco a poco.
- f) Dado que no se puede variar el valor de la resistencia del reóstato de campo de la máquina de carga D.C. por medio de la manivela dispuesta en el panel de control y operaciones, se recomienda fabricar e instalar la pieza faltante para este reóstato a fin de habilitarlo.
- g) Proponer a los Departamentos de Electrónica y Comunicaciones la elaboración de una tarjeta SAD, para implementarla en el proceso y análisis de señales y variables objeto de estudio de distintos tipos de máquinas eléctricas.

BIBLIOGRAFÍA

B. J. Ellison. Generalized Electric Machines, First published, London: GEORGE G. HARRAP & Co. LTD 182 High Holborn, 1967.

Bernard Adkins. Teoría General de las Máquina Eléctricas, Bilbao: Ediciones Urmo, 1967.

Enriquez Harper. El Libro Práctico de los Generadores Transformadores y Motores Eléctricos, México: Editorial Limusa S.A. 2001.

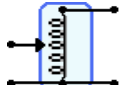
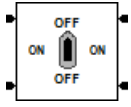
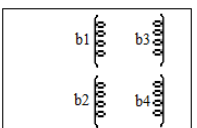
Manual del Conjunto de la Máquina Generalizada: Generalized Electric Machine Set Instrucciones para la Operación y Mantenimiento / Associated Electrical Industries (A.E.I.) 2nd. Ed. 1967._25 p

J.P. Chassande, A. Cepeda. Laboratorio de Maquinas Eléctricas Ensayos de Maquinas asincrónicas o Inducción, República Bolivariana de Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Enero 2002

Juan A. Tapia. Conversión Electromecánica de la Energía, Chile: Universidad de Concepción, Agosto 2006 <<http://es.scribd.com/doc/86134791/Conversion-Electromecanica-de-La-Energia-UDEC> [Consulta: 2012]

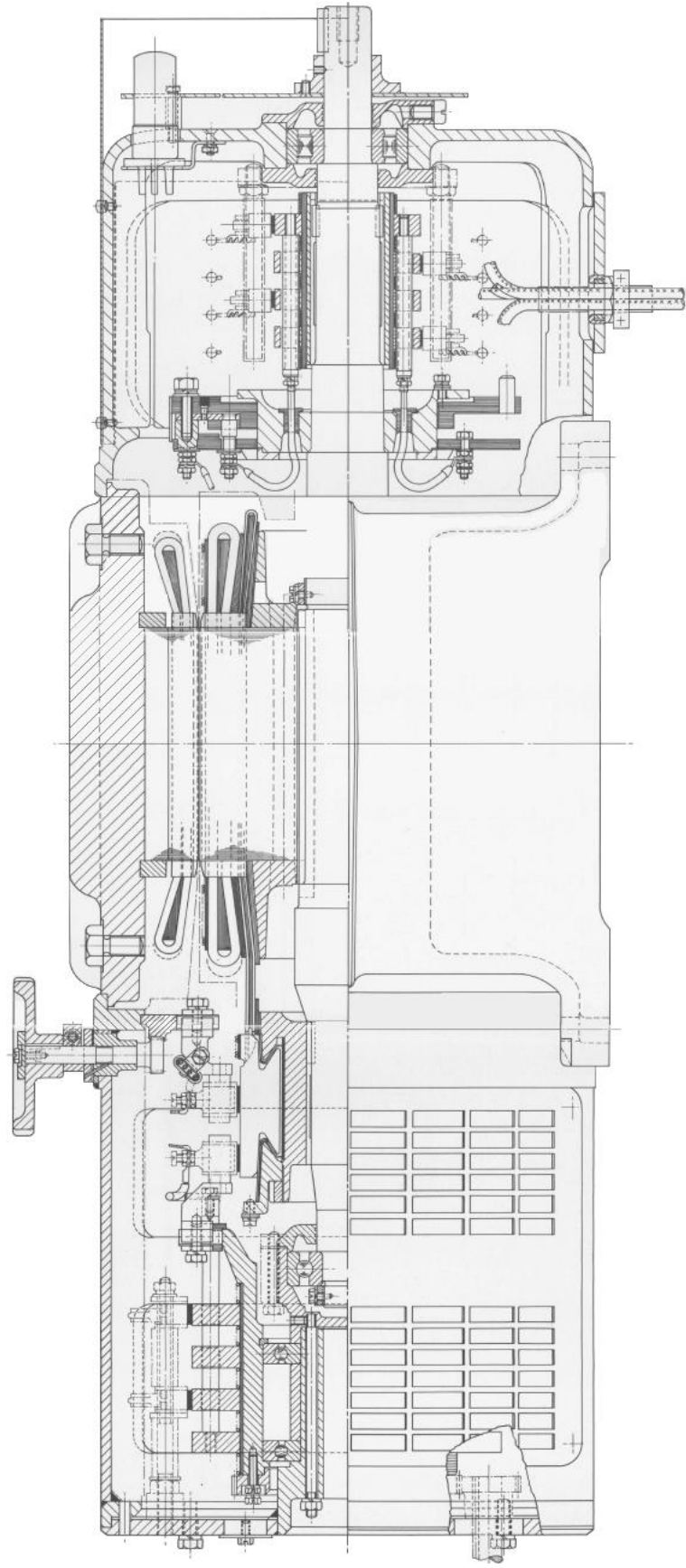
José Manuel Aller Castro. Máquinas Eléctricas Rotativas Introducción a la Teoría General, Valle de Sartenejas: Universidad Simón Bolívar, Octubre 2004. <http://prof.usb.ve/jaller/Guia_Maq_pdf/Maquinas_Rotativas.pdf [Consulta: 2012]

