

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DIAGNÓSTICO, MANTENIMIENTO CORRECTIVO, PUESTA EN  
OPERACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO  
WARD LEONARD DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS  
ELÉCTRICAS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO

**DIEGO RAÚL RODRÍGUEZ TENORIO**

[diego.rodriguez@epn.edu.ec](mailto:diego.rodriguez@epn.edu.ec)

**DIRECTOR: JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**

[jesus.jativa@epn.edu.ec](mailto:jesus.jativa@epn.edu.ec)

Quito, febrero 2018

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo ha sido desarrollado por Diego Raúl Rodríguez Tenorio, bajo mi supervisión.

---

**JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Diego Raúl Rodríguez Tenorio, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

DIEGO RAÚL RODRÍGUEZ TENORIO

## DEDICATORIA

### ***A la virgen Dolorosa***

*Por acompañarme en todo momento desde mi consagración en el Colegio San Gabriel hasta el día hoy, permitiéndome llegar hasta este punto dándome salud y fortaleza para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

### ***A mi madre Adriana.***

*Por ser mi compañera, confidente y gran amiga, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores y su motivación constante, lo que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su infinito amor.*

### ***A mi padre Raúl.***

*Por los ejemplos de perseverancia, constancia, firmeza y convicción que lo han caracterizado y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.*

### ***A mis hermanos Josselyn y Dilan***

*Son ustedes dos una de las razones más importantes en mi vida, me han enseñado tanto en este tiempo: el valor del esfuerzo, lo fuertes que somos unidos, aunque a veces no nos entendamos, con una risa junto a un abrazo se soluciona todo y demostramos que siempre nos estaremos apoyando.*

### ***A mis Abuelos Piedad y Alberto***

*Me dieron siempre su amor desde pequeños, me cuidaron y velaron por mí, llevo siempre sus lecciones de vida, a enfrentar toda situación con firmeza, voluntad y humildad de corazón. Les extraño cada día de mi vida mis hermosos angelitos.*

## AGRADECIMIENTO

*Gracias Papá porque con tu ejemplo me has hecho el profesional que ahora soy.*

*Gracias Mamá por tu amor incondicional.*

*Gracias Hermanos por motivarme a llegar cada vez más lejos.*

*Gracias Michelle por ser mi persona, por apoyarme en este largo camino, siempre incondicional y amorosa.*

*Gracias Dr. Jesús Játiva por su guía y plena confianza en mi capacidad para desarrollar con éxito este trabajo.*

*Gracias Dr. Franklin Quilumba por brindarme las condiciones favorables para el desarrollo de este trabajo en el laboratorio y por su amistad.*

*Gracias a todos y cada uno de mis queridos amigos, quienes me han acompañado a lo largo de mi vida universitaria en las alegrías, tristezas, desvelos y farras.*

*¡Gracias a ustedes!*

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Objetivos.....	2
1.2    Alcance .....	2
1.3    Marco Teórico .....	3
1.3.1    El Conjunto Ward Leonard.....	4
1.3.2    Fuerza Electromotriz Inducida .....	6
1.3.3    Par Inducido en Espira Portadora de Corriente.....	7
1.3.4    Voltaje Inducido en Espira Rotativa .....	9
1.3.5    Generadores Sincrónicos.....	11
1.3.5.1    Generalidades Constructivas.....	12
1.3.5.2    Velocidad de Rotación.....	13
1.3.5.3    Voltaje Interno Generado.....	14
1.3.5.4    Circuito Equivalente.....	15
1.3.5.5    Diagramas Fasoriales.....	18
1.3.5.6    Potencia y Par .....	19
1.3.5.7    Medición de Parámetros.....	20
1.3.5.8    Análisis Variacional de P y Q.....	23
1.3.5.9    Teoría de Curvas de Capacidad .....	27
1.3.6    Motores de Inducción.....	30
1.3.6.1    Aspectos Constructivos .....	30
1.3.6.2    Par Inducido .....	32
1.3.6.3    Deslizamiento y Frecuencia.....	33
1.3.6.4    Circuito Equivalente.....	34

1.3.6.5	Potencia y Par .....	36
1.3.6.6	Arranque Y – Delta .....	38
1.3.6.7	Determinación de Parámetros .....	40
1.3.7	Motores de Corriente Continua .....	44
1.3.7.1	Circuito Equivalente del Motor DC .....	44
1.3.7.2	Curva de Magnetización de la Máquina DC .....	45
1.3.7.3	Motor DC Excitación Separada.....	45
1.3.7.4	Control de Velocidad .....	47
1.3.7.5	Efecto de Pérdida de Campo .....	48
1.3.7.6	Pruebas del Motor DC .....	49
1.3.8	Generadores de Corriente Continua .....	49
1.3.8.1	Generador DC de Excitación Separada .....	50
1.3.8.2	Curvas Características del Generador DC .....	51
1.3.8.3	Control de Voltaje Terminal .....	51
CAPÍTULO 2.....		53
DIAGNÓSTICO Y PUESTA EN OPERACIÓN DEL SISTEMA WARD LEONARD		
.....		53
2.1.	Antecedentes .....	53
2.2.	Conjunto Variador de Frecuencia Ward Leonard .....	56
2.2.1.	Identificación del Cableado .....	56
2.2.2.	Descripción del Circuito de Fuerza Ward Leonard .....	61
2.2.2.1.	Motor Trifásico de Inducción.....	64
2.2.2.2.	Generador DC .....	65
2.2.2.3.	Motor DC .....	66
2.2.2.4.	Generador Síncrono Rotor Liso.....	68
2.2.2.5.	Ventiladores .....	70
2.2.3.	Descripción del Sistema de Control Ward Leonard .....	71
2.2.3.1.	Sistema de Control y Mediciones.....	71
2.2.3.1.1.	Circuitos de Campo Generador DC, Motor DC y Generador AC ...	73
2.2.3.1.2.	Disyuntor del Panel 10 - Salida a Mesas .....	74
2.2.3.1.3.	Circuito de Arranque Y- $\Delta$ para el Motor Trifásico de Inducción.....	75
2.2.3.1.4.	Conjuntos Reguladores .....	75
2.3.	Diagnóstico Actual del Grupo Ward Leonard.....	78
2.3.1.	Diagnóstico de los Sistemas de Control del Equipamiento Ward Leonard .....	80

2.3.2. Diagnóstico de los Sistemas de Fuerza del Equipamiento Ward Leonard	82
2.4. Mantenimiento Correctivo y Preventivo .....	83
2.5. Plan de Mantenimiento Predictivo y Puesta en Operación .....	96
CAPÍTULO 3 .....	102
RESULTADOS DE PUESTA EN OPERACIÓN DEL SISTEMA WARD LEONARD	102
3.1. Diagramas Unifilares .....	102
3.2. Curvas de Operación Independientes .....	103
3.2.1. Motor Trifásico de Inducción .....	103
3.2.2. Generador DC .....	104
3.2.3. Motor DC .....	105
3.2.4. Generador Sincrónico .....	107
3.3. Funcionamiento del Conjunto Ward Leonard .....	110
3.4. Producto Final Entregado.....	112
3.5. Manual de Uso.....	117
CAPÍTULO 4.....	119
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
4.1. Conclusiones .....	119
4.2. Recomendaciones .....	120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121
ANEXOS.....	122

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación nace de la necesidad de reincorporar al laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional, el suministro de energía eléctrica con señales de voltaje y frecuencia variables.

Durante un período de seis meses se ha realizado la puesta en operación del conjunto de máquinas eléctricas Ward Leonard. Toda acción de inspección, mantenimiento y control ha sido detallada de la manera más clara posible y ejecutada con todas las medidas de seguridad pertinentes.

El conjunto Ward Leonard utiliza un motor trifásico de inducción como eje primario de un generador de corriente continua, el cual por acción de su circuito de excitación independiente permite controlar el voltaje terminal al que se conecta un motor DC, ejerciendo control sobre su velocidad de giro. A su vez el motor de continua es el eje primario del generador sincrónico de rotor liso, el cual por medio de su circuito de excitación permite el ajuste de la amplitud de voltaje de la onda trifásica.

El equipamiento, una vez terminadas las tareas de mantenimiento y puesta en operación, está en la capacidad de suministrar voltaje entre fases desde 0 V a 0 Hz, pasando por 190 V a 60 Hz y de máximo 300 V a 100 Hz, proporcionando una relación de control de  $\Delta V = \pm 70V$  y  $\Delta f = \pm 10$  Hz en todo punto de operación, lo cual permite acceder a una amplia gama de combinaciones.

Estas señales pueden ser independientemente ajustadas para satisfacer cualquier necesidad en el desarrollo de prácticas estudiantiles y docentes, como también procesos de investigación científica enfocados a analizar respuestas de aparatos y equipos en condiciones variables del suministro eléctrico.

### **PALABRAS CLAVE:**

Motor de Inducción, Generador DC, Motor DC, Generador Sincrónico, Conjunto Ward Leonard, Mantenimiento Industrial, Control de Velocidad del Motor DC, Control de Voltaje y Frecuencia independientes.

## **ABSTRACT**

This technical study arises from the need of reincorporate to the laboratory of electrical machines, the electric energy supply with variable voltage and frequency signals.

During a period of six months, the Ward Leonard equipment was put into operation. Every inspection, maintenance and control action has been detailed as clearly as possible and executed with all the relevant safety measures.

The Ward Leonard set uses a three-phase induction motor as the primary shaft of a DC generator, which, by the action of its independent excitation circuit, allows controlling the terminal voltage to be supplied to the DC motor, controlling its speed of rotation. In the other hand, the DC motor is the primary shaft of the synchronous generator, which means that its excitation circuit allows the adjustment of the voltage amplitude of the three-phase wave.

The equipment, once the maintenance and put in operation tasks are finished, can supply electrical energy from 0 V at 0 Hz, going through 190 V at 60 Hz and maximum 300 V at 100 Hz obtaining a control ratio of  $\Delta V = \pm 70V$  and  $\Delta f = \pm 10$  Hz in all operating points, allowing access to a wide range of combinations.

These voltage and frequency signals can be independently adjusted to meet any need that may arise, such as: development of student and teaching practices, as well as scientific research processes focused on analyzing equipment responses to a variable power supply conditions.

### **KEYWORDS:**

Induction Motor, DC Generator, DC Motor, Synchronous Generator, Ward Leonard Set, Industrial Maintenance, Speed Control of DC Motor, Independent Control of Voltage and Frequency.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica actualmente posee un amplio conjunto de máquinas destinadas tanto a pruebas de investigación, como también al desarrollo de prácticas docentes de profundización del conocimiento a lo largo de la instrucción en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Se dispone de un tablero de control principal marca Siemens, compuesto de varios módulos con la finalidad de suministrar energía eléctrica a los puestos de trabajo, ubicados en las diferentes mesas con las que cuenta el laboratorio. Concretamente el Panel 5, correspondiente al sistema variador de frecuencia Ward Leonard, es el objeto de estudio y desarrollo del presente trabajo de titulación, pues cuenta con mayor equipamiento motriz, por desgracia el conjunto Ward Leonard se mantuvo fuera de operación por varias décadas, siendo un desaprovechamiento enorme del potencial del laboratorio.

La puesta en operación del equipo Ward Leonard se la ha realizado exhaustivamente desde inicios del presente año, con varias dificultades inherentes a tratar con equipamiento del cual no existe una base sólida de documentación que sirva como punto de partida, para lo cual se empleó gran parte del tiempo en identificar cada uno de los componentes, verificar su estado, realizar mantenimiento correctivo con la finalidad de volverlos a integrar completamente al módulo de operación.

Con el equipo Ward Leonard operando en conjunto con su sistema de control habilitado, es posible obtener en cualquier puesto de trabajo, energía eléctrica con magnitudes de voltaje y frecuencia variables, simultáneamente. Este suministro variable podrá ser empleado en la ejecución de estudios de respuesta a variaciones de frecuencia – voltaje, de aparatos y equipos de carga no lineal, a fin de obtener sus correspondientes modelos para estudios eléctricos transitorios y de pequeña señal. Además, será posible atender la demanda de estudios y trabajos técnicos requeridos por la industria nacional, tanto pública como privada.

En realidad, las aplicaciones de voltaje y frecuencia variables comprenden un amplio panorama de posibilidades: pruebas, estudios e investigaciones, que se pueden realizar en su totalidad dentro del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

## **1.1 Objetivos**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar el mantenimiento correctivo y puesta en operación del equipo Ward Leonard disponible en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, así como ejecutar las pruebas de funcionamiento del suministro de voltaje y frecuencia variables en los puestos de trabajo.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar por medio de un diagrama unifilar los sistemas de fuerza, control y medición que componen el equipo Ward Leonard.
- Diagnosticar el estado actual del equipamiento Ward Leonard.
- Elaborar y ejecutar el plan de mantenimiento correctivo integral de todos los sistemas que componen el panel variador de frecuencia, para entregarlo enteramente operativo.
- Realizar y documentar las pruebas individuales sobre todos los elementos de fuerza que componen el equipo Ward Leonard siendo estos: Motor de AC, Generador DC, Motor DC y Generador AC.

## **1.2 Alcance**

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal entregar al Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional, el equipamiento Ward Leonard, en completa operación, con un sistema de control completo y confiable.

En razón a esto, se realiza un mantenimiento correctivo y preventivo, según corresponda, a todos los dispositivos, elementos y equipos constitutivos encontrados en el tablero de control Siemens, concretamente sobre el panel # 5, correspondiente al equipamiento Ward Leonard.

Se realiza un análisis exhaustivo del equipamiento, en conjunto parte eléctrica y mecánica, para determinar su condición actual y detallar el plan de mantenimiento correctivo para la

puesta en operación; acompañado de pruebas de funcionamiento independientes con la finalidad de conocer sus parámetros de funcionamiento.

Complementariamente se reestructura el cuarto de máquinas con mejoras en las medidas de seguridad y operación para los tres acoples motrices ubicados en su interior, junto a la implementación de un tablero de operación, medida y control directo del sistema de generación de voltaje y frecuencia variables Ward Leonard.

### **1.3 Marco Teórico**

Como eje transversal del desarrollo del presente trabajo se tiene al equipamiento Ward Leonard el cual está constituido por dos grandes arreglos de máquinas eléctricas con diferentes características y modos de funcionamiento.

Si bien el comportamiento y las características de cada máquina se lo detalla a continuación; se deja ligeramente de lado su constitución física por el momento, pues resulta importante conocer el papel que juega el campo magnético en los procesos de conversión de energía eléctrica.

El campo magnético puede ser generado con un imán permanente o mediante una bobina (devanado); este último con la ventaja de producir campos con magnitud en función del tiempo (AC) o de magnitud constante (DC). En los transformadores, el campo magnético es la vía que da apertura a la transferencia de energía, bajo el principio de inducción electromagnética, para transferirla desde el lado primario hacia el secundario [1].

Al interior de las máquinas eléctricas, es el campo magnético constante y uniforme el agente encargado de facilitar la conversión de energía eléctrica a energía mecánica (motor) y de igual forma en el sentido contrario (generador).

Ambas acciones de motor y generador, existen en forma simultánea en este sistema convertidor de energía; por lo tanto, resulta evidente tomar como punto de partida el análisis y entendimiento de los campos electromagnéticos.

### 1.3.1 El Conjunto Ward Leonard

El conjunto Ward Leonard fue diseñado en 1891 por el ingeniero estadounidense Harry Ward Leonard, con la finalidad de entregar un método efectivo para controlar la velocidad de un motor DC.

Introducir en el circuito de armadura una resistencia externa en serie equivale a aplicar un voltaje menor sobre estos terminales, teniendo así control sobre la velocidad del motor DC; la ventaja de este método se da al eliminar la excesiva pérdida de potencia inherente a variar la resistencia de armadura y en contra parte se requiere dos fuentes de energía para el funcionamiento completo.

Para este conjunto se utiliza entonces un motor trifásico de inducción que sirve de impulsor primario para el generador DC, que a su vez suministra un voltaje constante a los devanados de campo del motor DC. Independientemente se tiene control sobre cada una de las corrientes de campo a través de los circuitos externos, permitiendo el completo control de la velocidad de dicho motor.

Hasta este punto se ha logrado controlar la velocidad de un eje, si a este eje se aplica un generador sincrónico se está hablando de entrar directamente a ejercer control sobre la frecuencia del voltaje generado en este, y así obtener el mayor beneficio del conjunto Ward Leonard, el de obtener energía eléctrica con parámetros ajustable de frecuencia y voltaje.

El detalle completo de funcionamiento y control se detalla en profundidad a partir del capítulo 2, por lo que se procede a exponer las bases teóricas en las que se fundamentan las máquinas eléctricas que conforman el conjunto.

La teoría fundamental de campo electromagnético tiene su base en las cuatro ecuaciones propuestas por Maxwell, las cuales se presentan brevemente a continuación [1].

1. Ley de Faraday; Fenómeno de Inducción Electromagnética:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{ó} \quad \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \partial \vec{s} \quad (1)$$

2. Ley de Ampère; Fenómeno de Conservación de la Carga:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{ó} \quad \oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_s \vec{J} \cdot \partial \vec{s} + \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \partial \vec{s} \quad (2)$$

3. Ley de Gauss para el Campo Magnético, Fenómeno de Inducción Magnética:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{ó} \quad \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3)$$

4. Ley de Gauss para el Campo Eléctrico; Fenómeno de Inducción Eléctrica:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad \text{ó} \quad \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_v \rho dv \quad (4)$$

Donde:

- $\vec{E}$ : Intensidad de campo eléctrico [ V/m]
- $\vec{B}$ : Densidad de flujo magnético [ T] ó [ Wb/m<sup>2</sup>]
- $\vec{H}$ : Intensidad de campo magnético [ A/m]
- $\vec{D}$ : Densidad de flujo eléctrico [ C/m<sup>2</sup>]
- $\vec{J}$ : Densidad de corriente [ A/m<sup>2</sup>]
- $\rho_v$ : Densidad volumétrica de carga [ C/m<sup>3</sup>]

Nótese que, en las integrales anteriormente expuestas,  $s$  es la superficie abierta limitada por un contorno no cerrado  $c$  ; y a su vez,  $v$  corresponde al volumen limitado por una superficie cerrada  $s$ .

Es importante mencionar que las cuatro ecuaciones se relacionan entre ellas por la ecuación de continuidad o también conocida como Ley de Conservación de la Carga:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (5)$$

A la par se tiene la ecuación de Fuerza de Lorentz que define la fuerza experimentada por una carga  $q$  moviéndose dentro de un campo eléctrico  $\vec{E}$  y un campo magnético  $\vec{B}$ ; a una velocidad  $v$ :

$$\vec{F} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}] \quad (6)$$

Cabe en este punto mencionar que  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  son campos fundamentales; mientras  $\vec{D}$  y  $\vec{B}$  son campos derivados, que se vinculan con los fundamentales; por las siguientes relaciones constitutivas:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (8)$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \approx \frac{10^{-9}}{36 \pi} \left[ \frac{F}{m} \right] \quad (9)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad (10)$$

Donde:

- $\epsilon$ : Permitividad magnética
- $\epsilon_r$ : Constante dieléctrica del material
- $\epsilon_0$ : Permitividad magnética del espacio libre
- $\mu$ : Permeabilidad magnética
- $\mu_r$ : Permeabilidad magnética del medio
- $\mu_0$ : Permeabilidad magnética del espacio libre

### 1.3.2 Fuerza Electromotriz Inducida

La ecuación (1) representa la fuerza electromotriz inducida (fem) en una espira cerrada estacionaria, debido a la variación respecto al tiempo del flujo magnético; y resulta un caso especial de la ley de Faraday.

$$e = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \partial \vec{s} \quad (11)$$

La ecuación de transformación (11) en forma integral, se la denomina fem de transformación pues se basa en la trayectoria cerrada y estacionaria; si ahora el conductor, se mueve con una velocidad  $\vec{v}$ , dentro de un campo magnético  $\vec{B}$ , se inducirá una fem adicional, denominada fem de movimiento:

$$e_m = \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl} \quad (12)$$

Esta nueva fem es inducida por el movimiento del conductor al interior del campo magnético, es decir que es la fem inducida por una acción de corte en las concatenaciones de flujo.

Para una espira cerrada, moviéndose en el campo magnético, la fem total inducida es el resultado de sumar la fem de transformación y la fem de movimiento se obtiene entonces la definición matemática de la ley de inducción de Faraday:

$$e_t = \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \partial \vec{s} \quad (13)$$

o también:

$$e_t = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (14)$$

$$\Phi = \int_s \partial \vec{B} \cdot \partial \vec{s} \quad (15)$$

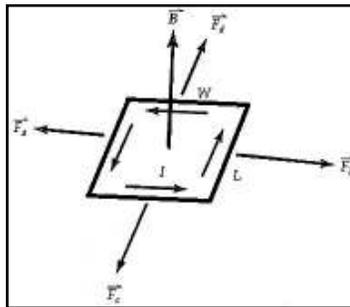
El flujo total que pasa a través de la espira es  $\Phi$ . Las ecuaciones (13) y (14) muestran la fem inducida en una espira cerrada con una sola vuelta, en el caso de las máquinas eléctricas, las bobinas tienen  $N$  vueltas, por lo cual, a fin de utilizar las ecuaciones, basta multiplicar por  $N$ , pues la fem resultante del conjunto es  $N$  veces mayor.

### 1.3.3 Par Inducido en Espira Portadora de Corriente

Al interior de la máquina, los conductores se unen entre sí, formando espiras. Una espira de este tipo se presenta en la Figura 1, en la cual el campo se encuentra en forma perpendicular a la espira, en este ejemplo se utiliza la ecuación de la Ley de la Fuerza de Ampère expuesta a continuación:

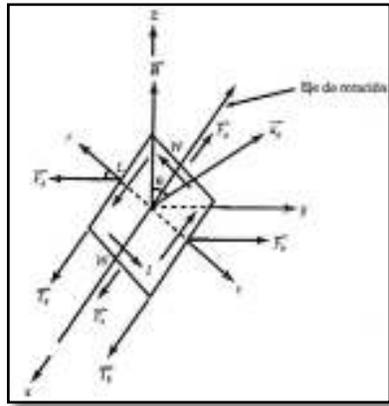
$$\vec{F} = \int_c I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (16)$$

De esta manera se puede obtener la fuerza que actúa sobre cada lado de la espira, a su vez sus líneas de acción son las mismas, pero de sentido contrario, por lo cual la fuerza neta resulta 0.



**Figura 1.** Espira Perpendicular al Campo Magnético Uniforme [1]

En un segundo caso se orienta la espira de tal manera que forme un ángulo  $\theta$  con el campo ( $\vec{B}$ ), como se puede observar en la Figura 2; en este caso las fuerzas que actúan en cada lado de longitud “W” siguen siendo las mismas y sus líneas de acción de igual manera, provocando que la fuerza neta en la dirección del eje X sea cero.



**Figura 2.** Espira Orientada con Ángulo  $\theta$  al Campo Magnético Uniforme [1]

Sin embargo, al analizar los lados de longitud “L”, se puede observar claramente que las líneas de acción de fuerza no coinciden; obteniéndose una fuerza neta diferente de cero, esto sumado a que la espira se encuentra libre para girar sobre su eje, tendría como efecto el giro en sentido antihorario.

Se tiene entonces que, para un campo magnético constante, la fuerza aplicada en los conductores; superior (a) e inferior (b) son:

$$\vec{F}_a = -BIL \vec{a}_y \quad \vec{F}_b = -BIL \vec{a}_y$$

Por definición, el par se obtiene del producto vectorial de  $\vec{r} \times \vec{F}$ , de lo cual se obtiene:

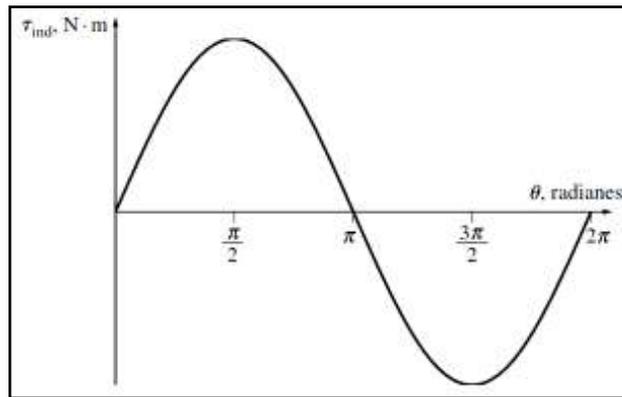
$$\vec{T}_a = BIL \left(\frac{W}{2}\right) \sin \theta \vec{a}_x \quad \vec{T}_b = BIL \left(\frac{W}{2}\right) \sin \theta \vec{a}_x$$

$$\vec{T}_a + \vec{T}_b = BIA \sin \theta \vec{a}_x = \vec{T}$$

Siendo A, el área de la espira ( $W \times L$ ), este par resultante tiende constantemente a volver a posicionar la espira nuevamente en posición perpendicular al campo  $\vec{B}$  (alineación de campos); y en una forma más generalizada para N espiras se obtiene la ecuación fundamental de desarrollo de par en máquinas rotativas:

$$\vec{T} = BIAN \sin \theta \vec{a}_x \tag{17}$$

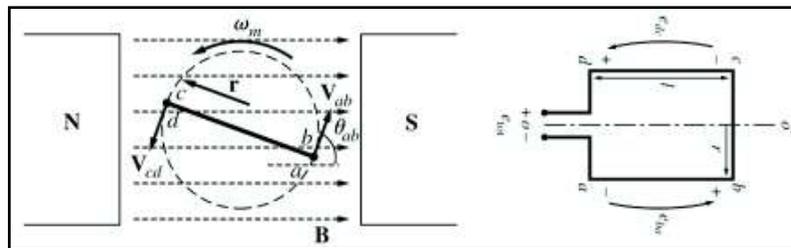
Una vez que se obtuvo esta relación es posible realizar su respectiva representación gráfica, como se presenta en la Figura 3.



**Figura 3.** Gráfica de Torque Inducido en función de  $\theta$  [1]

### 1.3.4 Voltaje Inducido en Espira Rotativa

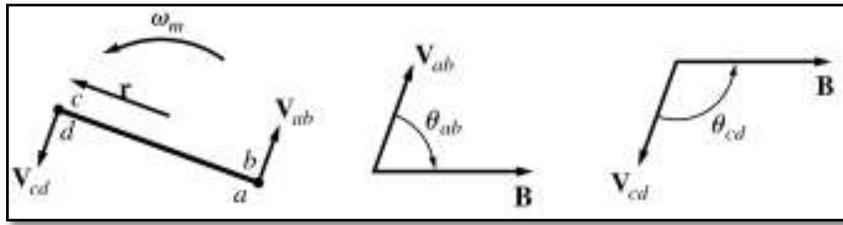
A continuación, se determina los voltajes presentes en los terminales de una espira, al estar girando dentro de un campo magnético. Una espira rectangular, como se muestra en la Figura 4, contenida en un campo magnético constante y uniforme con dirección de izquierda a derecha [2].



**Figura 4.** Espira al Interior del Campo Magnético (Rotor) [1]

Para determinar el voltaje total  $e_t$ , se calcula el resultante en cada tramo y sumados se tiene el total; para este fin se toma como punto de partida la ecuación (18). En la Figura 5 se muestra las velocidades y orientaciones sobre los lados de la espira, así como las direcciones de movimiento con respecto al campo magnético de los lados ab y cd respectivamente.

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot I \quad (18)$$



**Figura 5.** Velocidades Orientaciones y Dirección de Movimiento de la Espira [1]

Empezando con el segmento ab y cd, en los cuales la velocidad es tangencial a la trayectoria y  $\vec{B}$  va de izquierda a derecha; con la diferencia de que su resultante tiene sentidos opuestos se obtiene simultáneamente:

$$e_{ab} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot I = vBI \sin \theta_{ab} \quad (\text{dirección hacia adentro})$$

$$e_{dc} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot I = vBI \sin \theta_{cd} \quad (\text{dirección hacia afuera})$$

En contraste, al tomar los segmentos bc y da,  $\vec{v} \times \vec{B}$  resulta perpendicular a  $I$ ; con lo que se simplifica al ser:

$$e_{bc} = e_{da} = 0$$

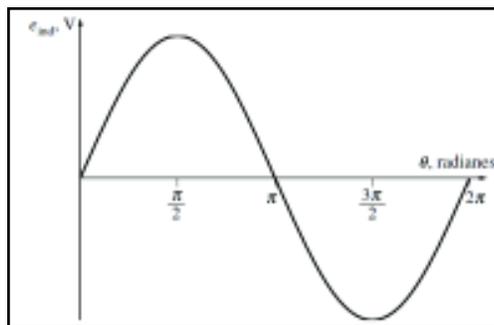
En conjunto y considerando que  $\theta_{ab} = 180^\circ - \theta_{cd}$ ; además empleando la identidad trigonométrica  $\sin \theta = \sin 180^\circ - \theta$ , se tiene:

$$e_{ind} = e_{ab} + e_{dc} + e_{bc} + e_{da}$$

$$e_{ind} = vBI \sin \theta_{ab} + vBI \sin \theta_{cd}$$

$$e_{ind} = 2vBI \sin \theta \quad (19)$$

Al igual que lo expuesto con el par, ahora que se obtuvo la ecuación (19), es factible su representación gráfica en función de  $\theta$ . Figura 6.



**Figura 6.** Gráfica de Voltaje Inducido en función de  $\theta$  [1]

El voltaje generado en la espira es senoidal, cuya magnitud es el producto de la velocidad de rotación del rotor con el flujo de la misma, influenciado a su vez por una constante que representa la forma constructiva de la máquina.

### **1.3.5 Generadores Sincrónicos**

Por definición un generador es un dispositivo conversor de energía mecánica a energía eléctrica AC, con voltaje y frecuencia específicos; el cual está fundamentado en la teoría electromagnética expuesta en las secciones anteriores. La frecuencia eléctrica de la energía generada, está sincronizada con la tasa mecánica de rotación de su eje; de aquí procede el término sincrónico, del cual deriva su nombre.

De igual manera la tasa mecánica de rotación del eje junto a la magnitud del flujo producido en los devanados de campo; se relacionan directamente con el voltaje interno generado, el cual será diferente al voltaje de fase de la máquina, por efectos de resistencia y reactancia interna de los devanados del inducido.

El régimen de operación de un generador sincrónico; tiene sus limitaciones, las cuales definen una zona de operación segura, que se especifica más adelante (1.3.5.9).

En operación en solitario, la carga es quien impone las condiciones de suministro de potencia activa ( $P$ ) y reactiva ( $Q$ ), mientras que el mecanismo regulador de la velocidad de rotación del eje, es quien controla la frecuencia ( $f$ ) y por último la corriente de campo tiene el mismo efecto de control sobre el voltaje proporcionado a la carga ( $v$ ).

En breve, en el párrafo anterior se ha descrito la operación del generador sincrónico QF 1292 – 4 (ME 001<sub>4</sub>) disponible en el anexo1; el cual conforma el arreglo Ward Leonard y es el encargado de suministrar voltaje y frecuencia variable a todos los puestos de trabajo en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN.

Si este generador es conectado al sistema de barra infinita, serían los parámetros de ajuste del mecanismo regulador de velocidad del eje (motor DC del Equipo Ward Leonard), quienes definirían los flujos de potencia activa y reactiva, suministradas hacia la barra infinita, por la máquina sincrónica.

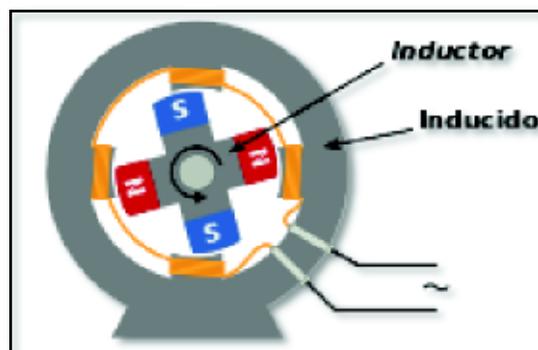
### 1.3.5.1 Generalidades Constructivas

Para que pueda existir una conversión electromecánica de energía, se requiere de un campo magnético, en este caso concreto el campo es producido en el rotor; por lo general con dos variantes, pues puede obtenerse por diseño del rotor como un imán permanente o con el empleo de una fuente DC sobre su devanado teniendo un electroimán, al que se lo conoce en forma general como devanado de campo, devanado del rotor o devanado inductor.

Si la configuración es con circuito de campo independiente conectado al rotor, es necesario un método para que la corriente DC llegue a los devanados de campo, aquí es donde toman lugar los anillos rozantes y las escobillas (Figura 8).

Una escobilla es un bloque de grafito-carbón, que con ayuda de resortes cierra un circuito eléctrico con los anillos rozantes y el rotor. Este circuito conduce electricidad libremente con una fricción muy baja, esto asegura aplicar el mismo voltaje DC a todo el devanado de campo (inductor) independientemente de la posición angular o velocidad del rotor.

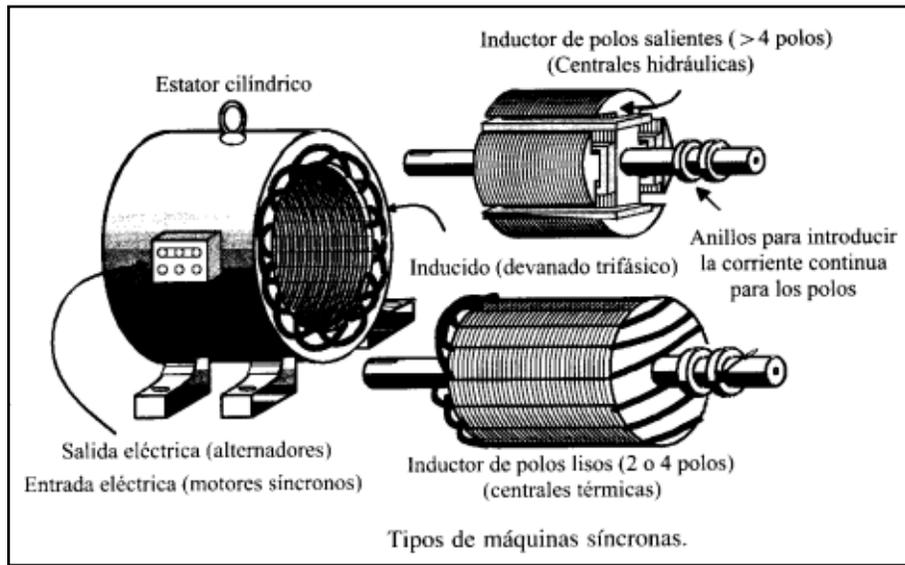
Teniendo cualquiera de estas dos combinaciones es lógico deducir que el giro del eje (acople mecánico a una fuente motriz independiente) es el causante de la presencia de un campo magnético giratorio al interior de la máquina y así obtener un voltaje trifásico inducido en los devanados del estator del generador; a los que se denomina devanados del inducido o del estator, como se aprecia en forma simplificada en la Figura 7.



**Figura 7.** Distribución de Devanados al Interior del Generador Síncrono [3]

En la Figura 7, se nota que el rotor del generador síncrono consta de polos magnéticos; existen dos tipos de rotor, de polos salientes, en el cual los polos se encuentran montados sobre el eje motriz; y de polos no salientes o mejor conocidos como rotores cilíndricos, en los cuales los polos están constituidos al mismo nivel de la superficie del eje.

La Figura 8 muestra de manera clara esta distinción entre polos lisos y polos salientes.



**Figura 8.** Tipos de Rotores del Generador Síncrono [3]

Por lo regular, los rotores cilíndricos se utilizan en máquinas de dos o cuatro polos, mientras que cuando se necesita más de 4 polos, se cambia a un rotor de polos salientes. Esto se relaciona con la ecuación de velocidad síncrona en generadores (20).

La construcción física del rotor toma en cuenta la consideración de que se encuentra sometido a campos magnéticos variables, por lo cual se utilizan láminas delgadas con el fin de reducir las pérdidas por corrientes parásitas en su contorno.

### 1.3.5.2 Velocidad de Rotación

Analizar la velocidad de rotación, conlleva un análisis muy simple, pero a su vez, es de gran ayuda para determinar el comportamiento de la máquina síncrona, e incluso predecirlo. La frecuencia eléctrica se relaciona con la tasa mecánica de rotación del eje, como se indica en la ecuación (20).

$$f = \frac{n_s \cdot P}{120} \quad \text{o} \quad n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (20)$$

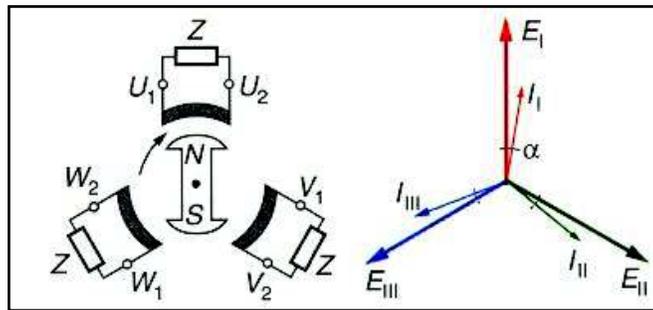
Donde:

- $n_s$ : Velocidad sincrónica de la máquina [rpm]
- $f$ : Frecuencia del voltaje generado [Hz]
- $p$ : Número de polos del rotor

Al ser la velocidad de giro del rotor idéntica a la velocidad que lleva el campo magnético se puede establecer esta relación entre la frecuencia del voltaje generado y su velocidad, por lo cual es ideal para montarse en un arreglo variador de velocidad como el conjunto Ward Leonard, cuyo funcionamiento se describe en detalle más adelante en la sección 2.2.

### 1.3.5.3 Voltaje Interno Generado

En esta sección se determina una ecuación para el voltaje eficaz inducido a los devanados, para el efecto se parte del esquema simplificado de la Figura 9.



**Figura 9.** Esquema Simplificado de la Distribución de Devanados en Generador Sincrónico [4]

Se dispone de tres bobinas distribuidas a  $120^\circ$ , cada una alrededor del rotor (campo magnético giratorio) con  $N$  vueltas, se tiene:

$$e_{aa'} = N \cdot \Phi \cdot w \cdot \text{sen}(wt) \quad [V] \quad (21)$$

$$e_{bb'} = N \cdot \Phi \cdot w \cdot \text{sen}(wt - 120^\circ) \quad [V] \quad (22)$$

$$e_{cc'} = N \cdot \Phi \cdot w \cdot \text{sen}(wt + 120^\circ) \quad [V] \quad (23)$$

Analizando únicamente el voltaje pico en cualquier fase del estator se simplifica como:

$$E_{max} = N \cdot \Phi \cdot w \quad (24)$$

Debido a que  $\omega = 2\pi f$ , (24) se puede expresar como:

$$E_{max} = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot \Phi \cdot f \quad (25)$$

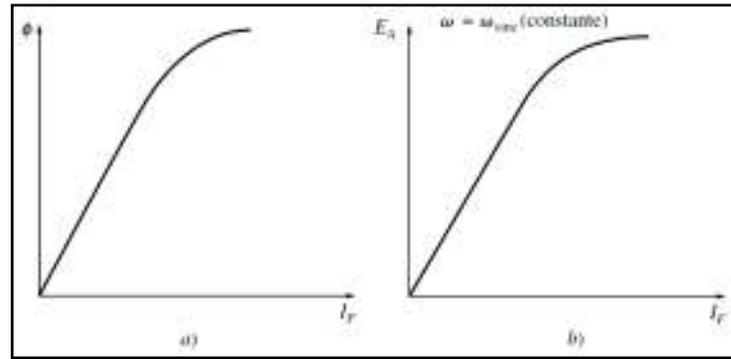
Resultando el voltaje RMS en cualquier fase:

$$E_A = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \Phi \cdot f \quad (26)$$

$$E_{rms} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N \cdot \Phi \cdot f; \text{ Si la conexión de devanados es } \Delta \quad (27)$$

$$E_{rms} = \sqrt{6} \cdot \pi \cdot N \cdot \Phi \cdot f; \text{ Si la conexión de devanados es } Y \quad (28)$$

El voltaje interno generado E, es directamente proporcional a la velocidad y al flujo, el cual a su vez depende de la intensidad de corriente DC circulante en el devanado de campo ubicado en el rotor de la máquina síncrona. [5]



**Figura 10.** Relación Voltage Generado-Corriente de Campo en Generador Síncrono [1]

En la Figura 10a, se expresa que a una mayor corriente DC en el devanado de campo, se obtiene un mayor flujo; mientras que, el flujo es directamente proporcional al voltaje generado (26), se obtiene la curva característica de circuito abierto o curva de magnetización, Figura 10b.

### 1.3.5.4 Circuito Equivalente

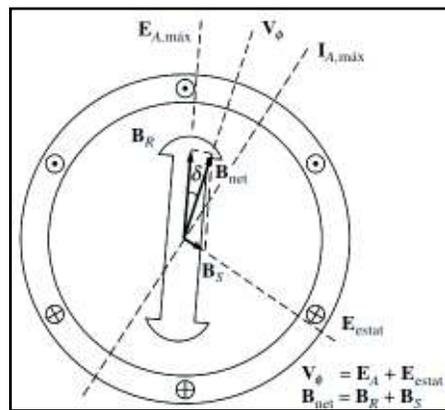
En la sección 1.3.5.3 se dedujo una ecuación que determina el voltaje interno del generador síncrono  $E$ ; en una máquina real, este valor no es el mismo que se obtiene en los terminales del generador, pues se tiene factores a considerar.