LISTA DE ACRONIMOS, ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.

A = Amp	=	Amperes: Unidad de medida para la corriente eléctrica
B	=	Densidad de campo magnético
CMR	=	Campo Magnético Rotatorio
CT ó CT's	=	Cable Para Probador de Corriente (Current Tester)
CRO	=	Osciloscopio de Rayos Catódicos (Cattodic Ray Oscilloscope)
Fem	=	Fuerza electromotriz
Fmm	=	Fuerza magnetomotriz
Ft	=	Pies: Unidad de medida inglesa para la longitud
in = pulg	=	Pulgadas: Unidad de medida inglesa para la longitud
Lbf	=	Libra fuerza: Unidad de medida inglesa para la fuerza
ohm = Ω	=	Ohmios: Unidad de medida para la resistencia eléctrica
SAD	=	Sistemas de Adquisición de Datos
T	=	Par: Unidad de medida para la torsión
V	=	Voltios: Unidad de medida para la tensión eléctrica
Δ	=	Entrehierro
μ_{Fe}	=	Permeabilidad del hierro
μ_0	=	Permeabilidad del aire
	=	Bobina móvil: Indican Instrumentos de medición D.C.
Σ	=	Hierro móvil: Indican Instrumentos de medición A.C.
	=	Auto transformador variable (VARIAC)
	=	Amperímetro
	=	Interruptor monofásico
	=	Interruptor trifásico
	=	Transformador monofásico
	=	Vatímetro