Uno de los fenómenos se denomina la reacción del inducido, el cual representa una distorsión del campo magnético del entrehierro del generador ( $B_R$ ) ocasionado por la corriente presente en el estator.

Expuesto de otra manera, partiendo del voltaje inducido interno del generador ( $E_A$ ); al tener una carga en los terminales del generador, existe ahora una corriente por el estator trifásico que produce su propio campo magnético ( $B_S$ ), este nuevo campo distorsiona el campo original y altera el voltaje terminal ( $V_\phi$ ) con la aparición de un nuevo voltaje en el estator ( $E_S$ ), como se aprecia en la Figura 11.

$$E_A = V_\phi ; \quad \text{Operando en vacío}$$

$$E_A + E_S = V_\phi \quad \text{y} \quad B_R + B_S = B_T ; \quad \text{Operación Normal}$$

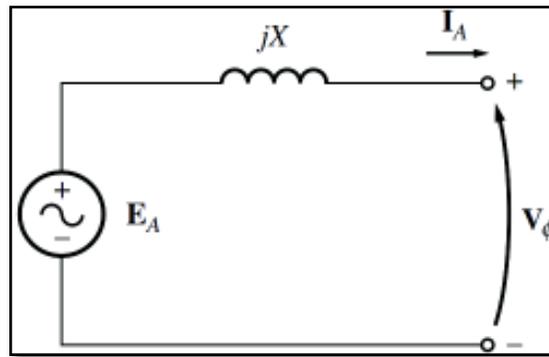


**Figura 11.** Voltajes y Corrientes Resultantes en Operación del Generador Sincrónico [2]

El fenómeno de inducción electromagnética también aporta en esta problemática, pues se tiene la reacción de armadura, que hace referencia a la auto inductancia en las bobinas del inducido.

Para poder entender de mejor manera estos efectos y agregar las resistencias de los bobinados de inducido se propone la obtención de un circuito equivalente del generador sincrónico. Se introduce una constante  $X$  que indica la proporcionalidad entre  $E_S$  e  $I_A$ .

$$V_\phi = E_A - j \cdot X \cdot I_A \quad (29)$$



**Figura 12.** Circuito Simplificado del Generador Síncrono [2]

Relacionando esta ecuación con la Ley de Voltaje de Kirchhoff, se puede representarla en forma de circuito como se aprecia en la Figura 12.

Las bobinas del estator tienen una autoinductancia y resistencia; para este análisis se define  $X_A$  como la reactancia y  $R_A$  la resistencia de las bobinas:

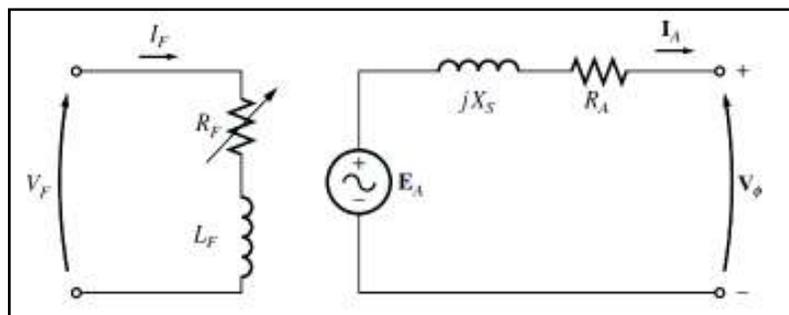
$$V_\phi = E_A - j \cdot X \cdot I_A - j \cdot X_A \cdot I_A - R_A \cdot I_A \quad (30)$$

Para simplificar (30), se toma en consideración la reacción del inducido, así como la autoinductancia se pueden representar conjuntamente en la reactancia sincrónica:

$$X_S = X + X_A \quad (31)$$

$$V_\phi = E_A - j \cdot X_S \cdot I_A - R_A \cdot I_A \quad (32)$$

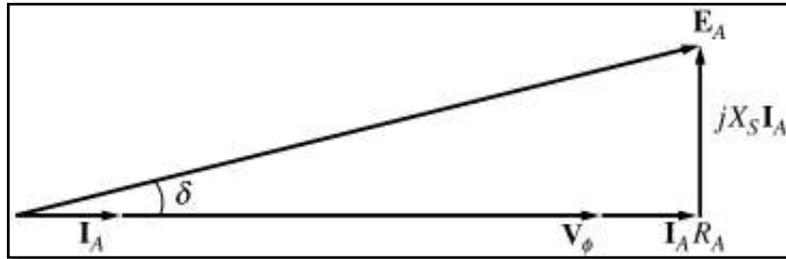
Se obtiene el circuito equivalente de la Figura 13, con la incorporación de una fuente DC externa  $V_F$ , tal y como está implementado en el equipamiento Ward Leonard.



**Figura 13.** Circuito Equivalente del Generador Síncrono [2]

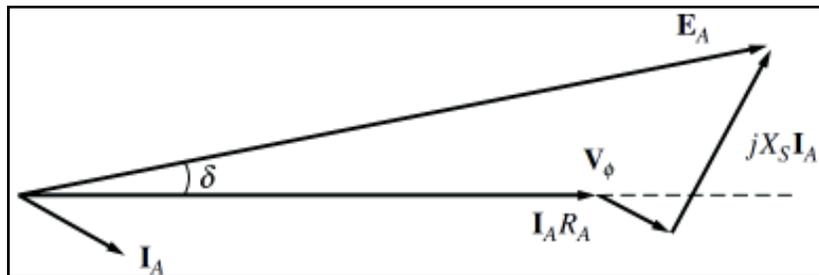
### 1.3.5.5 Diagramas Fasoriales

- Factor de Potencia Unitario, Carga Resistiva.



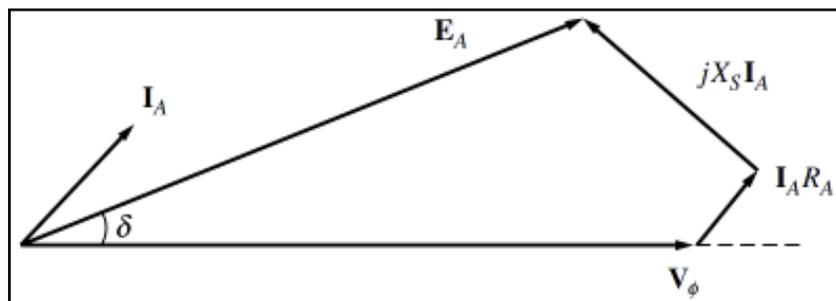
**Figura 14.** Diagrama Fasorial Generador Sincrónico,  $fp=1$  [2]

- Factor de Potencia en Atraso, Carga Inductiva.



**Figura 15.** Diagrama Fasorial Generador Sincrónico,  $fp$  en retraso [2]

- Factor de Potencia en Adelanto, Carga Capacitiva.

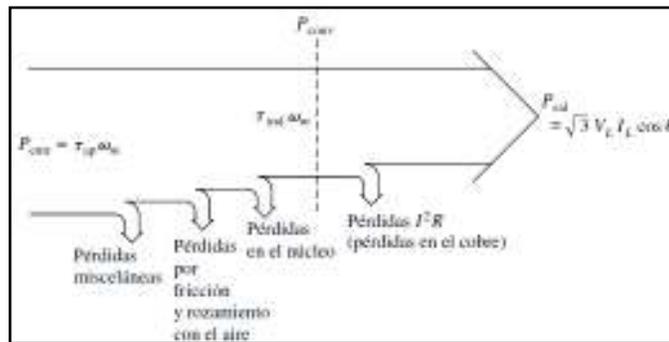


**Figura 16.** Diagrama Fasorial Generador Sincrónico,  $fp$  adelanto [2]

### 1.3.5.6 Potencia y Par

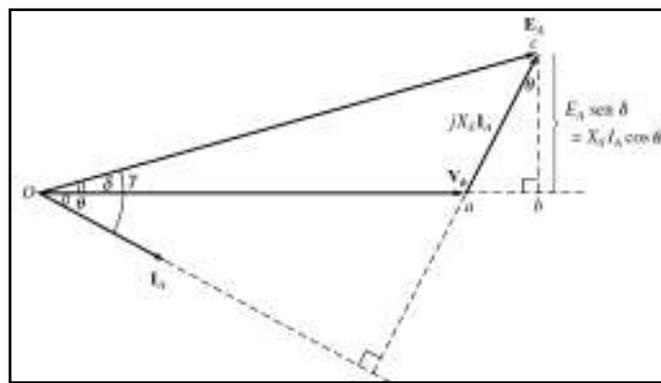
El conversor de energía en análisis, toma la potencia mecánica de un motor de DC para convertirla en energía eléctrica y suministrarla al laboratorio. Idealmente con una eficiencia de cien por ciento esto sería así, pero en la práctica esto no sucede.

La diferencia enunciada, se debe a las pérdidas de potencia que existen en el proceso de conversión electromecánica de energía ilustrado en la Figura 17.



**Figura 17.** Flujo de Potencia del Generador Síncrono [2]

Para una mejor expresión de la potencia de salida, se desprecia la resistencia del inducido  $R_A$ , ( $X_S \gg R_A$ ) obteniéndose diagrama fasorial de la Figura 18.



**Figura 18.** Diagrama Fasorial Simplificado del Generador Síncrono [2]

De la Figura 18 se puede obtener:

$$I_A \cdot \cos \theta = \frac{E_A \cdot \text{sen } \delta}{X_S} \quad (33)$$

Y reemplazando en:

$$P_{sal} = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_A \cdot \cos \theta \quad (34)$$

Se tiene:

$$P_{conv} = \frac{3 \cdot V_{\phi} \cdot E_A}{X_S} \cdot \sen \delta \quad (35)$$

Donde  $\delta$ , el ángulo entre  $V_{\phi}$  y  $E_A$ , se lo denomina como ángulo interno de la máquina; si  $\delta = 90^\circ$ ,  $\sen \delta = 1$ , se obtiene la máxima potencia de la máquina conocido como límite de estabilidad en estado estable (36).

$$P_{MAX} = \frac{3 \cdot V_{\phi} \cdot E_A}{X_S} \quad (36)$$

Previamente se definió el torque inducido en una espira, si ahora se considera:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \cdot \omega_m \quad (37)$$

El torque inducido se puede expresar como:

$$\tau_{ind} = \frac{V_{\phi} \cdot E_A}{X_S \cdot \omega_m} \cdot \sen \delta \quad (38)$$

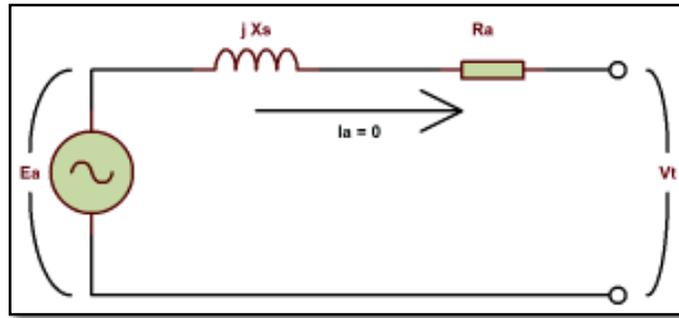
### 1.3.5.7 Medición de Parámetros

Previamente en la sección 1.3.5.4, se dedujo un circuito equivalente que recoge todos los aspectos constructivos y de funcionamiento del generador sincrónico; es necesario entonces completar ese análisis determinando cada uno de sus parámetros (Figura 13). Para esto se establecen las pruebas que se detallan a continuación:

- Prueba de Circuito Abierto

Esta prueba que se ilustra en la Figura 19, permite encontrar la relación entre el voltaje medido en los terminales de la máquina y la corriente de campo. Si el generador está operando sin carga, el circuito está abierto; por lo cual el voltaje medido en los terminales corresponde al voltaje interno de la máquina.

Así se representa la relación entre la componente fundamental del flujo en el entrehierro y la fuerza magnetomotriz denominada curva de magnetización.

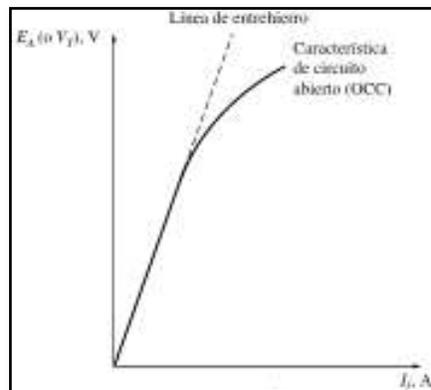


**Figura 19.** Prueba de Circuito Abierto del Generador Sincrónico

Expresado gráficamente se tiene al generador sin carga en los terminales, entonces:

$$I_A = 0 ; V_\phi = E_A$$

Con estas expresiones es posible graficar la curva característica de circuito abierto OCC, para obtener  $E_A$ , dada cualquier corriente de campo  $I_F$ . Figura 20.



**Figura 20.** Curva Característica de Circuito Abierto del Generador Sincrónico [2]

En la Figura 20 se muestra que el inicio de la curva de magnetización es lineal, hasta un punto que llega a una saturación con  $I_F$  más grandes.

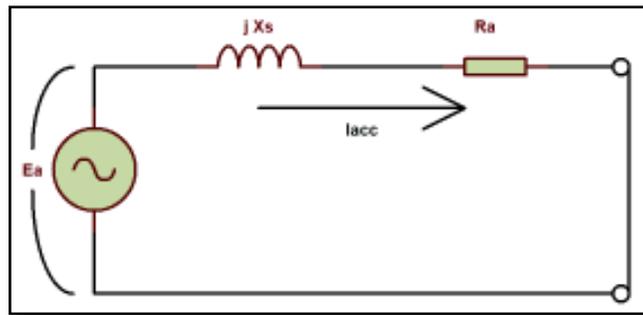
Esto se debe a que en principio toda la fuerza magnetomotriz pasa a través del entrehierro, pues la reluctancia del entrehierro es mucho mayor a la del hierro no saturado del marco de la máquina sincrónica, esta sección de la Figura 20 se denomina línea de entrehierro.

Cuando se llega al punto de saturación, la reluctancia del entrehierro aumenta significativamente haciendo que el flujo incremente cada vez menos a  $I_F$  mayores.

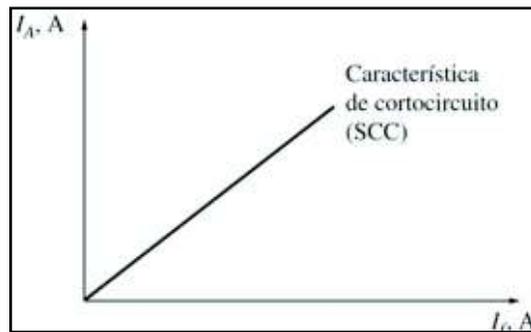
- Prueba de Corto Circuito

Para esta segunda prueba se deben establecer dos condiciones, la primera una corriente de campo  $I_F$  igual a cero; y que los terminales del generador estén cortocircuitados a través de amperímetros AC.

Se aumenta gradualmente la corriente de campo  $I_F$  y se toma medidas de la corriente de inducido  $I_A$ . De esta manera, complementaria a la prueba de circuito abierto, se obtiene la curva característica de cortocircuito SCC. Gráficamente se lo detalla en las Figuras 21 y 22.



**Figura 21.** Prueba de Corto Circuito del Generador Síncronico



**Figura 22.** Curva Característica de Corto Circuito del Generador Síncronico [2]

La SCC indica una relación directamente proporcional entre el voltaje del entrehierro y el flujo resultante. Lo cual conduce a deducir que la máquina está trabajando en la zona lineal de la curva de magnetización y es por esto que la relación entre la corriente de cortocircuito y de excitación es una línea recta.

- Cálculo de la Reactancia Síncrona

Del circuito de la Figura 21, se obtiene la magnitud de  $I_A$ :

$$I_A = \frac{E_A}{R_A + j \cdot X_S} \quad (39)$$

Si  $Z_s$ , se define como el módulo de  $R_A + j \cdot X_s$ , se tiene las siguientes expresiones de reactancia sincrónica:

$$Z_s = \frac{E_A}{I_A} \quad y \quad X_s \gg R_A$$

$$X_s = \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\emptyset \text{Circuito Abierto}}}{I_{\text{Corto Circuito}}} \quad (40)$$

Nótese que, este método resulta exacto solo cuando la máquina está trabajando en la zona lineal de la curva OCC, es decir en la línea del entrehierro, antes del punto de saturación.

Un término muy usado, que no aporta información adicional, es la relación de cortocircuito, la cual expresa la relación entre la corriente de campo requerida para alcanzar voltaje nominal en circuito abierto, con la corriente de inducido nominal en cortocircuito.

Esta cantidad es el valor inverso al valor p.u. de la reactancia sincrónica obtenida anteriormente.

### 1.3.5.8 Análisis Variacional de P y Q

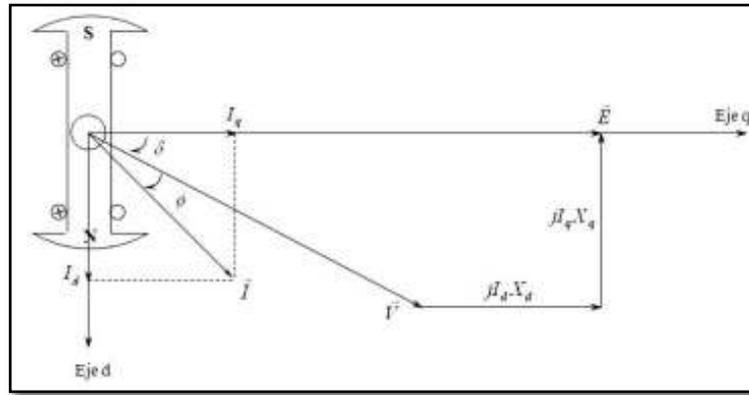
En esta sección se deduce las ecuaciones de potencia activa y reactiva entregadas por el generador sincrónico, considerando el tipo de rotor que la compone.

Estas ecuaciones resultan de gran utilidad para encontrar la respuesta de las variables en función a la variación de uno o más parámetros.

Una clara aplicación de este análisis es el conjunto Ward Leonard, pues una variación en cualquiera de sus componentes, puede tener uno o más efectos sobre la energía eléctrica suministrada.

- Rotor Polos Salientes

Del diagrama fasorial correspondiente al generador sincrónico con rotor de polos salientes indicado en la Figura 23, se obtienen tres relaciones usadas como punto de partida.



**Figura 23.** Diagrama Fasorial del Generador Sincrónico con Rotor de Polos Salientes [2]

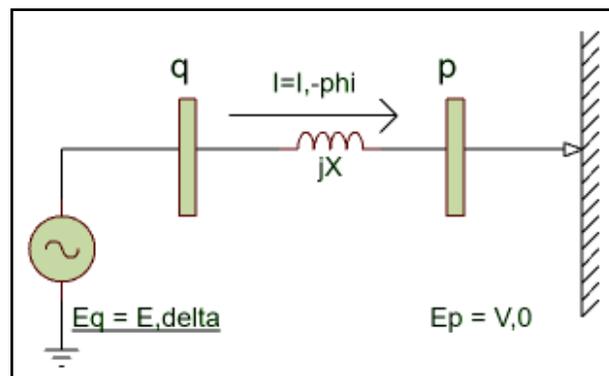
- ✓  $\vec{I} = \vec{I}_d + \vec{I}_q$
- ✓  $V \sin \delta = X_q I_q$
- ✓  $E - V \cos \delta = X_d I_d$ .

La corriente en los ejes de cuadratura y directo, se pueden expresar utilizando las ecuaciones obtenidas del diagrama fasorial, de esta manera:

$$\vec{I}_q = \frac{V \sin \delta}{X_q} \angle \delta \quad (41)$$

$$\vec{I}_d = \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \angle \delta - 90 \quad (42)$$

La Figura 24 representa el flujo de potencia de un generador de polos salientes, conectado a la barra infinita.



**Figura 24.** Flujo de Potencia del Generador Sincrónico con Rotor de Polos Salientes

Para calcular la potencia aparente se tiene:

$$S = V * I^* = V * (\vec{I}_d + \vec{I}_q)^* \quad (43)$$

$$S = V \left[ \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \angle \delta - 90 + \frac{V \sin \delta}{X_q} \angle \delta \right]$$

$$S = V \left[ j \left( \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \right) (\cos \delta - j \sin \delta) + \frac{V \sin \delta}{X_q} (\cos \delta - j \sin \delta) \right]$$

$$S = V \left[ j \left( \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \right) + \frac{V \sin \delta}{X_q} \right] (\cos \delta - j \sin \delta) \quad (44)$$

Para la potencia activa, basta con saber que:  $P = Real\{S\}$ .

$$P = V \left[ \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \sin \delta + \frac{V \sin \delta \cos \delta}{X_q} \right]$$

$$P = \frac{EV}{X_d} \sin \delta - \left( \frac{V^2}{X_d} - \frac{V^2}{X_q} \right) \sin \delta \cos \delta$$

Finalmente:

$$P = \frac{EV}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (45)$$

Para la potencia reactiva, se toma de igual forma,  $Q = Imaginario\{S\}$ .

$$Q = V \left[ \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \cos \delta - \frac{V (\sin \delta)^2}{X_q} \right]$$

$$Q = \frac{EV}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \cos \delta^2 - \frac{V^2}{X_q} (1 - \cos \delta^2)$$

$$Q = \frac{EV}{X_d} \cos \delta - V^2 \left( \frac{\cos \delta^2}{X_d} - \frac{\cos \delta^2}{X_q} \right) - \frac{V^2}{X_q}$$

Utilizando la identidad trigonométrica  $\cos 2\delta^2 = \frac{\cos 2\delta + 1}{2}$ , Se tiene:

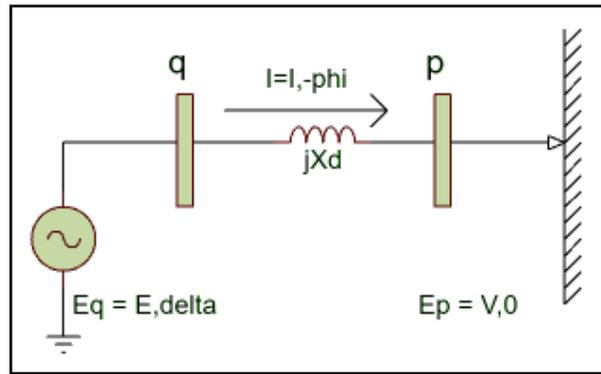
$$Q = \frac{EV}{X_d} \cos \delta - V^2 \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \frac{\cos 2\delta + 1}{2} - \frac{V^2}{X_q}$$

$$Q = \frac{EV}{X_d} \cos\delta - \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \cos 2\delta - \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} + \frac{2}{X_q} \right)$$

Finalmente:

$$Q = \frac{EV \cos\delta}{X_d} + \frac{V^2 \cos 2\delta}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \quad (46)$$

- Rotor Cilíndrico



**Figura 25.** Flujo de Potencia del Generador Síncrono con Rotor Cilíndrico

Para resolver el flujo de potencia de la Figura 25 se parte de la ecuación de potencia

$$S = V * I^* = P + jQ \quad (47)$$

$$S = -V \left[ \frac{V \angle 0^\circ - E \angle -\delta}{-jX_d} \right]$$

$$S = j \left[ \frac{VE \angle (-\delta) - V^2}{X_d} \right]$$

$$S = \frac{VE}{X_d} [ \cos(90 - \delta) + j \operatorname{sen}(90 - \delta) ] - j \frac{V^2}{X_d}$$

$$S = \frac{VE}{X_d} [ \operatorname{sen}(\delta) + j \cos(\delta) ] - j \frac{V^2}{X_d} \quad (48)$$

Para la potencia activa, basta con saber que:  $P = \operatorname{Real}\{S\}$ .

$$P = \frac{EV}{X_d} \operatorname{sen} \delta \quad (49)$$

Para la potencia reactiva, se toma de igual forma,  $Q = \text{Imaginario}\{S\}$ .

$$Q = \frac{EV\cos\delta}{X_d} - \frac{V^2}{X_d} \quad (50)$$

Nota: En el generador sincrónico de rotor cilíndrico, se puede usar indistintamente  $X_d$  o  $X_s$  ya que ambas hacen referencia a la reactancia sincrónica (40) de la sección 1.3.5.7.

### 1.3.5.9 Teoría de Curvas de Capacidad

El generador sincrónico es ampliamente usado a nivel mundial, en varios tipos de aplicaciones. Una vez explicado su funcionamiento, se pueden definir ahora los parámetros necesarios para que el generador opere siempre de forma segura.

Su “habilidad” de producción de energía eléctrica no es infinita y más bien consta de limitaciones inherentes a su proceso de construcción o también a las condiciones en las que está suministrando energía.

La corriente presente en sus devanados de armadura y campo durante el proceso de conversión electromecánico debe ser regulada, pues una corriente alta puede llegar a destruir cualquier devanado. A su vez se debe vigilar la potencia que es capaz de entregar su máquina motriz, así como las restricciones operativas del sistema.

Para afrontar todos estos problemas, se dispone de curvas de capacidad o capacidad, las cuales, a través de un plano cartesiano revelan una zona segura de operación en la que el generador sincrónico puede moverse libremente sin representar un daño a sí mismo, a la instalación o al personal humano.

- Límite de Corriente de Armadura

Se conoce como límite de la corriente de armadura  $I_{A_{MAX}}$ , a la corriente más alta que puede circular por los devanados del estator o inducido. Este dato se encuentra disponible en los datos de placa del generador [6].

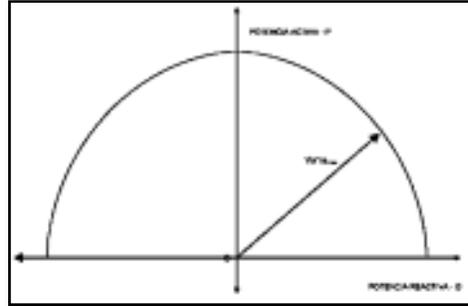
Para definir su lugar geométrico en el plano de potencias se puede partir de:

$$S_{nom} = V_{nom} \cdot (I_{nom})^*$$

$$S_{nom}^2 = P^2 + Q^2$$

$$Q = \pm \sqrt{S_{nom}^2 - P^2}$$

Se tiene un lugar geométrico de una media esfera, con centro en el origen y de radio igual a  $V_{nom} \cdot (I_{nom})$ , como se muestra en la Figura 26.



**Figura 26.** Lugar Geométrico de la Corriente de Armadura [1]

- Límite de Máxima Corriente de Excitación

La corriente de excitación tiene dos limitaciones, que no sea tan grande que llegue a destruir los devanados y que no sea tan pequeña que ocasione una salida del sincronismo del generador. Partiendo de la ecuación de potencia reactiva en el generador de polos salientes, si se tiene  $Q_{max}$ , significa que el generador está operando a  $I_{f_{max}}$ ,  $E_{max}$  y  $\delta = 0^\circ$

$$Q = \frac{EV \cos \delta}{X_d} + \frac{V^2 \cos 2\delta}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \quad (51)$$

$$Q_{max} = \frac{E_{max} V}{X_d} + \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right)$$

$$Q_{max} = \frac{E_{max} V}{X_d} + \frac{V^2}{X_d} \quad (52)$$

Despejando ahora  $E_{max}$  y reemplazando en la ecuación de P, se obtiene la ecuación 53.

$$E_{max} = \frac{Q_{max} \cdot X_d}{V} + V \quad (53)$$



### **1.3.6 Motores de Inducción**

Los motores de inducción están presentes de forma mayoritaria en aplicaciones industriales debido a la simplicidad de operación, al no tener un circuito de campo dependen únicamente de la acción transformadora para inducir corrientes en los devanados del rotor. De forma muy resumida se podría decir que el motor de inducción es un transformador giratorio.

Al igual que los generadores sincrónicos los motores de inducción se clasifican en dos grupos debido a sus rotores: rotor devanado y rotor jaula de ardilla. Este último resulta de gran importancia en este trabajo de titulación, pues es la primera máquina motriz del arreglo Ward Leonard, concretamente del motor trifásico de inducción con rotor de jaula R 1426 – 4 (ME 001<sub>2</sub>) expuesto en el anexo 1.

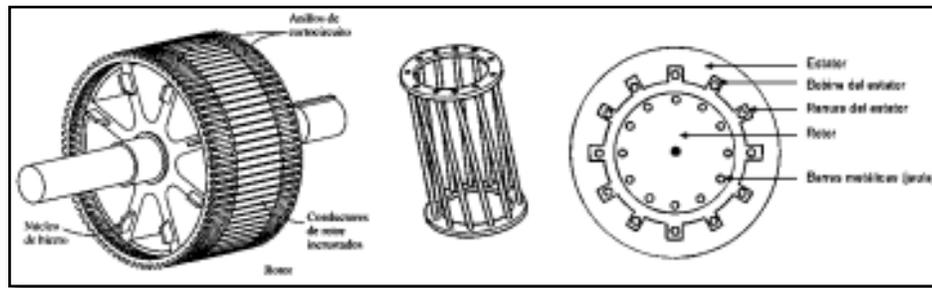
El motor está provisto de un sistema de protecciones junto a un arrancador estrella-triángulo, el cual acopla su eje motriz al generador DC. Resulta importante señalar que el motor trifásico de inducción R 1426 – 4 (ME 001<sub>2</sub>) opera a 60 Hz para producir en el eje una velocidad nominal de 1755 rpm, la cual se mantiene constante.

La principal característica de estos motores es que operan siempre a una velocidad cercana a la velocidad de sincronismo, sin nunca alcanzarla. El voltaje inducido en el rotor, por el movimiento relativo entre el campo magnético del estator y del rotor, produce en el rotor una corriente que interactúa con el campo magnético del estator para obtener un par inducido en el motor.

#### **1.3.6.1 Aspectos Constructivos**

Física y constructivamente hablando los estatores de las máquinas sincrónicas son idénticos a los estatores de las máquinas de inducción. Su diferencia radica en las formas y funciones que tienen sus rotores. Para las máquinas de inducción se cuenta con dos clasificaciones de rotores, jaula de ardilla o rotor en jaula y de rotor devanado.

Los rotores de jaula de ardilla como el que se encuentra en el motor R 1426 – 4 (ME 001<sub>2</sub>) y se representa en la Figura 28, están constituidos por una serie de barras conductoras cortocircuitadas, colocadas en ranuras labradas sobre la superficie del rotor.

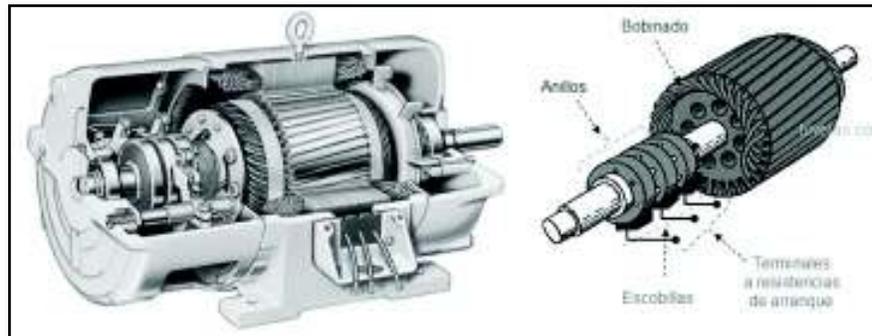


**Figura 28.** Rotor Jaula de Ardilla [7]

Por otra parte, se tiene a los rotores devanados (Figura 29) que se componen de un conjunto de devanados generalmente conectados en “Y” y cortocircuitados con sus tres terminales libres conectados a los anillos rozantes del eje del motor.

Una ventaja que proponen estos rotores se da al tener sus bobinados disponibles mediante escobillas, resultando de gran importancia para regular la característica par-velocidad, por medio de resistencias en el circuito del rotor.

Estos rotores son más grandes que las jaulas de ardilla, requieren mayor mantenimiento debido al uso de escobillas y anillos rozantes, por lo cual sus aplicaciones de uso pierden terreno frente sus homólogos.



**Figura 29.** Rotor Devanado [8]

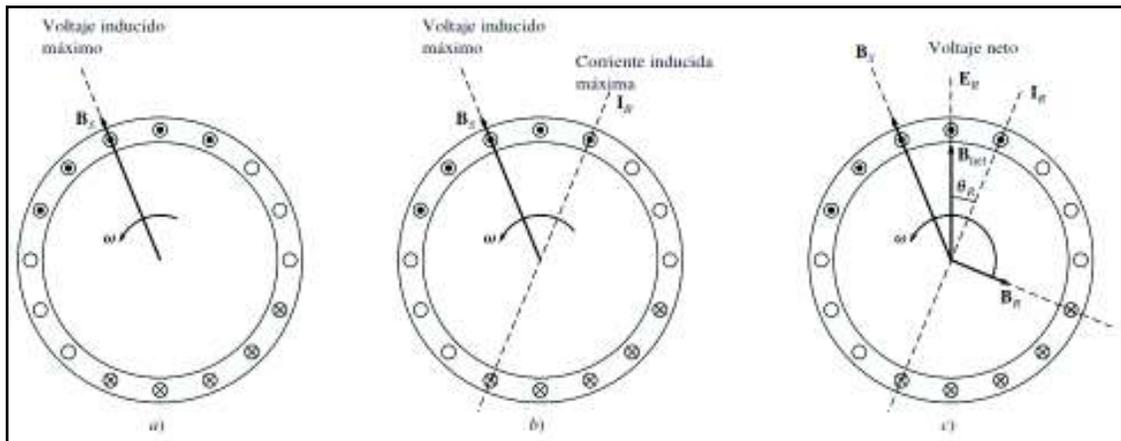
La operación de los motores de inducción es básicamente igual a la de los motores sincrónicos que utilizan devanados de amortiguamiento.

### 1.3.6.2 Par Inducido

Si se aplica un voltaje trifásico al estator, fluye en su interior un conjunto de corrientes que producen un campo magnético  $B_s$  giratorio en sentido antihorario (Figura 30a), su velocidad de rotación del rotor se dedujo anteriormente en la ecuación (20). Conjuntamente el campo  $B_s$  pasa sobre las barras rotóricas induciendo un voltaje en ellas, ecuación (18).

El voltaje inducido en las barras cortocircuitadas de la jaula de ardilla es producto del movimiento relativo del rotor en comparación al campo magnético del estator. La velocidad de las barras superiores, en relación al campo van hacia la derecha, así el voltaje inducido tiene dirección hacia afuera de la hoja, mientras el voltaje inducido en las barras inferiores tiene sentido opuesto (hacia dentro de la hoja).

Esto tiene como efecto un flujo de corriente hacia afuera de las barras superiores y hacia adentro en las inferiores. Recordar que en esta construcción la corriente pico del rotor se pone detrás del voltaje pico por su característica inductiva. (Figura 30b).



**Figura 30.** Desarrollo de Par Inducido en Motor de Inducción [2]

El flujo de corriente en el rotor produce un campo magnético en el rotor  $B_R$  A  $90^\circ$  de retraso y este interactúa con  $B_{neto}$ , para producir un par en sentido antihorario (Figura 30c), que matemáticamente se expresa como: [2]

$$\tau_{ind} = k \overrightarrow{B_R} \times \overrightarrow{B_s} \quad (57)$$

Sin embargo, la velocidad se limita antes de alcanzar la velocidad síncrona, si el rotor del motor de inducción girara a velocidad síncrona sus barras quedarían estacionarias con

relación al campo magnético volviendo cero el voltaje inducido, por lo tanto, no existe corriente en el rotor, haciendo que el par sea cero.

Mientras que durante una operación normal los campos magnéticos del rotor y estator giran juntos a velocidad sincrónica, el rotor gira siempre a una velocidad menor [2].

### 1.3.6.3 Deslizamiento y Frecuencia

La velocidad de deslizamiento se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica (velocidad de los campos magnéticos) y la velocidad mecánica del rotor:

$$n_{deslizamiento} = n_{sincrónica} - n_{mecánica} \quad (58)$$

Junto a esta definición se tiene el deslizamiento  $s$  que hace referencia a la velocidad relativa expresada en porcentaje, por lo general se presenta en la ecuación (59).

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \times 100\% \quad o \quad s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} \times 100\% \quad (59)$$

$S$ , es un parámetro que varía entre cero y uno, siendo igual a cero si el rotor gira a velocidad sincrónica y uno si se encuentra en reposo.

Por último, la velocidad mecánica del eje se la expresa en términos de su deslizamiento se obtiene respectivamente:

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad o \quad \omega_m = (1 - s)\omega_{sinc} \quad (60)$$

Se definió al motor de inducción como un transformador que gira, pues de forma similar en el primario (estator) induce un voltaje en un secundario (rotor), pero desde el punto de vista de la frecuencia no es la misma en el primario y en el secundario. Si se bloquea el rotor del motor el voltaje inducido tendrá la misma frecuencia del estator.

Matemáticamente se tiene que cuando  $n_m = 0$ , la frecuencia del rotor  $f_r = f_e$ , con  $s = 1$ . En contraparte si el rotor llegara a velocidad sincrónica el análisis sería con  $n_m = n_{sinc}$  y la frecuencia del rotor  $f_r = 0$  con  $s = 0$ .

Para ambos casos extremos la frecuencia resulta proporcional:  $f_r = s \cdot f_e$ . Así se obtiene la ecuación de la frecuencia resultante descrita por:

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{sincrónica} - n_{mecánica}) \quad (61)$$

### 1.3.6.4 Circuito Equivalente

El motor de inducción puede ser esencialmente representado por el circuito equivalente de un transformador dado que solo el circuito del estator es quien recibe potencia eléctrica.

Al igual que en los transformadores se tiene resistencia e inductancia propia en los devanados primarios, que deben ser representados en el circuito equivalente: la resistencia del estator es  $R_1$  y la reactancia de dispersión del estator  $X_1$ . Figura 31.

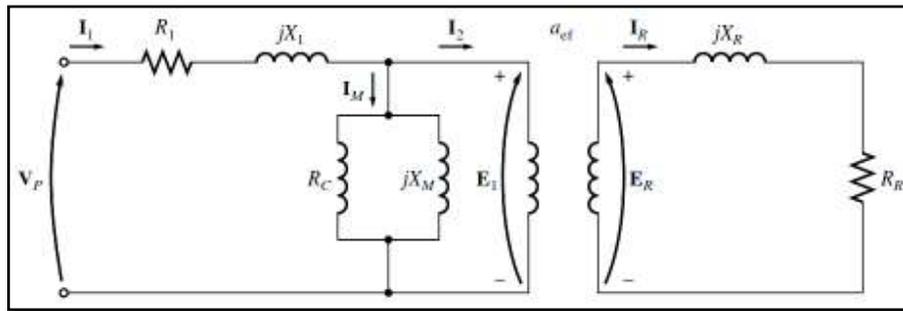


Figura 31. Modelo de Transformador del Motor de Inducción [2]

En los motores, la reactancia de magnetización  $X_M$  es considerablemente mayor que en los transformadores. El entrehierro de los motores incrementa la reluctancia del camino del flujo, reduciendo el acoplamiento entre devanados, por lo cual la corriente de magnetización será aún más alta para un mismo nivel de flujo.

Trabajando solo con el circuito del rotor, se puede obtener un modelo que incluye los fenómenos de deslizamiento sobre  $R_R$ , como en la Figura 32.