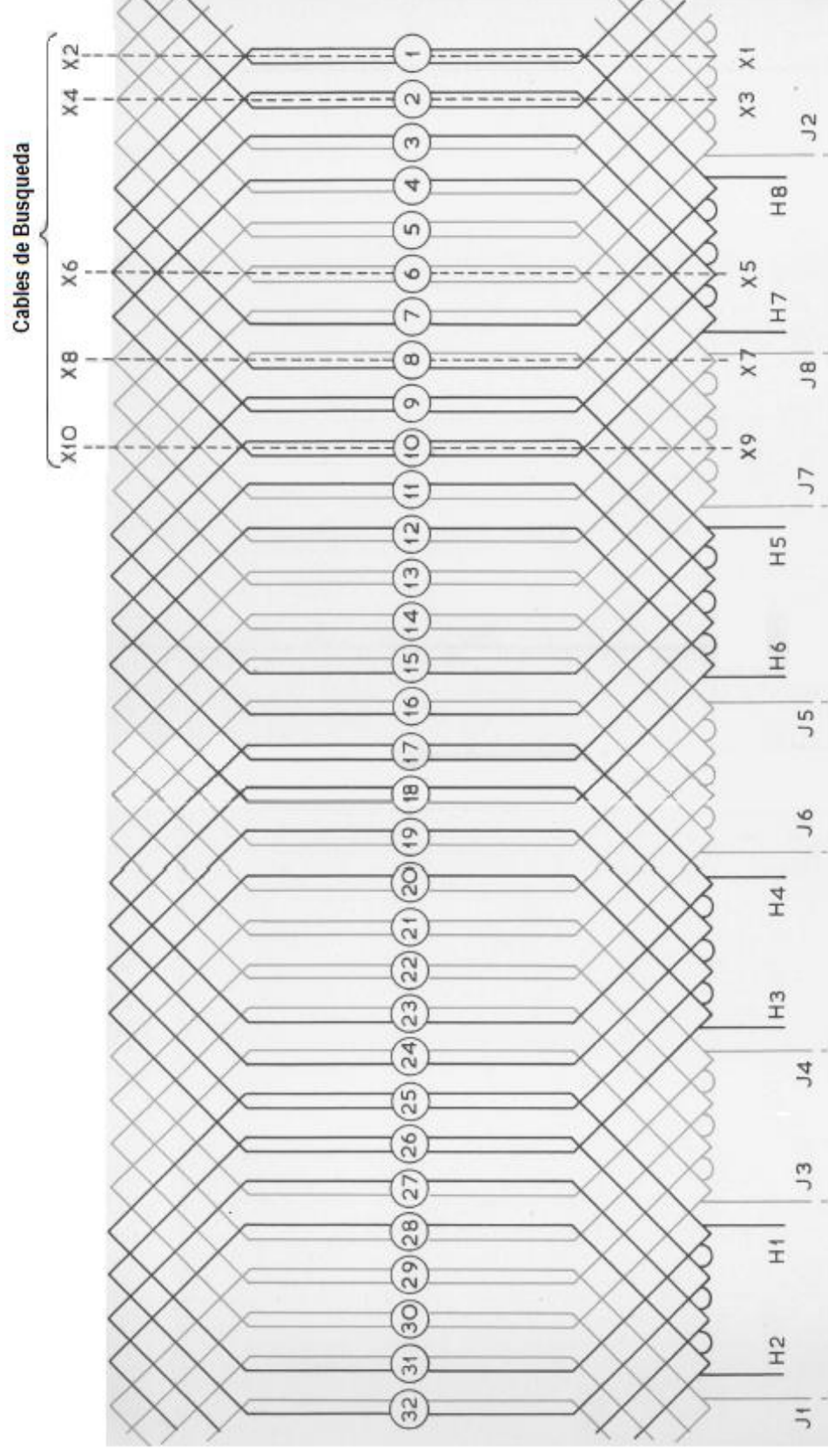
ANEXOS

[ANEXO N°1]



Sección transversal de la máquina generalizada
[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 2]

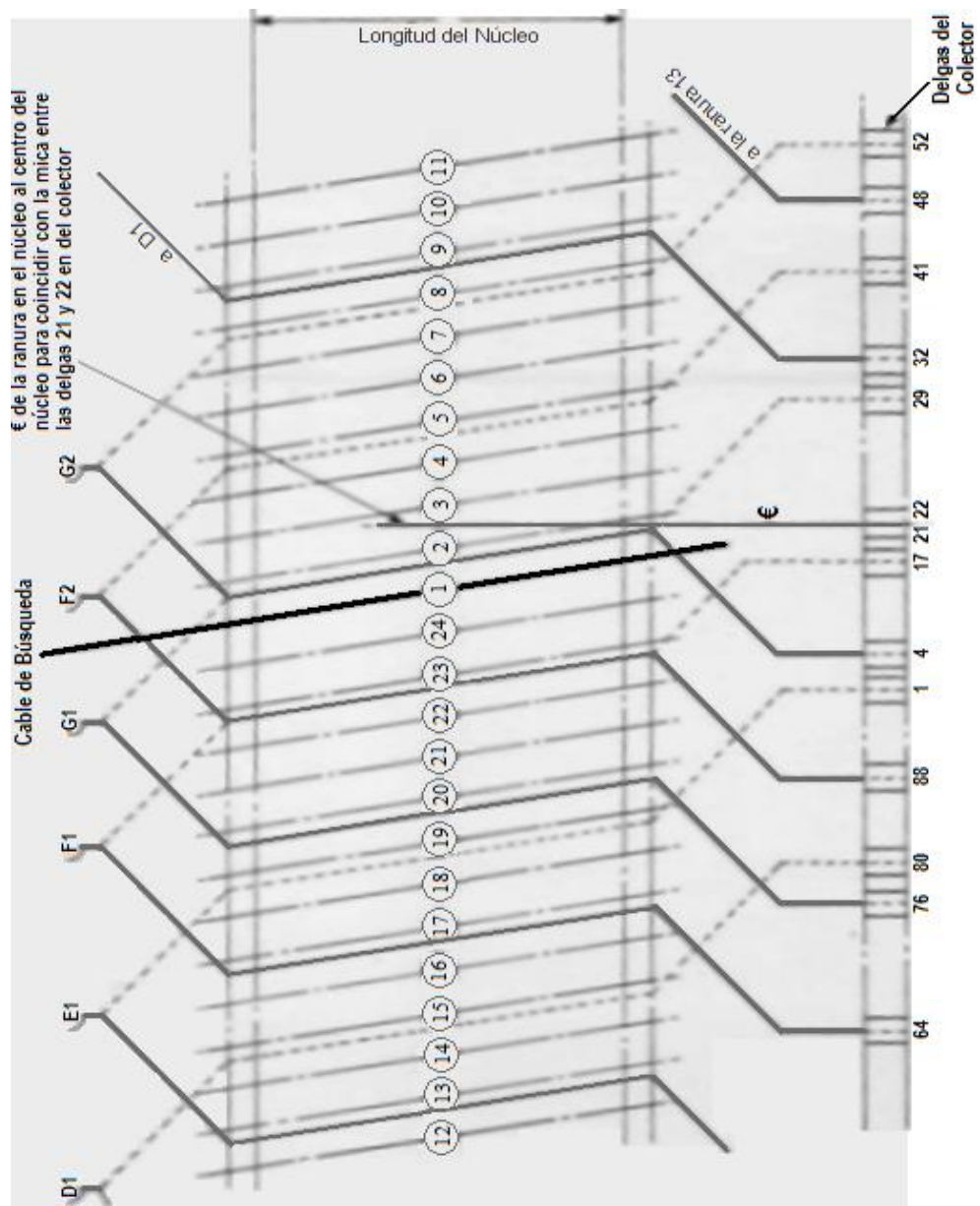
[ANEXO N°2]