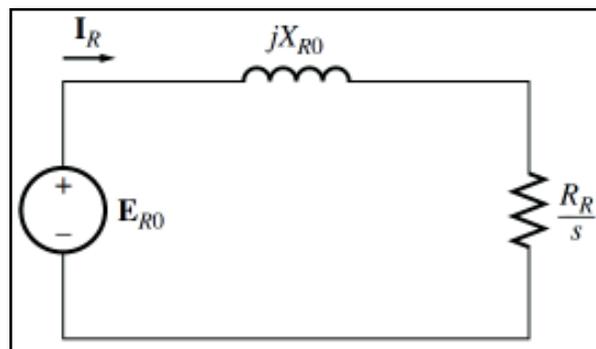
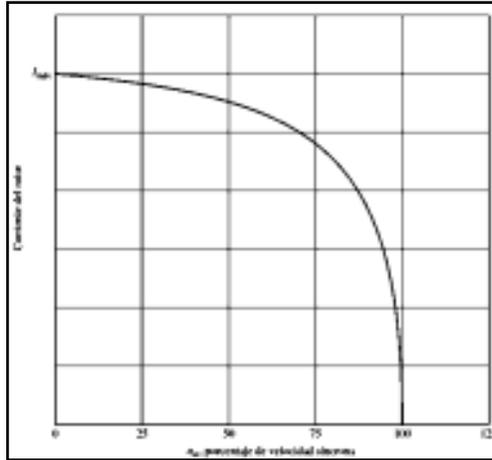


Figura 32. Modelo del Rotor con Efecto Deslizamiento [2]

De donde se obtiene por Ley de Voltajes de Kirchoff:

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{S} + jX_{R0}} \quad (62)$$

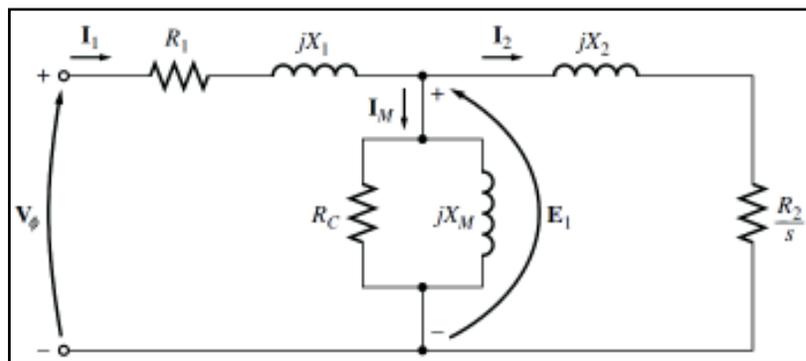


**Figura 33.** Corriente de Rotor vs % de Velocidad Síncrona [2]

Para obtener el modelo final del motor es necesario referir todos los componentes que se describieron del rotor al lado del estator como se indica en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros del Rotor Referenciados al Estator

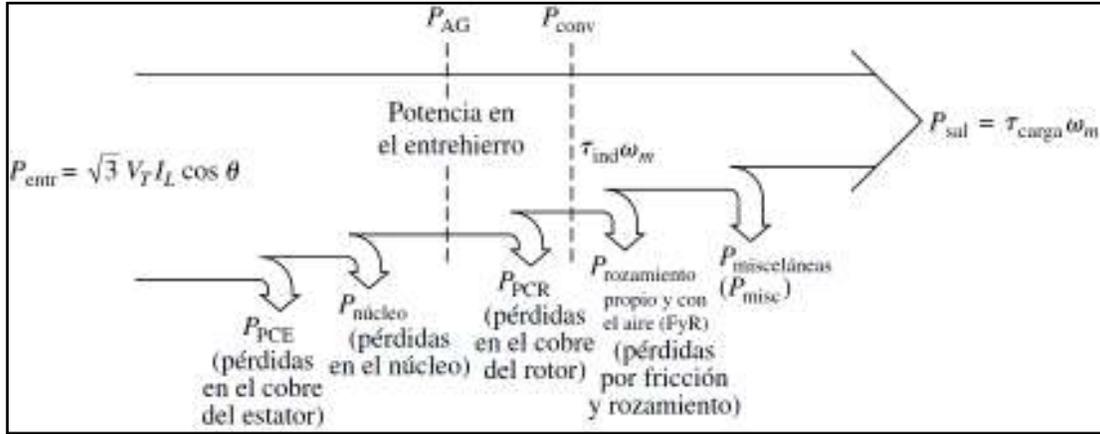
Voltaje Transformado del Rotor	$E_1 = E'_R = a_{ef} \cdot E_{R0}$
Corriente del Rotor	$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}}$
Impedancia del Rotor	$Z_2 = a_{ef}^2 \left( \frac{R_R}{S} + jX_{R0} \right)$
Resistencia del Rotor	$R_2 = a_{ef}^2 \cdot R_R$
Reactancia del Rotor	$X_2 = a_{ef}^2 \cdot X_{R0}$



**Figura 34.** Circuito Equivalente Por Fase del Motor de Inducción [2]

### 1.3.6.5 Potencia y Par

Al ser máquinas de excitación única, los motores de inducción difieren considerablemente de las relaciones de potencia y par expuestas en máquinas sincrónicas. Para empezar a definir estas relaciones se parte de la Figura 35, que describe el flujo de potencia dentro de la máquina para realizar la conversión de energía eléctrica a mecánica.



**Figura 35.** Flujo de Potencia del Motor de Inducción [2]

En el circuito equivalente de la Figura 34 se puede obtener una expresión para  $I_1$  y para la impedancia vista desde los terminales del estator:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad (63)$$

$$Z_{eq} = R_1 + j \cdot X_1 + \frac{1}{G_c - j \cdot B_M + \frac{1}{\frac{V_2}{s} + j \cdot X_2}} \quad (64)$$

Una vez definidas estas ecuaciones, es sencillo encontrar las ecuaciones de potencias correspondientes al flujo en la conversión electromecánica de energía expuesto en la Figura 35. Estas se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Potencias dentro del Generador de Inducción

Potencias de pérdidas en el cobre del estator	$P_{PCE} = 3I_1^2 \cdot R_1$
Potencias de pérdidas en el núcleo	$P_{Pnucleo} = 3E_1^2 \cdot G_c$
Potencia en el entrehierro	$P_{EH} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$
Potencias de pérdidas resistivas reales del rotor	$P_{PCR} = 3I_2^2 \cdot R_2$

Retomando el diagrama de flujo de potencia, es evidente que una vez que se restan las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en el cobre la potencia restante pasa a convertirse en potencia mecánica ( $P_{CONV} = P_{EH} - P_{PCR}$ ).

$$P_{CONV} = 3I_2^2 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (65)$$

$$P_{CONV} = P_{EH}(1-s) \quad (66)$$

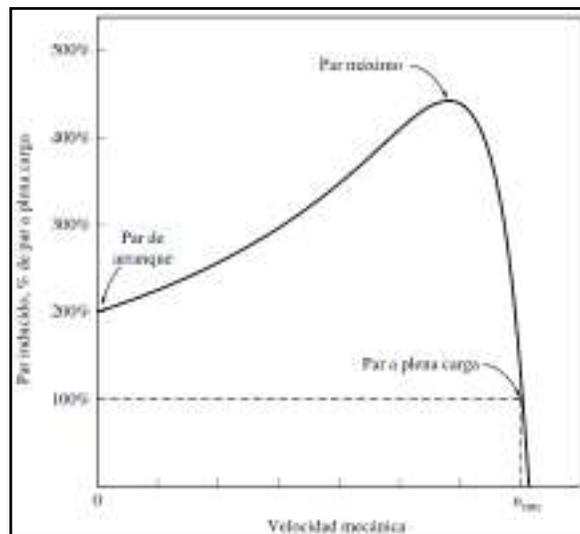
Para expresar el torque inducido en términos de potencia del entrehierro y velocidad sincrónica se tiene:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EH}}{\omega_{sinc}} \quad (67)$$

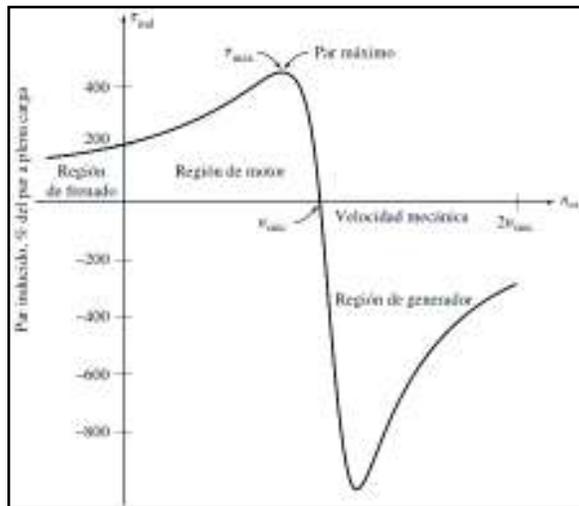
Ahora que se han deducido las principales ecuaciones de comportamiento del motor de inducción es posible graficar las curvas de comportamiento par - velocidad.

En la Figura 36, se muestra la curva característica de un motor de inducción, la cual es lineal en el intervalo en el que la resistencia del rotor es más grande que la reactancia, por lo que la corriente, el campo y el par aumentan linealmente.

Complementariamente en la Figura 37 se muestra la característica par – velocidad, con los intervalos extendidos de operación correspondientes a las regiones de frenado y de generador.



**Figura 36.** Curva Característica Par-Velocidad del Motor de Inducción [2]

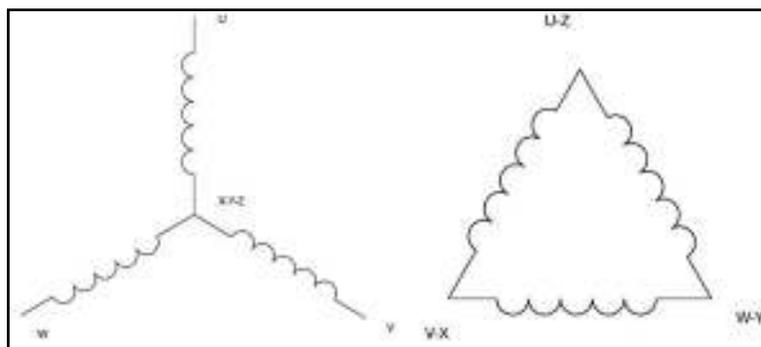


**Figura 37.** Curva Característica Par-Velocidad Extendida del Motor de Inducción [2]

### 1.3.6.6 Arranque Y – Delta

En el momento de arrancar un motor debe producir un par lo suficientemente elevado para vencer la inercia del eje y a su vez su carga. Este par de arranque debe tener una magnitud mayor al par resistente para obtener un par acelerador.

Para generar este par se produce un consumo realmente elevado de corriente que bordea incluso 10 veces la corriente nominal, por lo cual es necesario utilizar un sistema de arranque para extender la vida útil de los devanados.

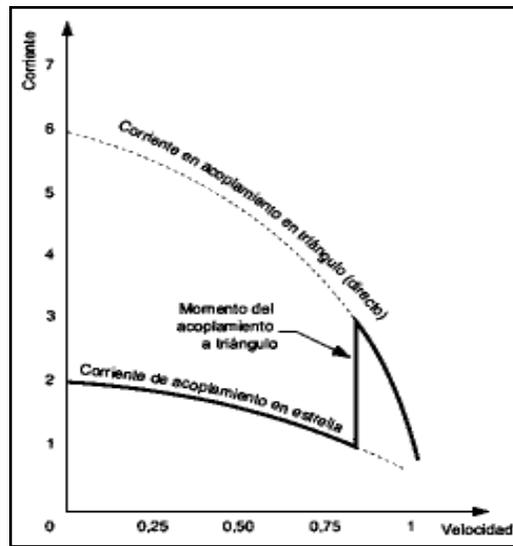


**Figura 38.** Formas de Conexión de los Devanados del Motor de Inducción

Un motor de inducción trifásico dispone de tres bobinas nombradas generalmente “U”, “V” y “W” los terminales de inicio de cada una y homológamente sus terminales de final con

“X”, “Y” y “Z”. Gracias a esta libertad, se puede jugar con la forma de conexión de sus devanados como se observa en la Figura 38.

La conexión delta y triángulo son utilizadas para tener un mejor rendimiento en el arranque del motor. Cuando los devanados están en conexión Y reciben un voltaje  $\sqrt{3}$  veces menor al voltaje de red a la que están conectados, posteriormente se realiza el cambio a la conexión delta, donde cada bobina recibe el voltaje nominal de la red. Figura 39.

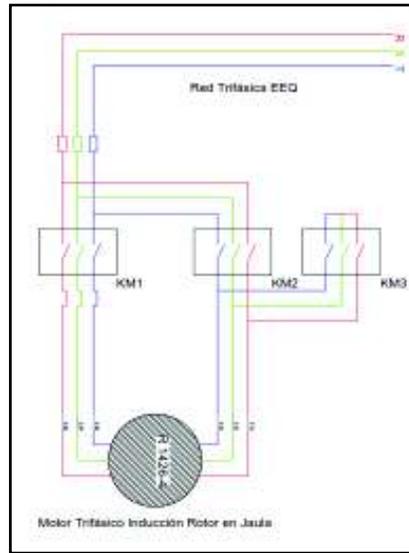


**Figura 39.** Forma la Corriente de Arranque del Motor de Inducción [9].

Este juego con las conexiones de los devanados permite arrancar el motor con un voltaje menor reduciendo la corriente de arranque proporcionalmente; el arranque se lo hace con un bajo par y una vez que el motor gana velocidad de rotación en su eje, se conmuta las conexiones a “ $\Delta$ ” aumentando su velocidad y su par a condiciones nominales de trabajo.

Todo el proceso de arranque se ve manejado por un circuito de control general que se describe en la Figura 40.

Se inicia con la operación con los contactores KM1 y KM2 dando lugar a la conexión en delta; transcurrido un tiempo de estabilización KM2 se abre y KM3 cierra el circuito para tener los devanados en conexión Y. Lo que implica tener al motor operando con voltaje, corriente y par nominal.

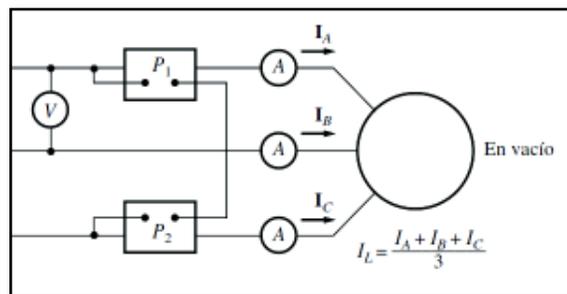


**Figura 40.** Circuito Electromecánico de Arranque del Motor de Inducción

### 1.3.6.7 Determinación de Parámetros

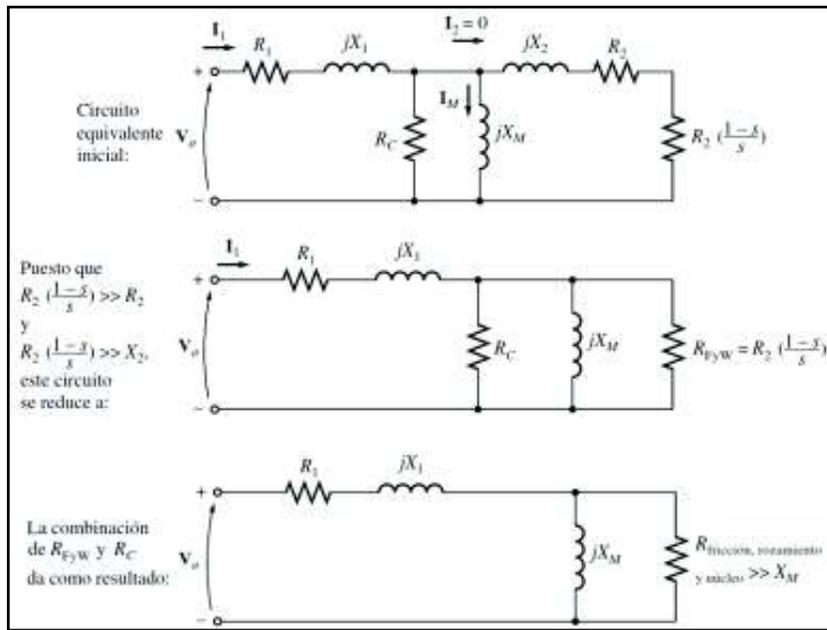
- Prueba en Vacío

Con esta prueba se busca obtener las pérdidas rotacionales de fricción y viento en el motor y simultáneamente encontrar su corriente de magnetización, para tal efecto se emplea el circuito de la Figura 41 donde la única carga que lleva el motor son las pérdidas por fricción y viento.



**Figura 41.** Circuito Electromecánico de Arranque del Motor de Inducción [2]

Se puede simplificar el circuito equivalente del motor, considerando que en estas condiciones el deslizamiento es muy pequeña; mientras su resistencia de potencia convertida  $R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right)$ , es mayor a la resistencia de pérdidas en el rotor  $R_2$  y su reactancia  $X_2$ :



**Figura 42.** Circuito Electromecánico de Arranque del Motor de Inducción [2]

Del circuito simplificado de la Figura 42, se puede obtener la ecuación de pérdidas en el cobre del estator, ecuación (68).

$$P_{PCE} = 3I_1^2 \cdot R_1 \quad (68)$$

Considerando el flujo de potencia de la Figura 35, se puede definir a las pérdidas rotacionales del motor como:  $P_{rot} = P_{núcleo} + P_{fricción\ y\ viento} + P_{misc}$ , entonces:

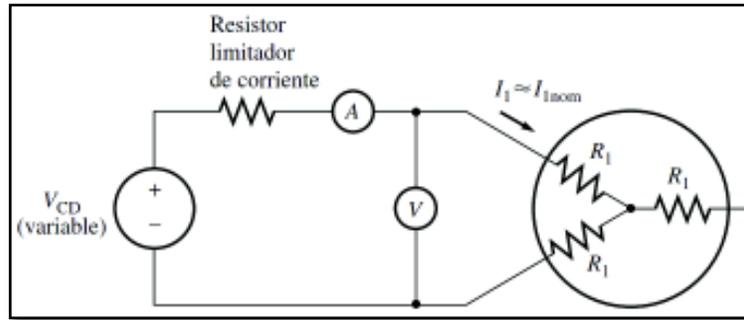
$$P_{IN} = 3I_1^2 \cdot R_1 + P_{rot} \quad (69)$$

Debido a la alta reluctancia del entrehierro la corriente necesaria para establecer un campo magnético es muy alta por lo cual su reactancia  $X_m$  será menor en relación a las resistencias conectadas en paralelo a ella se obtiene toda la caída de voltaje en el componente inductivo del circuito, es decir que la impedancia equivalente se la define como:

$$|Z_{eq}| = \frac{V_\phi}{I_1} \approx X_1 + X_M \quad (70)$$

- Prueba DC

La velocidad a la que se presenta el par máximo está dada por la curva par-velocidad en la cual es determinante el valor de  $R_2$ . Si bien la prueba de rotor bloqueado muestra la resistencia total se requiere encontrar previamente el valor de  $R_1$ .



**Figura 43.** Circuito de Prueba DC [2]

Como se muestra en la Figura 43 se aplica un voltaje DC a los devanados del estator se obtiene dos efectos: el primero es que la reactancia del motor es cero y el segundo es la inexistencia de flujo en el rotor. Entonces se puede determinar  $R_1$  del circuito como:

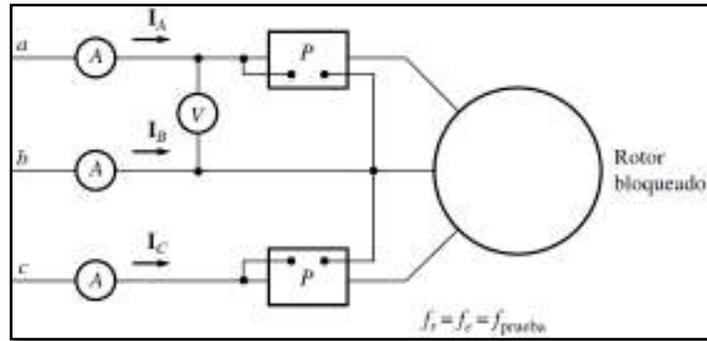
$$R_1 = \frac{V_{CD}}{2I_{CD}} \text{ (Devanados Y)} \quad R_1 = \frac{3V_{CD}}{2I_{CD}} \text{ (Devanados } \Delta) \quad (71)$$

Si bien el valor obtenido de  $R_1$  facilita los cálculos para encontrar parámetros del circuito equivalente no toma en consideración el efecto pelicular de un voltaje AC en los devanados, si se desea un valor realmente exacto incluyendo correcciones por temperatura se recomienda revisar la Norma IEEE 112 – 2004, “IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators” [11].

- Prueba Rotor Bloqueado

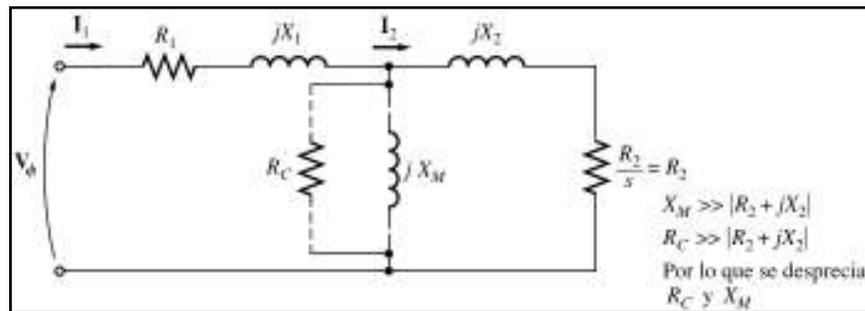
En la prueba de rotor bloqueado, también conocida como de cortocircuito se aplica un freno mecánico al eje impidiendo su libre giro. Se aplica un voltaje AC en los devanados del estator para que el valor de la corriente se aproxime a la corriente a plena carga o corriente nominal.

En este punto se procede a tomar medidas de voltaje, corriente y potencia como se describe en la Figura 44 y las ecuaciones en el circuito equivalente se simplifican, pues en condición de rotor bloqueado el deslizamiento es igual a 1 ( $s = 1$ ).



**Figura 44.** Esquema de Conexión en Prueba de Rotor Bloqueado [2]

Para estas condiciones la impedancia de la rama del rotor es menor que la reactancia de magnetización, lo cual permite describir en forma aproximada un circuito equivalente más sencillo mostrado en la Figura 45.



**Figura 45.** Circuito Equivalente de Prueba DC [2]

$$|Z_{Rot Bloq}| = \frac{V_\phi}{I_1} = \frac{V_{aplicado}}{\sqrt{3}I_{linea}} \quad (72)$$

$$R_{Rot Bloq} = |Z_{Rot Bloq}| \cos \theta = R_1 + R_2 \quad (73)$$

$$X_{Rot Bloq} = X_1 + X_2 \quad (74)$$

Las relaciones entre reactancias del estator y rotor dependen del tipo constructivo de la máquina como se muestra en la siguiente Tabla:

**Tabla 3.** Contribución de Reactancias del Circuito Equivalente

Diseño del Rotor	$X_1$	$X_2$
Rotor Devanado	$0.5 X_{Rot Bloq}$	$0.5 X_{Rot Bloq}$
A - NEMA	$0.5 X_{Rot Bloq}$	$0.5 X_{Rot Bloq}$
B - NEMA	$0.4 X_{Rot Bloq}$	$0.6 X_{Rot Bloq}$
C - NEMA	$0.3 X_{Rot Bloq}$	$0.7 X_{Rot Bloq}$
D - NEMA	$0.5 X_{Rot Bloq}$	$0.5 X_{Rot Bloq}$

La codificación NEMA para motores comerciales de inducción jaula de ardilla, como el utilizado en el arreglo Ward Leonard, clasifican los motores por sus propiedades eléctricas y mecánicas del rotor, la cuales se resumen en la Tabla 4.

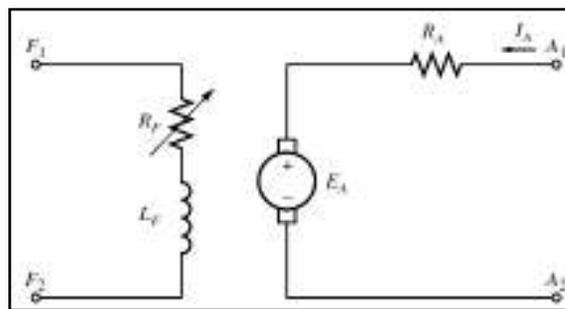
**Tabla 4.** Códigos Nema Para Motores con Rotor en Jaula

Codigo NEMA	Par de Arranque $\% \tau_{nominal}$	Corriente de Arranque $\% I_{nominal}$	Reg. de Velocidad (%)	Característica
A	1.5 – 1.75	5 – 7	2 – 4	Normal
B	1.4 – 1.6	4.5 – 5	3.5	Propósito General
C	2 – 2.5	3.5 – 5	4 – 5	Doble Jaula, Alto Par
D	2.5 – 3	3 – 8	5 – 8, 8 – 13	Alto Par, Alta Resistencia
F	1.25	2 – 4	Mayor a 5	Doble Jaula, Bajo Par, Baja Corriente de arranque.

### 1.3.7 Motores de Corriente Continua

#### 1.3.7.1 Circuito Equivalente del Motor DC

El circuito equivalente de un motor DC puede ser descrito por una fuente de voltaje ideal  $E_A$  conectada en serie a un resistor  $R_A$ , el cual agrupa todos los elementos del rotor utilizando un equivalente Thevenin. Con la finalidad de obtener un modelo más práctico se ha despreciado la caída de voltaje que tiene lugar en las escobillas del rotor.



**Figura 46.** Circuito Equivalente Simplificado del Motor DC [2]

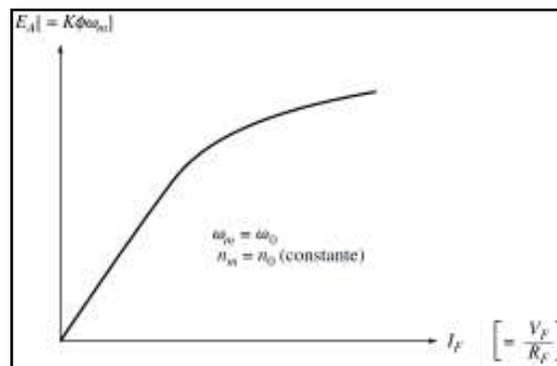
Del lado izquierdo de la Figura 46 se encuentra el circuito de campo magnético del motor con la particularidad de contar con un resistor de ajuste  $R_f$  externo cuya función es regular la corriente que circula por el devanado  $L_f$  de campo.

### 1.3.7.2 Curva de Magnetización de la Máquina DC

En las secciones 1.3.3 y 1.3.4 se describieron las relaciones de las leyes físicas que rigen el comportamiento de estas máquinas, donde se puede expresar el voltaje interno generado  $E_A$ :

$$E_A = K\Phi\omega_m \quad (75)$$

Como se puede ver,  $E_A$  es directamente proporcional al flujo de la máquina, el cual es un resultante de la corriente en el devanado de campo.



**Figura 47.** Curva de Magnetización de la Máquina DC [2]

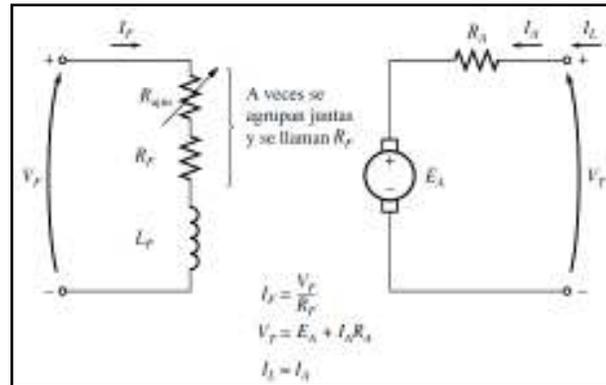
Debido a estas relaciones se puede obtener la curva de magnetización graficando el voltaje interno generado y la corriente de campo a una velocidad  $\omega_0$  (constante), como se aprecia en la Figura 47.

### 1.3.7.3 Motor DC Excitación Separada

El circuito equivalente del motor DC se expuso anteriormente en la Figura 46. El objeto de estudio es el motor DC de excitación separada, pues este tipo de motor es el que integra el arreglo Ward Leonard, concretamente se hace referencia al motor QG 1292-4.

En este tipo de motor se observa claramente que su circuito de campo se alimenta desde una fuente DC totalmente independiente.

Por conceptos se puede decir que un motor DC con excitación separada se comporta en forma similar a la de un motor DC en derivación, pues se tiene en ambos casos que el voltaje suministrado a los terminales del motor se mantiene constante en ambos modelos.



**Figura 48.** Circuito Equivalente del Motor DC con Excitación Separada [2]

Una de las características más importantes es saber cómo responde el motor frente a variaciones en su carga.

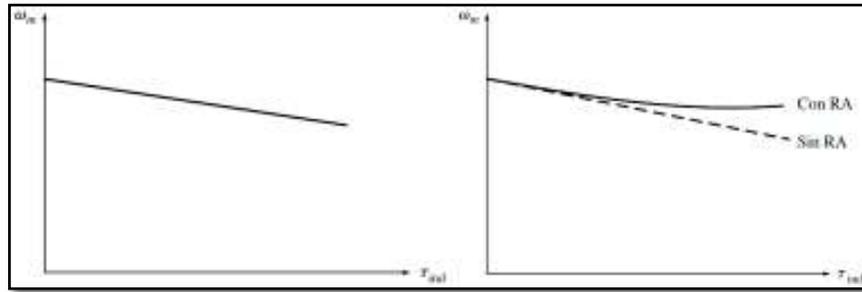
Si para empezar un análisis se asume un incremento de la carga, se tiene que el par de carga  $\tau_{carga}$  comienza a exceder al par inducido  $\tau_{ind}$ , lo cual tiene como resultado una disminución de velocidad de giro en el eje.

Si el motor pierde velocidad, disminuye también el voltaje interno generado (75); a lo que la corriente del inducido aumenta como se aprecia en la ecuación 76.

$$I_A = \frac{(V_T - E_A)}{R_A} \quad (76)$$

Mientras  $I_A$  crece, el  $\tau_{ind}$  también aumenta hasta el punto donde nuevamente el par inducido iguala al par de carga.

Por otra parte, si el motor se compone de devanados de compensación el flujo siempre es constante frente a las variaciones de carga facilitando cálculos de velocidad en cualquier condición siempre y cuando se determine previamente la corriente en el inducido.



**Figura 49.** Característica Par - Velocidad del Motor DC con Excitación Separada [2]

Otro factor que modifica la característica de par-velocidad se da cuando el motor tiene una reacción del inducido; entonces, si existe un incremento de carga la caída en el flujo no será tan evidente como en el caso anterior. El efecto de reducción de flujo es un aumento de la velocidad del motor frente a cualquier condición.

### 1.3.7.4 Control de Velocidad

Las acciones de control sobre la velocidad a la que gira el motor DC son principalmente dos:

- Variación de la resistencia de campo
- Ajuste de voltaje terminal aplicado al inducido

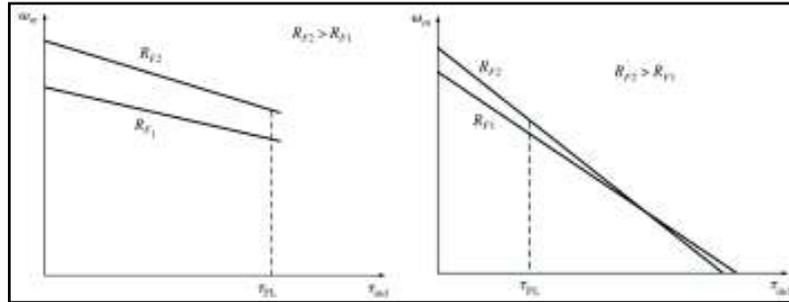
En este caso particular el motor DC, QG 1292 – 4, que compone el sistema Ward Leonard, utiliza el control de velocidad por variación de resistencia de campo, por lo cual éste será el método a profundizar. Si se desea información sobre otros métodos se encuentran en el apartado de bibliografía [2] páginas: 358 a la 363.

Para una mejor observación del fenómeno se lo presenta a continuación por separado, asumiendo un incremento de la resistencia de campo.

- ✓ Incremento de la resistencia de campo  $R_F$ , provoca una caída en  $I_F = \frac{V_T}{R_F}$ .
- ✓ Si  $I_F \downarrow$  disminuye, entonces  $\phi \downarrow$  disminuye.
- ✓ Al disminuir el flujo  $\phi$ , conlleva consigo una caída de  $E_A = K\phi\omega_m$ .
- ✓ Con la disminución de  $E_A$ , viene un aumento de  $I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A}$ .

- ✓ Si  $I_A \uparrow$  aumenta, entonces  $\tau_{ind} \uparrow$  aumenta.
- ✓ Para esta condición se tiene:  $\tau_{ind} > \tau_{carga}$  ocasionando que  $\omega_m \uparrow$  aumenta.
- ✓ Si  $\omega_m \uparrow$  aumenta, entonces  $E_A \uparrow$  aumenta.
- ✓ Con lo que  $I_A$  y  $\tau_{ind} \downarrow$  disminuye, para obtener  $\tau_{ind} = \tau_{carga}$  en una nueva  $\omega_m$  mayor.

Gráficamente en la Figura 50 nótese que, en la gráfica de la izquierda, conforme disminuye el flujo, la velocidad se incrementa, haciendo más inclinada la curva par – velocidad. Junto a ella (derecha) se tiene la gráfica de la característica de todo el intervalo, desde vacío a plena carga, claramente se concluye que a velocidades muy bajas un incremento de la resistencia de campo, disminuye la velocidad del motor.



**Figura 50.** Control de Velocidad por Resistencia de Campo del Motor DC [2]

### 1.3.7.5 Efecto de Pérdida de Campo

Asumiendo que el circuito de campo se abre mientras está en operación, el flujo caería drásticamente y de igual forma el voltaje  $E_A$ . Lo cual provocaría un incremento dramático de la corriente del inducido y el par inducido sería mucho mayor al par de carga, aumentando la velocidad rápida y constantemente.

Esta es una situación de extremo cuidado por lo cual el motor debe contar con un sistema de protección del circuito de campo como relés de pérdida de campo que estén siempre activos y en buenas condiciones.

Resulta importante forzar en el sistema de control dos condiciones de operación para el motor DC: el primero imposibilitaría el arranque del motor si no existe la presencia de

campo magnético, mientras el segundo desconecta inmediatamente el motor frente a la ausencia o pérdida del circuito de campo.

### 1.3.7.6 Pruebas del Motor DC

- Pérdidas en el cobre

Son las pérdidas  $I^2 \cdot R$  que se dan en los circuitos de campo e inducido del motor para lo cual se debe conocer la corriente y las resistencias, el proceso de determinación de las resistencias es idéntico a los revisados anteriormente en 1.3.6.7

En primer lugar, bloqueando el rotor y aplicando un voltaje DC hasta que se alcance el valor de corriente nominal del inducido de la máquina; la relación entre el voltaje aplicado y el flujo de corriente del inducido es  $R_A$ .

La resistencia de campo es determinada por el suministro de voltaje de campo a plena carga y la medición de la corriente de campo resultante.  $R_F$  es la relación entre el voltaje de campo y la corriente de campo.

- Pérdidas en el núcleo y pérdidas mecánicas

Haciendo que el motor gire en vacío a velocidad nominal no existe potencia de salida.  $I_A$  resulta muy pequeña y las pérdidas en el cobre del inducido son despreciadas.

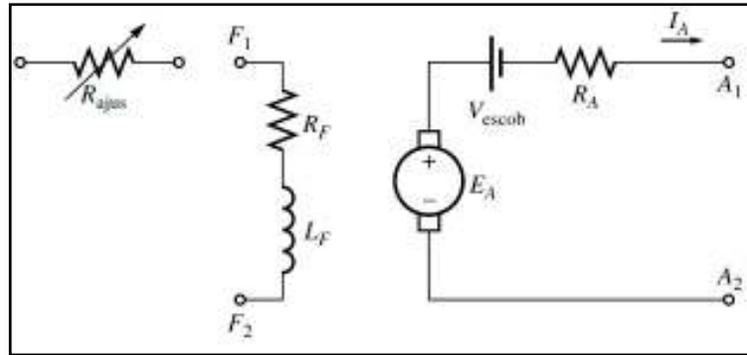
En este punto se puede restar de la potencia de entrada al motor las pérdidas del cobre, siempre y cuando la velocidad del motor se mantenga constante durante la medición. Así se obtiene el valor de pérdidas rotacionales en vacío del motor.

### 1.3.8 Generadores de Corriente Continua

Los generadores de DC no tienen una diferencia real con los motores DC, excepto la dirección del flujo de potencia en el proceso de conversión de energía. Resulta entonces que la teoría expuesta en 1.3.7 aplica de igual manera en los generadores DC.

De la misma manera que en los motores, existen varios tipos de generadores; concretamente, el generador DC G 1592 – 4 es un generador de excitación separada.

Este generador es el que completa el conjunto Ward Leonard y consta de un circuito de campo externo homológamente al motor DC QG 1292 – 4. En forma muy general se puede dar un circuito equivalente general para todos los tipos de generador DC como en la Figura 51.

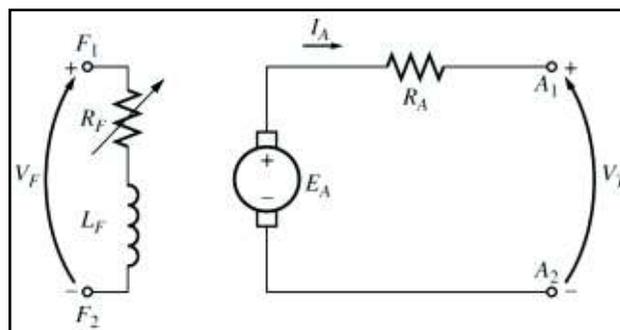


**Figura 51.** Circuito Equivalente del Generador DC [2]

### 1.3.8.1 Generador DC de Excitación Separada

La versatilidad de contar con un circuito externo para el campo resulta muy útil en la construcción del equipamiento Ward Leonard es por eso que tanto el motor DC como el generador DC tienen esta configuración.

A partir del circuito equivalente de la Figura 51 se puede obtener un modelo simplificado para el generador con excitación separada, donde la resistencia de campo y la resistencia de ajuste formen un solo equivalente, al mismo tiempo se elimina la caída de voltaje en los anillos rozantes y las escobillas, obteniendo así en circuito equivalente de la Figura 52.



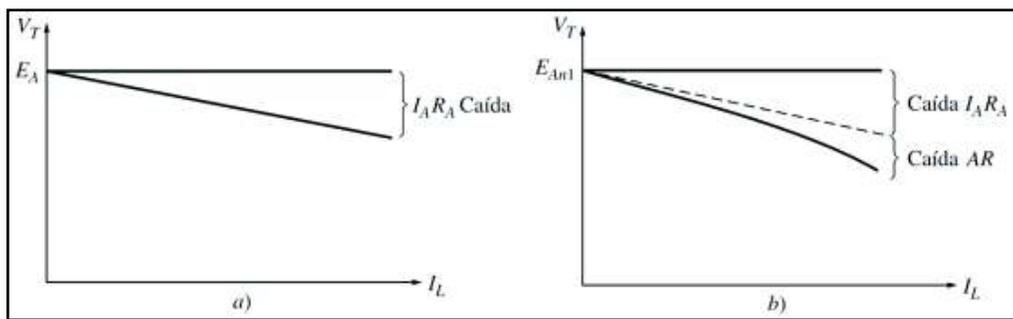
**Figura 52.** Circuito Equivalente Simplificado del Generador DC [2]

### 1.3.8.2 Curvas Características del Generador DC

Sobre el comportamiento del generador DC se tiene dos magnitudes que lo definen, una es el voltaje terminal y la otra la corriente de la carga que alimenta, este caso sería la misma que la corriente del inducido (Figura 52) por lo cual su característica se puede expresar mediante una gráfica de  $V_T$  vs  $I_{Load}$ , con velocidad constante  $\omega$ .

Del circuito equivalente se puede tener una expresión para el voltaje terminal:

$$V_T = E_A - I_A R_A \quad (77)$$



**Figura 53.** Curva Característica del Generador DC [2]

En la Figura 53 se muestra la respuesta del generador frente a variaciones de carga. Este aumento de carga es un crecimiento de  $I_{Load}$ , aumentando la caída de voltaje terminal  $I_A R_A$ , en 53a se muestra esta variación asumiendo que el generador cuenta con devanados de compensación, mientras que 53b no tiene devanados de compensación, lo que provoca que la caída del voltaje terminal sea aún más pronunciada.

### 1.3.8.3 Control de Voltaje Terminal

Controlar el voltaje terminal suministrado desde el generador DC es crucial para cualquier aplicación a la que este asociado. Como se expuso en la ecuación 77, se puede encontrar una relación directamente proporcional entre  $V_T$  y  $E_A$ .

Considerando también que  $E_A = K\phi\omega_m$ , solo hay dos formas de controlar el voltaje generado:

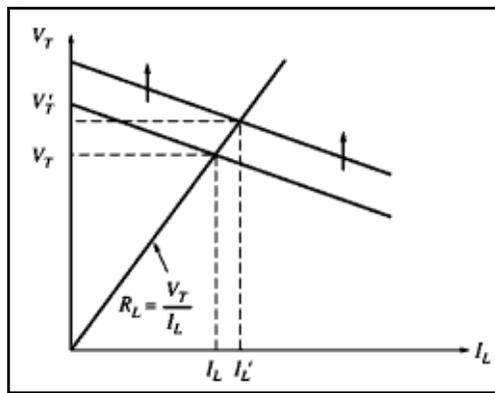
- Modificando la velocidad de rotación ( $\omega_m$ )
- Variando la corriente de campo  $I_F$ .

Si bien ambos métodos son válidos, la finalidad de este estudio es integrar todas las máquinas analizadas dentro del equipamiento Ward Leonard.

La velocidad de rotación del eje motriz del generador DC está dada por la velocidad del motor trifásico de inducción conectado a la red; por lo cual este método de variación resulta muy poco práctico.

Por otro lado, se dispone de una resistencia de campo  $R_F$ , con la cual se ajusta la magnitud de  $I_F$  y proporcionalmente  $\phi$ .

Con una variación sobre  $\phi$ , se tiene un cambio proporcional también en  $E_A$ ; consiguiendo así aumentar el voltaje terminal del generador DC, como se expresa en la Figura 54.



**Figura 54.** Regulación de Voltaje del Generador DC [2]

## CAPÍTULO 2

### DIAGNÓSTICO Y PUESTA EN OPERACIÓN DEL SISTEMA WARD LEONARD

#### 2.1. Antecedentes

El Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional fue implementado alrededor del año 1960, gracias al convenio tripartito entre la EPN, la compañía alemana Siemens – Schuckertwerke AG y la UNESCO. Durante varias décadas los equipos funcionaron con normalidad siendo un eje transversal para el desarrollo de la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Para años posteriores las condiciones se han deteriorado de manera tal que el tablero Siemens original operaba únicamente con dos máquinas rotativas de las seis originalmente instaladas. Concretamente los estudiantes se vieron obligados a obtener de la casa de máquinas únicamente una fuente DC variable para realizar estudios sobre motores y generadores de menor capacidad ubicadas en las diferentes mesas del laboratorio.