Devanado del estator de la máquina generalizada

[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 4]

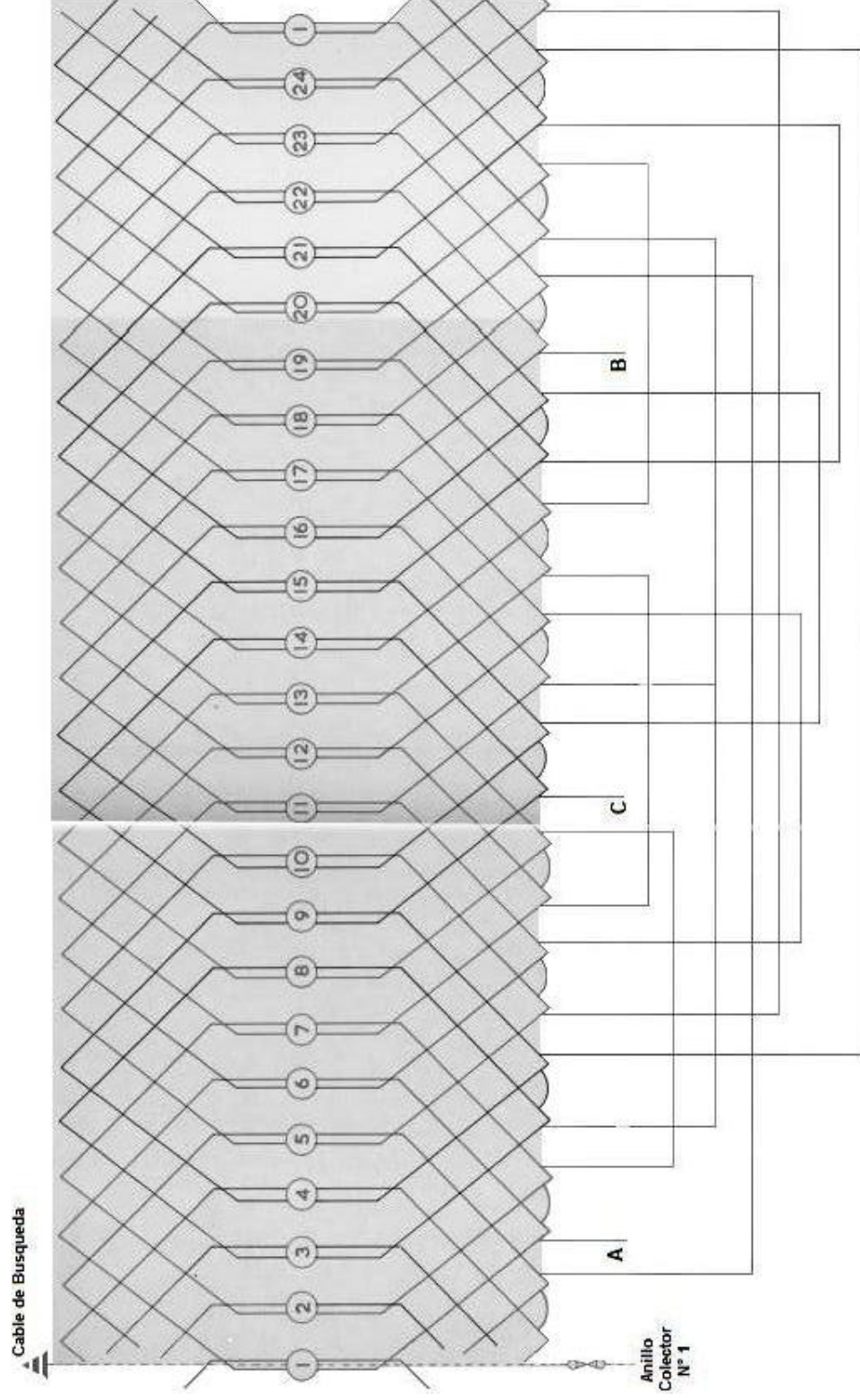
[ANEXO N°3]



Devanado cerrado del rotor (colector) de la máquina generalizada

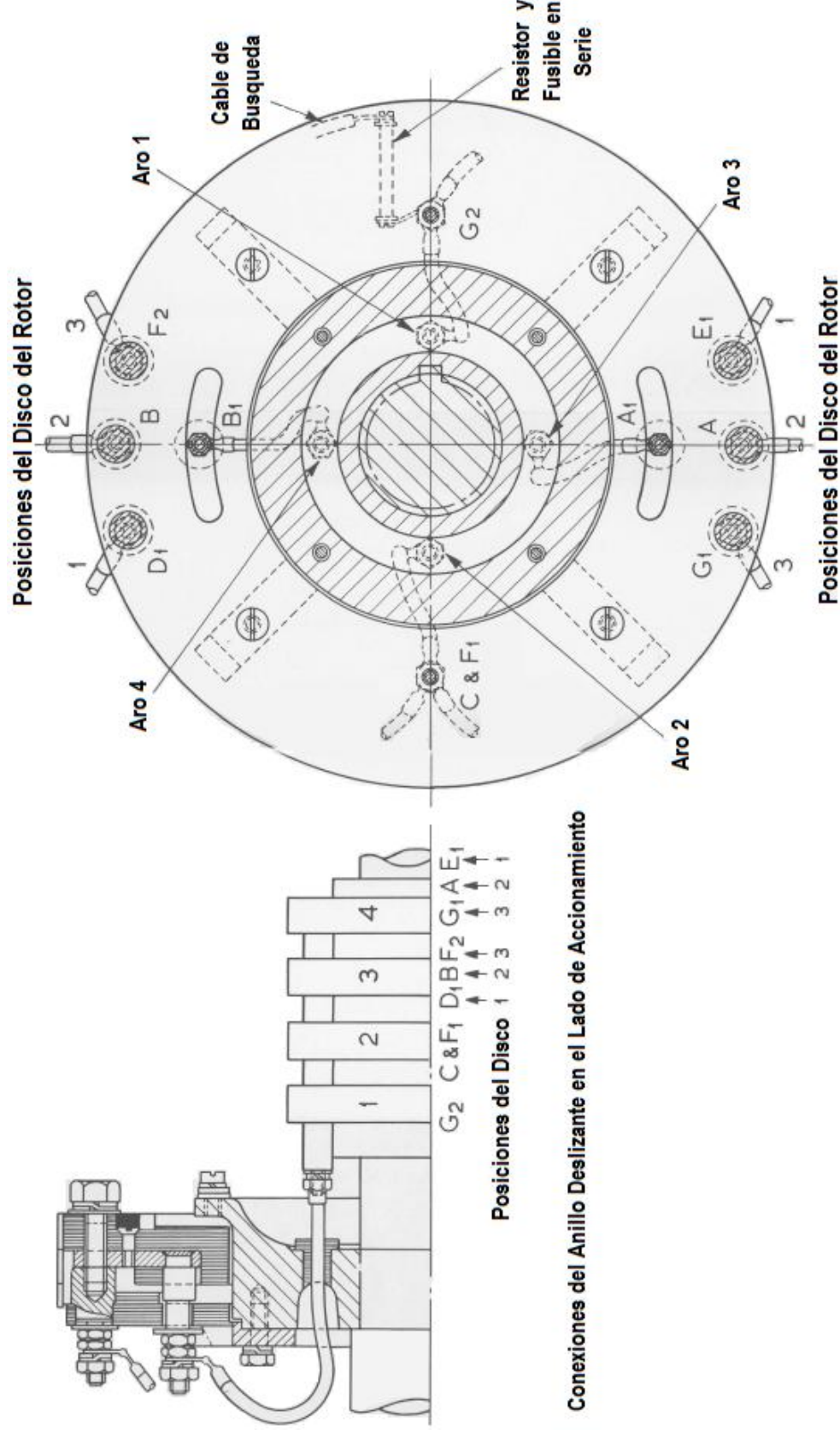
[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 5]

[ANEXO N°4]



Devanado trifásico del rotor (conectado en estrella) de la máquina generalizada
 [Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 7]