El presente trabajo de titulación toma de bases las tesis “Automatización del Tablero de Control del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN” [12] y “Diagnóstico y Actualización del Tablero de Control y Mesas de Trabajo del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN” [13]. Ambas tesis fueron realizadas en el año 2009, juntas lograron mejorar las condiciones de servicio del laboratorio, con la actualización de los diagramas unifilares de conexión entre el tablero principal Siemens y las mesas de trabajo, así como un proceso de identificación de elementos del tablero, entre otros méritos.

Lastimosamente en ninguna de estas tesis, se toma en consideración el equipamiento Ward Leonardo se limitan a describir que el mismo se encuentra fuera de operación. Existen algunas inconsistencias también entre los resultados entregados de ambas tesis, por lo cual en este trabajo de titulación se entrega una referencia confiable de los circuitos de fuerza y control del Panel 5, es decir del Grupo Ward Leonardo grupo variador de frecuencia.

El cuarto de máquinas ha estado en total abandono y ha sido usado como bodega de materiales propios del laboratorio, por lo cual en primera instancia se realizó una limpieza

general y un etiquetado, para identificar los componentes del equipamiento Ward Leonard, su estado actual y sus respectivas medidas correctivas.

Por las condiciones ambientales del cuarto de máquinas como son: temperatura, humedad, iluminación, ventilación, entre otras, todas las máquinas se encontraban en un estado físico aceptable a pesar de no haber sido intervenidas.

Esto representa una enorme ventaja inherente al diseño de las máquinas eléctricas y obviamente al no estar sometidas a regímenes de trabajo pesado; sus componentes están aún dentro de su vida útil.

A continuación, en las Figuras 55, 56, 57 y 58 se presenta un respaldo fotográfico de las condiciones en las que se ha recibido el conjunto Ward Leonard.



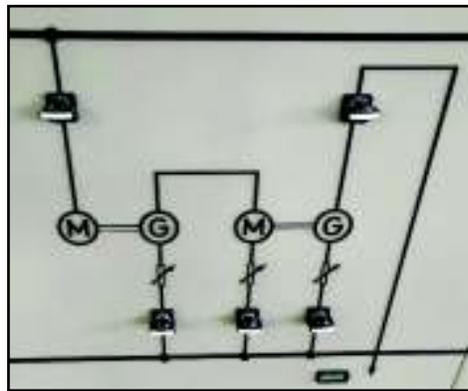
**Figura 55.** Estado del grupo Motor AC – Generador DC al inicio del trabajo



**Figura 56.** Estado del grupo Motor DC – Generador AC al inicio del trabajo



**Figura 57.** Tablero de Medición del Equipamiento Ward Leonard



**Figura 58.** Tablero de Control del Equipamiento Ward Leonard



**Figura 59.** Instrumentación de Control del Equipamiento Ward Leonard

## **2.2. Conjunto Variador de Frecuencia Ward Leonard**

La presente sección describe en forma completa el funcionamiento del conjunto variador de frecuencia y voltaje Ward Leonard; pasando por alto el estado actual de los mismos ya que esa problemática se desarrolla en la sección "*Diagnóstico Actual del Equipamiento Ward Leonard*".

En primera instancia es necesario recabar la información pertinente sobre sus componentes y conexiones, pues como se expuso en la sección 2.1, no se cuenta con una base sólida de partida. Por consiguiente, resulta imperativo realizar una identificación de todos los componentes del sistema y presentarlos agrupados de manera lógica. Para tal fin, se empezará por una identificación de todo el cableado involucrado, para así crear un punto de partida sobre el cual se pueda establecer con más claridad los componentes de fuerza y control del equipamiento.

### **2.2.1. Identificación del Cableado**

A fin de entender el estado y disposición de las conexiones entre las borneras, correspondientes al Panel 5, con los sistemas de excitación y fuerza ubicados en el cuarto de máquinas del laboratorio; se implanto un sistema de identificación por color (Figuras 60-63), con la finalidad de conocer con certeza el origen y destino de cada cable.

Este proceso tuvo una duración aproximada de 32 días; ya que, para una correcta identificación y seguimiento de los circuitos, se necesitaba que el Laboratorio de Máquinas Eléctricas no se encuentre desarrollando prácticas estudiantiles. De esta manera facilitaba realizar la inspección correspondiente al interior de los ductos del piso y al interior del tablero Siemens.

Toda la tarea resultó peculiarmente complicada, pues se trabajó en ambientes de espacio confinado, donde era muy sencillo confundir el cable en cuestión mientras se lidiaba con riesgos físicos y eléctricos inherentes al formato constructivo de las instalaciones del laboratorio.

Un resumen del trabajo de identificación y seguimiento se presenta en las Tablas número 5,6 y 7; las cuales se sustentan con la evidencia fotográfica de las Figuras 60, 61, 62 y 63.



**Figura 60.** Señalización de Cables en Borneras - Panel 5 del Tablero Siemens



**Figura 61.** Señalización de Elementos de Control del Panel 5 - Tablero Siemens



**Figura 62.** Señalización de Cableado Interno en Ductos de la Cuarto de Máquinas



**Figura 63.** Señalización de Cables en Terminales del Equipamiento Ward Leonard

**Tabla 5.** Conexiones de Paneles del Sistema Ward Leonard

# BORNERA	DESTINO	
	# BORNERA	# PANEL
1	1	4
1	1	6
2	2	4
2	2	6
3	3	4
3	3	6
4	4	4
4	4	6
5	5	4
5	5	6
6	6	4
6	6	6
7	7	4
7	7	6
8	8	4
8	8	6
10	22	4
11	23	4
12	24	4
13	13	8
14	Puente 1	
15	Puente 1	
16	Puente 1	
17	Puente 2	
18	Puente 2	
19	Puente 2	

20	Puente 3	
21	Puente 3	
22	41	9
22	Puente 4	
23	Puente 4	
26	45	9
28	44	9
30	43	9
36	Puente 5	
37	Puente 5	
39	50	9
41	49	9
43	48	9
45	47	9
48/60/64	33	4
98	55	9
99	58/59/60	9
114	56	9
115	57	9

**Tabla 6.** Conexiones del Sistema de Control de Campo del Sistema Ward Leonard

# BORNERA	DESTINO
24	Reóstato de Campo del Generador DC (5.1)
25	Reóstato de Campo del Generador DC (5.1)
26	Reóstato de Campo del Generador DC (5.1)
27	Reóstato de Campo del Generador DC (5.1)
28	Reóstato de Campo del Generador DC (5.2)
29	Reóstato de Campo del Generador DC (5.2)
30	Reóstato de Campo del Generador DC (5.2)
31	Reóstato de Campo del Generador DC (5.2)
33	Reóstato de Campo del Motor DC (5.5)
34	Reóstato de Campo del Motor DC (5.5)
35	Reóstato de Campo del Motor DC (5.5)
36	Reóstato de Campo del Motor DC (5.5)
39	Reóstato de Campo del Generador Síncronico (5.4)
40	Reóstato de Campo del Generador Síncronico (5.4)
41	Reóstato de Campo del Generador Síncronico (5.4)
42	Reóstato de Campo del Generador Síncronico (5.4)
43	Reóstato de Campo del Generador Síncronico (5.3)
44	Reóstato de Campo del Generador Síncronico (5.3)
45	Reóstato de Campo del Generador Síncronico (5.3)
46	Reóstato de Campo del Generador Síncronico (5.3)
48	Motor Fase Partida de Reóstato 5.2

48	Motor Fase Partida de Reóstato 5.1
49	Motor Fase Partida de Reóstato 5.2
50	Motor Fase Partida de Reóstato 5.2
51	Motor Fase Partida de Reóstato 5.2
53	Motor Fase Partida de Reóstato 5.1
54	Motor Fase Partida de Reóstato 5.1
55	Motor Fase Partida de Reóstato 5.1
57	Motor Fase Partida de Reóstato 5.5
58	Motor Fase Partida de Reóstato 5.5
59	Motor Fase Partida de Reóstato 5.5
60	Motor Fase Partida de Reóstato 5.5
60	Motor Fase Partida de Reóstato 5.3
61	Motor Fase Partida de Reóstato 5.3
62	Motor Fase Partida de Reóstato 5.3
63	Motor Fase Partida de Reóstato 5.3
64	Motor Fase Partida de Reóstato 5.4
65	Motor Fase Partida de Reóstato 5.4
66	Motor Fase Partida de Reóstato 5.4
67	Motor Fase Partida de Reóstato 5.4

**Tabla 7.** Interconexiones del Sistema Ward Leonard

<b># BORNERA</b>	<b>DESTINO</b>
70	Disyuntor Alimentación de Mesas del Laboratorio (R)
71	Disyuntor Alimentación de Mesas del Laboratorio (S)
72	Disyuntor Alimentación de Mesas del Laboratorio (T)
73	Disyuntor Alimentación de Mesas del Laboratorio (N)
74	Acoplamiento Panel 10-11
75	Acoplamiento Panel 10-11
76	Acoplamiento Panel 10-11
100	Terminal de Campo del Generador DC (K)
101	Terminal de Campo del Generador DC (J)
101	Interconexión de Reóstato 5.2 con Generador DC (J)
102	Interconexión de Reóstato 5.1 con Generador DC (K)
105	Interconexión de Reóstato 5.1 con Generador DC (P)
106	Interconexión de Reóstato 5.1 con Generador DC (N)
107	Interconexión de Reóstato 5.2 con Generador DC (T)
108	Terminal de Campo del Motor DC (K)
109	Terminal de Campo del Generador Sincrónico (J)
110	Interconexión de Reóstato 5.4 con Generador Sincrónico (S)
111	Interconexión de Reóstato 5.4 con Generador Sincrónico (T)
112	Interconexión de Reóstato 5.3 con Generador Sincrónico (T)
113	Terminal de Campo del Generador Sincrónico (K)
116	Frecuencímetro del Generador Sincrónico

117	Frecuencímetro del Generador Síncronico
118	Voltímetro del Generador Síncronico
119	Interconexión de Reóstato 5.4/5.3 con Generador Síncronico (Q)
120	Terminal de Campo del Motor DC (J)
121	Ventilador del Generador Síncronico
122	Ventilador del Generador Síncronico
123	Ventilador del Generador Síncronico
124	Ventilador del Generador Síncronico
124	Ventilador del Motor DC
125	Ventilador del Motor DC
126	Ventilador del Motor DC
127	Ventilador del Motor DC
128	Terminal del Motor Trifásico Inducción (V)
129	Terminal del Motor Trifásico Inducción (U)
130	Terminal del Motor Trifásico Inducción (W)
131	Terminal del Motor Trifásico Inducción (Carcaza)
132	Terminal del Motor Trifásico Inducción (y)
133	Terminal del Motor Trifásico Inducción (x)
134	Terminal del Motor Trifásico Inducción (z)

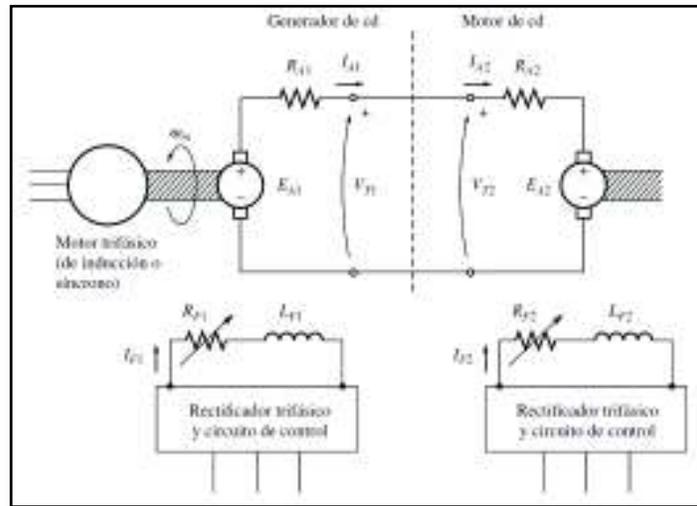
### 2.2.2. Descripción del Circuito de Fuerza Ward Leonard

El conjunto Ward Leonard en principio es un sistema variador de frecuencia; es decir un sistema que se vale de un arreglo de máquinas eléctricas para realizar una acción de control sobre la velocidad de un eje rotatorio. Dicho eje, sobre el cual tomará efecto la acción de control de velocidad, corresponde al del motor DC, en otras palabras, el conjunto Ward Leonard controla la velocidad de giro de dicho motor.

Para lograr este control de velocidad existen varias opciones, como se observa en el respaldo teórico, pero sin duda variar el voltaje aplicado sobre el circuito del inducido en una máquina eléctrica permite obtener una amplia gama de velocidades de giro, sin afectar significativamente el par máximo del motor.

En la sección 1.3.7.4 se analizó en detalle el método de control de velocidad, por medio de la variación del voltaje terminal aplicado al inducido; retomando esto se tiene que la respuesta a una variación sobre la magnitud de corriente de campo  $I_f$  es inversamente proporcional a la velocidad de operación del motor DC. Es decir que si  $R_f \uparrow$  aumenta  $\rightarrow I_f \downarrow$  disminuye  $\rightarrow w_m \uparrow$  aumenta, y complementariamente  $R_f \downarrow$  disminuye  $\rightarrow I_f \uparrow$  aumenta  $\rightarrow w_m \downarrow$  disminuye.

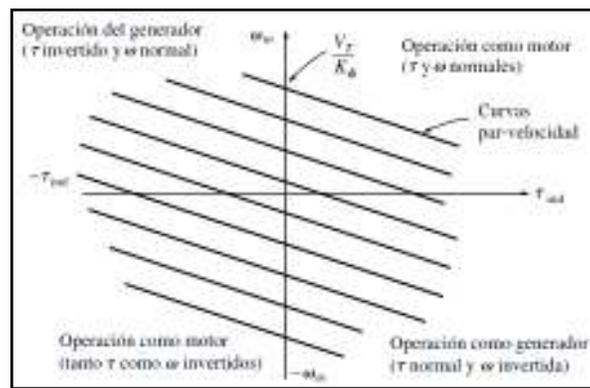
Esta acción de control de velocidad, solo es posible mediante la disponibilidad de una fuente DC variable. Es entonces donde se emplea un arreglo de dos máquinas adicionales para lograr alimentar al motor DC.



**Figura 64.** Sistema Ward Leonard - Control de Velocidad Sobre Motor DC [2]

Con el arreglo propuesto en la Figura 64, se tiene un motor trifásico (inducción o sincrónico) como el motor primario para el generador de DC y a su vez éste alimenta al motor DC; se obtiene entonces un Sistema Ward Leonard.

En el Sistema Ward Leonard el voltaje terminal aplicado al inducido del motor DC, se lo puede controlar con la variación de la corriente del devanado de campo del generador DC. En este punto cabe señalar que el Sistema Ward Leonard es “regenerable”, por ejemplo, si el motor DC levanta una carga, este se encuentra en un estado de consumo de potencia; mientras que, al bajar la misma carga, el motor DC pasa a actuar como generador y suministra potencia al sistema.



**Figura 65.** Versatilidad de Operación del Sistema Ward Leonard [2]

Este comportamiento se lo puede apreciar de una mejor manera en la Figura 65, la cual muestra los intervalos de operación del sistema de control Ward Leonard. El motor puede actuar en sentido horario en el primer cuadrante o hacia atrás en el tercer cuadrante y de la misma forma ser generador en los cuadrantes 2 y 4. [2]

Si en este punto, en el cual ya se puede ejercer total control sobre la velocidad de giro del eje; se acopla mecánicamente el eje del motor DC con el de un generador de AC, entonces la capacidad define una frecuencia específica para un voltaje generado.

Homólogamente al proceso anterior se tiene la posibilidad de realizar un ajuste sobre la corriente de campo del generador AC y de esta manera ejercer una acción de control sobre la amplitud de la señal de voltaje senoidal trifásica generada.

Con la incorporación de la última máquina, el equipamiento Ward Leonard es capaz de suministrar una señal alterna trifásica de voltaje y frecuencia variable; cuyos parámetros se definen modificando las corrientes de campo del generador DC, motor DC y generador AC; mediante el uso de los reóstatos de campo 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5, mostrados en la Figura 66.



**Figura 66.** Reóstatos de Campo del Sistema Ward Leonard

A continuación, se detallan las características de las cuatro máquinas con sus respectivos circuitos de campo que componen el Sistema Ward Leonard.

### 2.2.2.1. Motor Trifásico de Inducción

El motor AC se indica en la Figura 67, es un motor provisto de un sistema de arranque delta – estrella; a continuación se detalla en la Tabla 8 sus características de funcionamiento.

**Tabla 8.** Datos de Placa del Motor Trifásico de Inducción del Sistema Ward Leonard

<b>Código Siemens</b>	R 1426 - 4
<b>Numeración Siemens</b>	825837
<b>Código EPN</b>	ME 001 - 2
<b>Descripción</b>	Motor Trifásico de Inducción
<b>Rotor</b>	Jaula de Ardilla KL 13
<b>Norma Constructiva</b>	B3 P22
<b>Norma VDE</b>	530
<b>Alimentación Nominal</b>	220 V $\Delta$
<b>Corriente Nominal</b>	120 A $\Delta$
<b>Potencia Nominal</b>	36 kW
<b>Factor de Potencia</b>	0.87
<b>Frecuencia Nominal</b>	60 Hz
<b>Velocidad Nominal</b>	1755 rpm
<b>Clase Aislamiento</b>	E



**Figura 67.** Motor Trifásico de Inducción del Sistema Ward Leonard

### 2.2.2.2. Generador DC

Acoplado mecánicamente al motor trifásico de inducción, se tiene al generador DC de la Figura 68 cuyas principales características se mencionan en las Tabla 9 y 10.

**Tabla 9.** Datos de Placa del Generador DC del Sistema Ward Leonard

<b>Código Siemens</b>	G 1592 - 4
<b>Numeración Siemens</b>	616993
<b>Código EPN</b>	ME 001 - 1
<b>Descripción</b>	Generador DC
<b>Excitación</b>	Separada
<b>Norma Constructiva</b>	B3 P22
<b>Norma VDE</b>	530
<b>Clase Aislamiento</b>	E (Polos Paralelos) B (Polos Auxiliares)
<b>Velocidad Nominal</b>	1755 [rpm]

**Tabla 10.** Datos de Placa Operativos del Generador DC del Sistema Ward Leonard

<b>V</b>	<b>A</b>	<b>RPM</b>	<b>kW</b>
75	117	1755	8,8
245	115	1755	28,2
390	72	1755	28



**Figura 68.** Generador DC del Sistema Ward Leonard

Para tomar acción de control sobre el voltaje DC generado se dispone del circuito de excitación independiente conformada por los reóstatos 5.1 y 5.2 (Figura 69), los cuales se detallan en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Datos de Placa del Circuito de Excitación Separada Generador DC

Reóstato	5.1	5.2
Tipo	K 374 - 6M	K 374 - 10M
Norma VDE	660	660
Numeración Siemens	479748	479750
Resistencia	6,3 + 4/320 $\Omega$	367 + 7,5/2 $\Omega$
Voltaje Nominal	220 V	220 V
Corriente Nominal	5,2 A	3,1 A
Resistencia Máxima	22 k $\Omega$	
Resistencia Mínima	80 $\Omega$	



**Figura 69.** Circuito de Excitación Separada del Generador DC (5.2 arriba y 5.1 abajo)

### 2.2.2.3. Motor DC

El generador DC de la Figura 70 alimenta directamente al motor DC, controlando de forma directa la velocidad sobre este, sus características más importantes se indican en las Tablas 12 y 13.

**Tabla 12.** Datos de Placa del Motor DC del Sistema Ward Leonard

Código Siemens	QG 1292 - 4
Numeración Siemens	617366

<b>Código EPN</b>	ME 001 - 3
<b>Descripción</b>	Motor DC
<b>Excitación</b>	Separada
<b>Norma Constructiva</b>	B3 P22
<b>Norma VDE</b>	530
<b>Clase Aislamiento</b>	E (Polos Paralelos)
	B (Polos Auxiliares)

**Tabla 13.** Datos de Placa Operativos del Motor DC del Sistema Ward Leonard

<b>V</b>	<b>A</b>	<b>RPM</b>	<b>kW</b>
75	117	450	6,5
245	115	1800	25
390	72	3000	25



**Figura 70.** Motor DC del Sistema Ward Leonard

Para tomar acción de control sobre la velocidad de giro del motor DC se dispone del circuito de excitación independiente conformada por el reóstato 5.5 (Figura 71), el cual se detalla en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Datos de Placa del Circuito de Excitación Separada Motor DC.

<b>Reóstato</b>	5.5
<b>Tipo</b>	K 374 - 3M
<b>Norma VDE</b>	660
<b>Numeración Siemens</b>	480632
<b>Resistencia</b>	46+22 $\Omega$
<b>Voltaje Nominal</b>	220 V
<b>Corriente Nominal</b>	1,8 A
<b>Resistencia Máxima</b>	157 $\Omega$

<b>Resistencia Mínima</b>	100 $\Omega$
---------------------------	--------------



**Figura 71.** Circuito de Excitación Separada del Motor DC (5.5)

#### 2.2.2.4. Generador Sincrónico Rotor Liso

El motor DC de la Figura 72 proporciona un eje de velocidad variable, lo cual representa directamente la frecuencia del voltaje terminal alterno trifásico generado; junto a su sistema de excitación independiente permite tener una regulación de voltaje precisa y confiable; sus características se detallan en las Tablas 15 y 16.