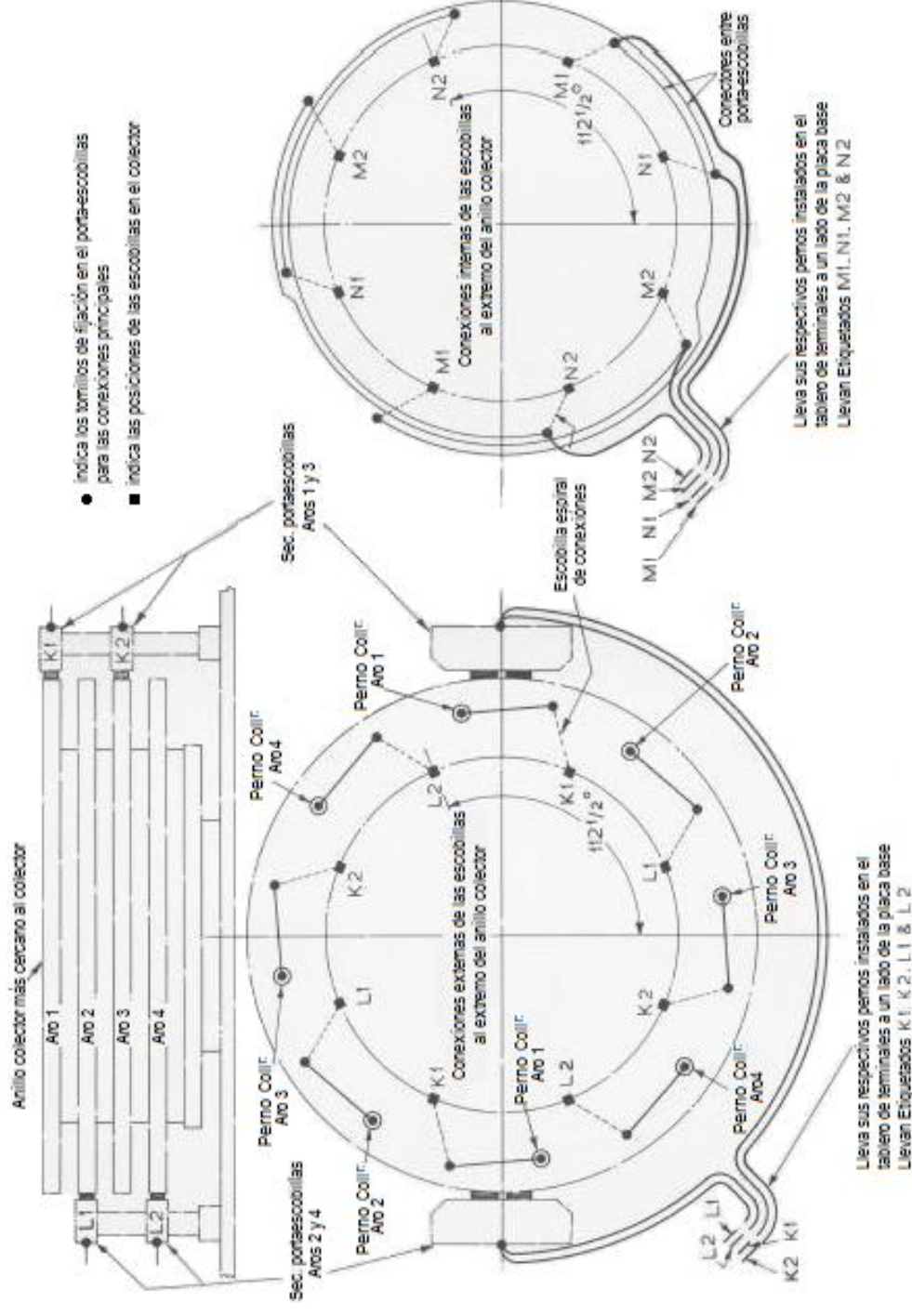
[ANEXO N°5]



Conexiones entre las bobinas del rotor, el disco y anillos rozantes

[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 6]

[ANEXO N°6]



Conexiones del juego de escobillas rotativas a la máquina generalizada

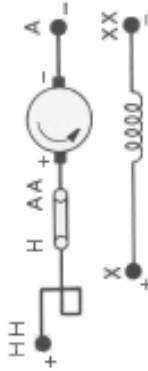
[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 8]

[ANEXO N°7]

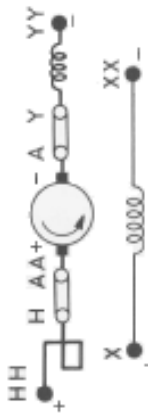
- A AA Armadura incluyendo los cables compoles
- Y YY Bobina serie de campo
- X XX Excitación independiente de la bobina de campo
- H HH Bobina Compole
- Armadura
- Compole
- Serie principal. Campo
- Derivación o excitación independiente del campo

4 hp	1500 rev / min	220 v	1/2 horas
6 hp	1500 rev / min	220 v	intermitente
2 KW	1500 rev / min	220 v	1/2 horas
2,5 KW	1500 rev / min	220 v	intermitente
			4 1/3 hp de entrada

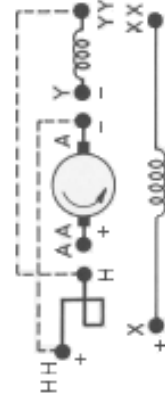
Conexiones tipo D de la máquina como motor o generador, de derivación o compuesto o excitación independiente.



Funcionando como un motor o generador shunt o excitación independiente

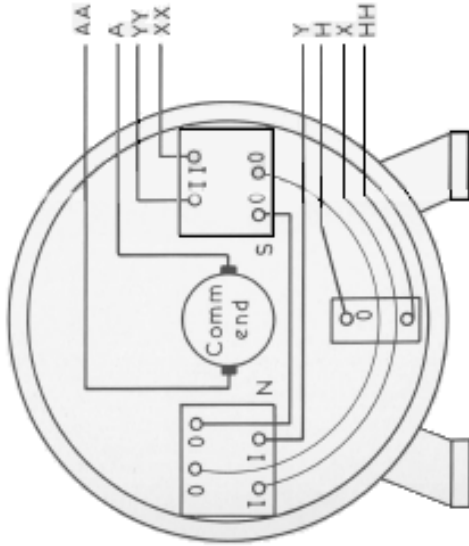


Funcionando como motor compuesto



Funcionando como generador compuesto

Importante: La máquina no debe funcionar como motor compuesto cuando está conectado como generador compuesto

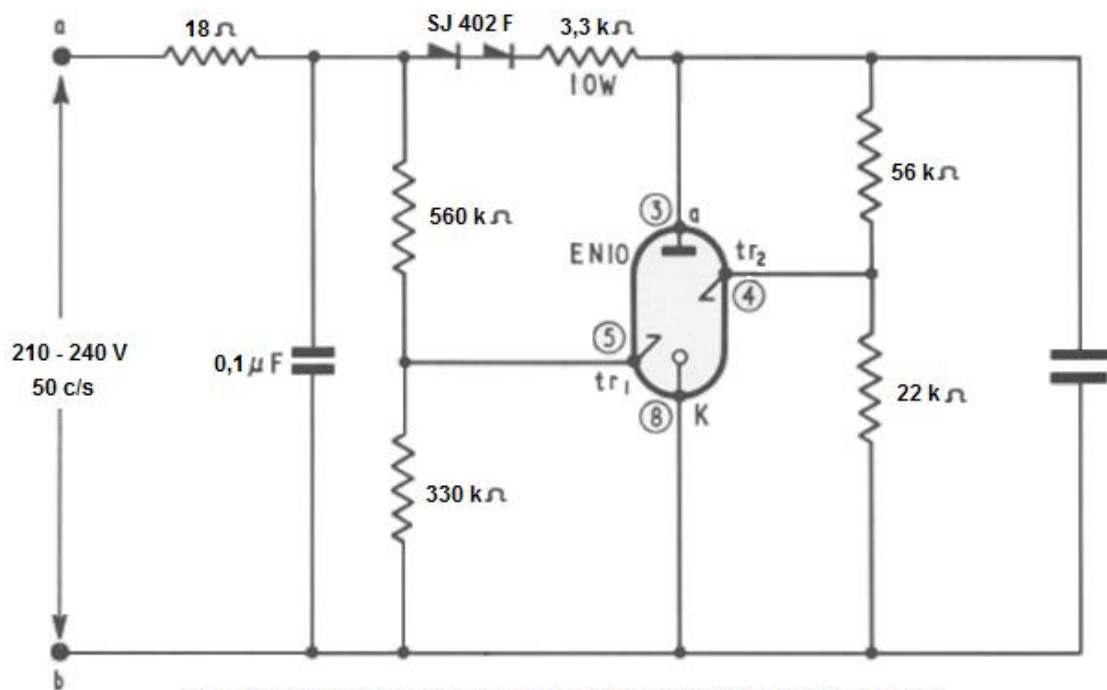


El sentido positivo de giro del conjunto es en sentido antihorario mirando desde la máquina de carga hacia el disco del estroboscopio de la máquina generalizada. Las conexiones son dadas para esa rotación

Conexiones de la máquina de carga al conjunto de la máquina generalizada

[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 10]

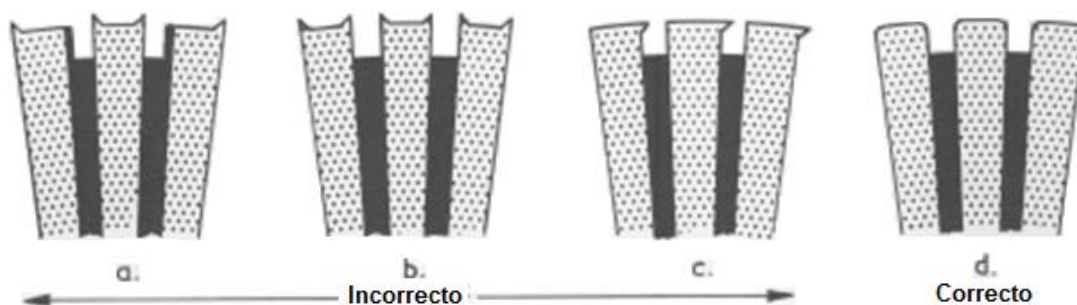
[ANEXO N°9]



Circuito de lámpara estroboscópica.

[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 9]

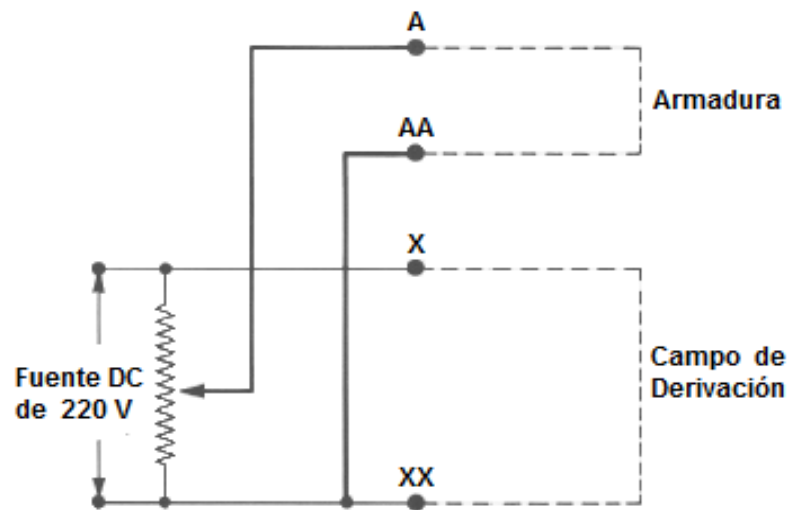
[ANEXO N°10]



Sección transversal de las delgas del colector que ilustran el tratamiento correcto e incorrecto de la máquina generalizada (la mica se representa por el color negro)

[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 14]

[ANEXO N° 11]



Conexión de accionamiento de motor de escobillas rotativas.
[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And
Maintenance Fig,. 15]

[ANEXO N° 12]

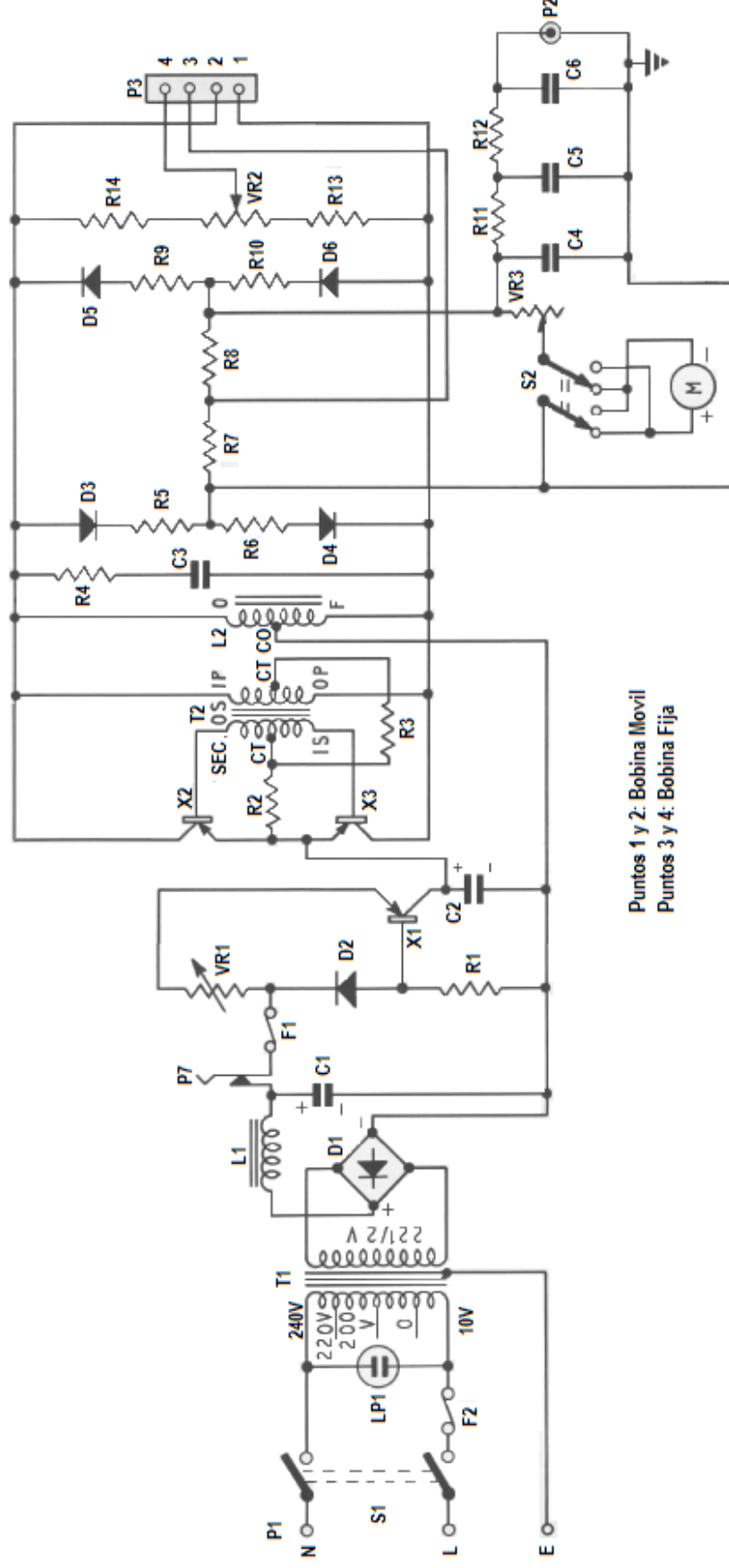


Diagrama circuital del torquímetro del conjunto de la máquina generalizada
[Tomado de Generalized Electric Machine Set Instructions For Operation And Maintenance, Fig. 16]