**Tabla 15.** Datos de Placa del Generador Sincrónico del Sistema Ward Leonard

<b>Código Siemens</b>	QF 1292 - 4
<b>Numeración Siemens</b>	790787
<b>Código EPN</b>	ME 001 - 4
<b>Descripción</b>	Generador AC
<b>Rotor</b>	Cilíndrico
<b>Conexión Bobinas</b>	Y
<b>Norma Constructiva</b>	B3 P22
<b>Norma VDE</b>	530
<b>Clase Aislamiento</b>	E (Polos Paralelos)
<b>Factor de Potencia</b>	0,8

**Tabla 16.** Datos de Placa Operativos del Generador Sincrónico

V	A	RPM	Hz	kVA
57	70	450	15	7
230	70	1800	60	28
385	42	3000	100	28

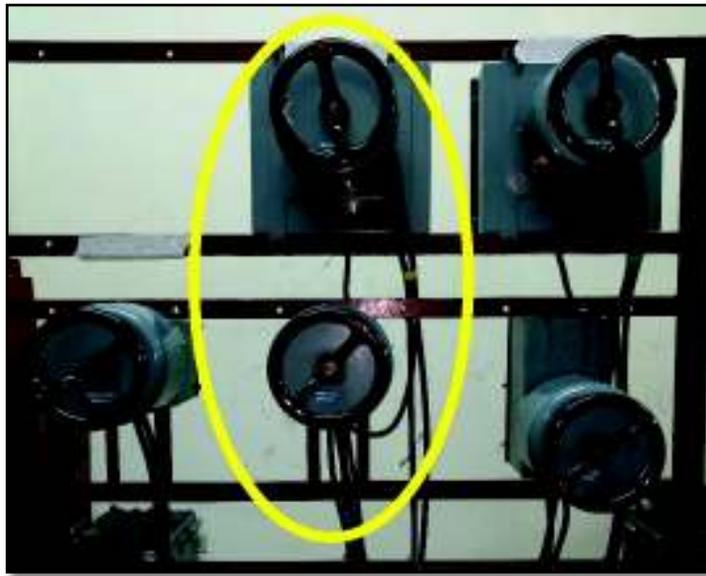


**Figura 72.** Generador Sincrónico del Sistema Ward Leonard

Para tomar acción de control sobre la amplitud del voltaje terminal en el generador sincrónico se dispone del circuito de campo conformado por los reóstatos 5.3 y 5.4 de la Figura 73 se indican en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Datos de Placa del Circuito de Campo del Generador Sincrónico

Reóstato	5.3	5.4
Tipo	K 374 - 3M	K 374 - 14M
Norma VDE	660	660
Numeración Siemens	479744	479742
Resistencia	1,52/11,5 $\Omega$	43,5+15 $\Omega$
Voltaje Nominal	220 V	220 V
Corriente Nominal	8,7 A	8,7 A
Resistencia Máxima	140 $\Omega$	
Resistencia Mínima	35 $\Omega$	



**Figura 73.** Circuito de Campo del Generador Sincrónico (5.4 arriba y 5.3 abajo)

### 2.2.2.5. Ventiladores

El sistema Ward Leonard incorpora dos ventiladores por motivos de refrigeración de devanados del motor DC y del generador Sincrónico, ambos ventiladores de idénticas características físicas y eléctricas. Si bien sus características constructivas no son de relevancia, su funcionamiento dentro del sistema Ward Leonard es crucial, pues una falla en estos ocasionaría daño permanente en los devanados o una desconexión repentina del equipamiento. Sus características se resumen por completo en su placa mostrada en la Figura 74.



**Figura 74.** Datos de Placa de los Ventiladores del Conjunto Motor DC – Generador AC

### 2.2.3. Descripción del Sistema de Control Ward Leonard

Básicamente el sistema de control del equipamiento Ward Leonard se encuentra distribuido en la parte posterior del Panel 5 del tablero Siemens. Para poder realizar un análisis más profundo, se lo ha subdividido de manera que por un lado se tiene el sistema de maniobras y por el otro el sistema de protecciones y enclavamientos.

A continuación, se describen las funciones y los componentes de ambos sistemas previo al diagnóstico se estado. El cableado interno del tablero resulta especialmente complicado de acceder motivo por el cual se presenta un mapeo macro con el fin de brindar una fuente confiable que muestre en detalle el conexionado con pequeñas deficiencias en lo referente a descripciones individuales de cada elemento.

#### 2.2.3.1. Sistema de Control y Mediciones

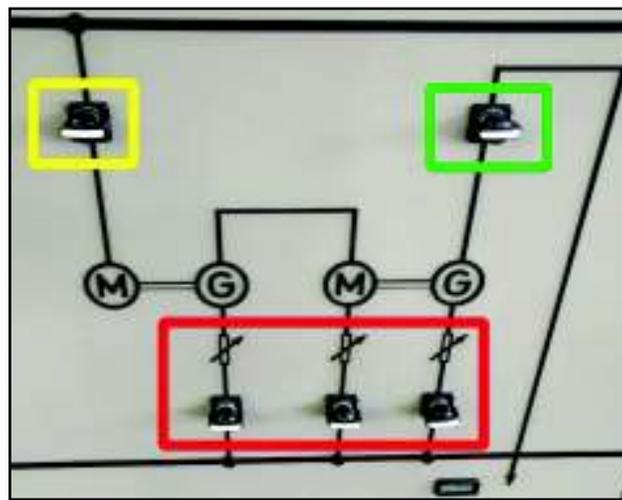
En primer lugar, se presenta una referencia gráfica por colores de la actual distribución de los sistemas de control y mediciones, tanto en la parte frontal del Panel 5, como en su parte posterior. Esta referencia resulta de gran ayuda para el desarrollo de la sección “*Diagnóstico Actual del Equipamiento Ward Leonard*”. La identificación por colores se la representa en la Tabla 18 y en las Figuras 75, 76 y 77.

**Tabla 18.** Identificación por Colores del Sistema de Control y Mediciones

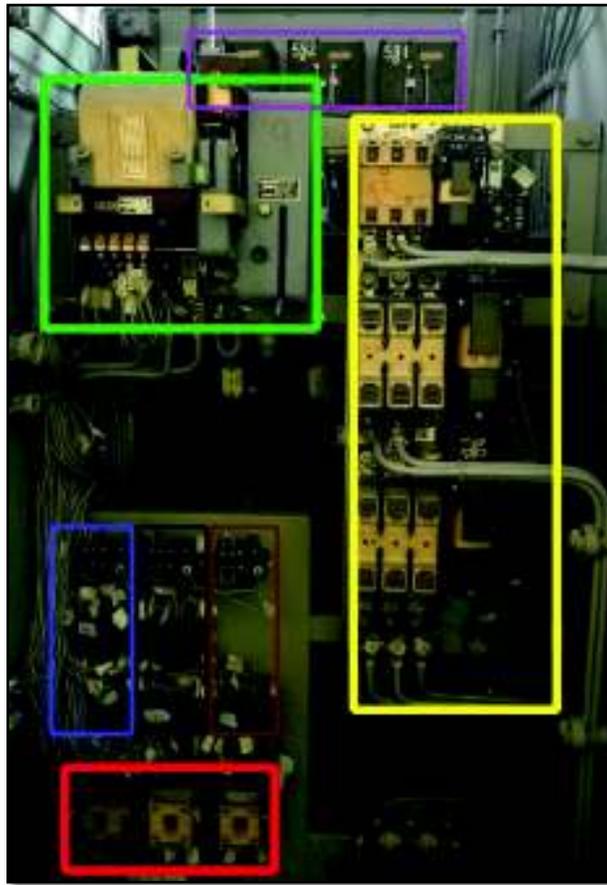
<b>COLOR</b>	<b>SISTEMA INVOLUCRADO</b>
Rojo	Circuitos de Campo: Generador DC, Motor DC y Generador AC
Verde	Disyuntor Para Habilitar Panel 10 con Salida a Mesas
Amarillo	Circuito de Arranque Y- $\Delta$ para Motor Trifásico Inducción
Azul	Conjunto Regulador de Voltaje del Generador DC
Café	Conjunto Regulador de Velocidad del Motor DC
Negro	Conjunto Regulador de Voltaje Terminal del Generador AC



**Figura 75.** Sistemas de Medición y Sistemas de Control de Campo



**Figura 76.** Diagrama Unifilar de Control del Conjunto Ward Leonard



**Figura 77.** Vista Posterior y Distribución de Subsistemas del Panel 5

### **2.2.3.1.1. Circuitos de Campo Generador DC, Motor DC y Generador AC**

En el sustento teórico se resalta la importancia de los circuitos de campo en las máquinas eléctricas pues, en su ausencia, resulta imposible físicamente llevar a cabo el proceso de conversión de energía (1.3.1). Por lo cual una de las consideraciones primarias que cumple a cabalidad el equipamiento multimáquina Ward Leonard, es verificar que todos estos circuitos estén alimentados desde el puente rectificador principal, para dar paso al encendido del conjunto y posterior operación del mismo.

Los circuitos se alimentan desde el puente rectificador de la casa de máquinas a un voltaje de 220 voltios DC. En la Figura 76, se denota en la parte inferior del tablero 3 contactores marca Siemens (Tabla 19), correspondientes al generador DC, al motor DC y al generador sincrónico.

**Tabla 19.** Datos de Placa de Contactores del Circuito de Campo

<b>Marca</b>	Siemens
<b>Elemento</b>	Contactador
<b>Potencia</b>	3.5 kW
<b>Voltaje Operación</b>	220 V
<b>VDE</b>	0660
<b>Contactos</b>	2 principales NO / 2 Aux NO / 2 Aux NC
<b>Código Tablero</b>	7c1 / 7c2 / 7c3

### **2.2.3.1.2. Disyuntor del Panel 10 - Salida a Mesas**

Un disyuntor es un elemento electromecánico utilizado para maniobrar con seguridad la interconexión circuitos eléctricos y al mismo tiempo brindar un grado importante de protección al sistema donde se encuentra instalado, sus características se indican en la Tabla 20.

Para este caso en particular el disyuntor ubicado en la parte superior del interior del panel 5 (Figura 77 – color verde) permite que el equipamiento Ward Leonard suministre energía eléctrica de voltaje y frecuencia variables, por intermedio del Panel 10, que es el encargado de habilitar cada mesa de trabajo.

Adicionalmente el disyuntor termomagnético protege al equipamiento Ward Leonard frente a dos condiciones de habitual ocurrencia en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas. Estos son los cortocircuitos que pueden ocurrir en las mesas de trabajo o situaciones de sobrecarga en los límites de potencia inherentes a los componentes motrices del equipamiento Ward Leonard.

Sea cualquiera de los dos casos que ocurra, automáticamente el disyuntor opera sin un sistema de recierre automático pues así lo amerita esta aplicación particular y únicamente puede volver a cerrarse de forma manual una vez que la contingencia haya sido superada.

**Tabla 20.** Datos de Placa del Disyuntor Principal de Alimentación a Mesas de Trabajo

<b>Marca</b>	Siemens – Schuckertwerke
<b>Elemento</b>	Disyuntor Termomagnético
<b>Tipo</b>	R 921 MIII – 100
<b>Modelo</b>	G 9718

<b>VDE</b>	0660
<b>Voltaje máx.</b>	500 V (AC)
<b>Corriente máx.</b>	100 A (AC)
<b>Accionador</b>	220 V / 60 Hz
<b>Código Tablero</b>	7a1

### 2.2.3.1.3. Circuito de Arranque Y- $\Delta$ para el Motor Trifásico de Inducción

En la sección 1.3.6.6 se presenta la base teórica, ventajas, diagrama simplificado y forma de operación de este método de arranque, por lo cual se describen las características del equipo que controla el arranque del motor trifásico de inducción con rotor en jaula (motor primario del equipamiento Ward Leonard). El sistema se encuentra identificado con color amarillo en la Figura 77.

**Tabla 21.** Datos de Placa del Disyuntor Principal de Alimentación a Puestos de Trabajo.

<b>Marca</b>	Siemens – Schuckertwerke
<b>Elemento</b>	Conjunto Arranque Y- $\Delta$
<b>Tipo</b>	K 987 - 8
<b>VDE</b>	0660
<b>Voltaje</b>	220 V (AC)
<b>Corriente</b>	100 A (AC)
<b>Frecuencia</b>	60 Hz
<b>Contactores</b>	KM1 KM2 KM3
<b>Fusibles Línea</b>	500 V / 125 A (5e9)
<b>Código Tablero</b>	5u1

### 2.2.3.1.4. Conjuntos Reguladores

En la Figura 76 se exponen las perillas de control de cada uno de los circuitos de campo, si bien los sistemas de control de corriente de campo del generador DC, motor DC y generador sincrónico se constituyen de manera muy similar, las variaciones sobre la

corriente DC en cada uno de los circuitos determina una característica diferente del suministro de energía eléctrica en los terminales de servicio.

En el capítulo 3, se detalla como cada uno de estos circuitos de control modifica la señal de voltaje en los puestos de trabajo y por ahora se limita a explicar los elementos constitutivos de los mismos.

Básicamente estos circuitos se componen de cuatro elementos:

- Perillas de Control

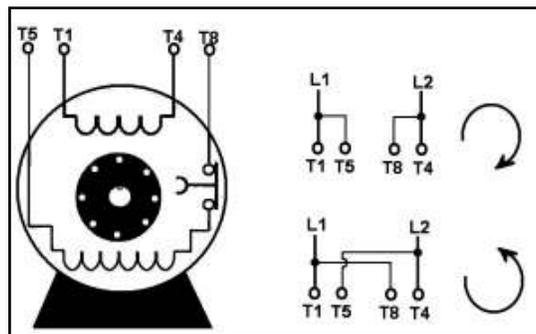
Son los mandos expuestos en la Figura 76 opera como un selector de tres posiciones con regreso automático, es decir que el giro a la derecha propicia un aumento en la corriente de campo, un giro a la izquierda la acción contraria; mientras que la posición de regreso automático mantiene la corriente constante.

- Reóstatos de Campo

Los reóstatos de campo sirven para limitar las corrientes de los devanados del generador DC, motor DC y generador sincrónico; cada uno de éstos se detalla junto a su máquina asociada en la sección 2.2.2, así como la ubicación física dentro del cuarto de máquinas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas (Figura 66).

- Motor Monofásico de Fase Partida

El Sistema Ward Leonard utiliza cinco reóstatos de campo para su completo control, asociados al generador DC se tiene a 5.1 y 5.2, para el motor DC está 5.5 y finalmente para el generador sincrónico se dispone de 5.4 y 5.3. Para poder controlar estos reóstatos desde el Panel 5 Siemens se dispone de motores monofásicos de fase partida (Figura 78 y 79) principalmente debido a su simplicidad para efectuar un control sobre su sentido de giro a baja velocidad. Sus características se resumen en la Tabla 22.



**Figura 78.** Descripción de Inversión de Giro del Motor Monofásico de Fase Partida



**Figura 79.** Motor Monofásico de Fase Partida Instalado en el Cuarto de Máquinas.

**Tabla 22.** Datos de Placa de Motores Monofásicos de Fase Partida

<b>Marca</b>	Siemens – Schuckertwerke
<b>Elemento</b>	Motor monofásico
<b>Tipo</b>	Fase partida
<b>VDE</b>	0660
<b>Voltaje</b>	220 V (AC)
<b>Corriente</b>	0,35 A (AC)
<b>Frecuencia</b>	50 Hz
<b>Potencia</b>	25 W
<b>Numeración</b>	18201750

- Juego de Contactores

Para controlar el sentido de giro de los motores monofásicos de fase partida, se dispone de un juego de dos contactores por cada reóstato de campo (Figura 77 – colores: azul, café y negro). Estos contactores junto con los fines de carrera se detallan en el mapeo resultante del circuito de control, todos son iguales y éstas sus características se exponen en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Datos de Placa de Contactores del Sistema de Control

<b>Marca</b>	Siemens
<b>Elemento</b>	Contactador
<b>Tipo</b>	Tripolar
<b>Voltaje Bobina</b>	200 V (DC)

<b>Voltaje</b>	500 V (AC)
<b>Corriente</b>	6 A (AC)
<b>Contactos Principales</b>	3 NO
<b>Contactos Auxiliares</b>	1 NC
<b>Numeración</b>	K 915 0 H4
<b>Identificación Tablero</b>	5c2, 5c3, 5c4, 5c5, 5c7, 5c8, 5c10, 5c11, 5c12, 5c13

### 2.3. Diagnóstico Actual del Grupo Ward Leonard

Hasta este punto, se ha llegado a detallar todos y cada uno de los elementos que conforman el Sistema Ward Leonard; debido a que el tablero Siemens ya cuenta con su propio sistema de identificación, por lo cual no es conveniente implantar uno nuevo.

Resulta mucho más favorable cruzar toda esta base de datos y unificarla a fin de que resulte sencilla la identificación previa a las labores de mantenimiento para poner en línea el Sistema Ward Leonard. Dicha descripción se representa en las Tablas 24, 25 y 26.

**Tabla 24.** Elementos del Sistema Ward Leonard – Panel 5 (Fig. 75 y 76)

<b>Cód.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Rango</b>	<b>Función</b>
5g1	Amperímetro AC	0 - 100 A	Libre asignación
5g2	Amperímetro AC	0 - 100 A	Libre asignación
5g3	Amperímetro AC	0 - 100 A	Libre asignación
5g6	Amperímetro AC	0 - 150 A	Corriente Consumida por el Motor Trifásico de Inducción
5g4	Voltímetro AC	0 - 250 V	Voltaje Suministrado a Mesas de Trabajo
5g5	Frecuencímetro	0 - 100 Hz	Frecuencia del Voltaje Suministrado a Mesas de Trabajo
5b1	Selector 4 Posiciones		Selección entre Voltajes de Fase o Voltajes de Línea a Mostrar en 5g4
5g7	Amperímetro DC	0 - 6 A	Corriente del Devanado de Campo del Generador DC
5g8	Amperímetro DC	0 - 6 A	Corriente del Devanado de Campo del Motor DC
5g9	Amperímetro DC	0 - 6 A	Corriente del Devanado de Campo del Generador AC
5b2	Selector 2 Posiciones con Retorno		Control Sobre Reóstatos del Generador DC
5b3	Selector 2 Posiciones con Retorno		Control Sobre Reóstato del Motor DC
5b4	Selector 2 Posiciones con Retorno		Control Sobre Reóstatos del Generador Síncronico
5b5	Switch "Push & Turn"	ON/OFF	Circuito Arrancador Y - $\Delta$ del Motor AC
5b6	Switch "Push & Turn"	ON/OFF	Circuito de Excitación Separada del Generador DC

5b7	Switch "Push & Turn"	ON/OFF	Circuito de Excitación Separada del Motor DC
5b8	Switch "Push & Turn"	ON/OFF	Circuito de Campo del Generador Sincrónico
5b9	Switch "Push & Turn"	ON/OFF	Disyuntor Termomagnético para Interconexión con Panel 10

**Tabla 25.** Elementos del Sistema Ward Leonard – Panel 5 (Fig. 77)

<b>Cód.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Función</b>
5f2	Arreglo de TC's	Izq. de Zona Azul	Transformadores de Corriente para Mediciones del Sistema de Protecciones
5a2	Disyuntor Termomagnético	Zona Verde	Disyuntor para Interconexión con Panel 10 y Protección del Circuito Fuerza
5d2	Relé Biestable	Izq. de Zona Azul	Relé Biestable para Circuito de Protecciones 1
5d6	Relé Biestable	Izq. de Zona Azul	Relé Biestable para Circuito de Protecciones 2
5ga	Amplificador Biestable	Izq. de Zona Azul	Amplificador Biestable para Ambos Circuitos de Protecciones
5e15	Contactador Tripolar	Zona Azul	Contactador que Habilita Variaciones de Corriente de Campo en el Generador DC
5c2	Contactador Tripolar	Zona Azul	Contactador de Giro Horario de Motor de Reóstato 5.2
5c3	Contactador Tripolar	Zona Azul	Contactador de Giro Antihorario de Motor de Reóstato 5.2
5c4	Contactador Tripolar	Zona Azul	Contactador de Giro Horario de Motor de Reóstato 5.1
5c5	Contactador Tripolar	Zona Azul	Contactador de Giro Antihorario de Motor de Reóstato 5.1
5e17	Contactador Tripolar	Zona Negra	Contactador que Habilita Variaciones de Corriente de Campo en el Generador AC
5c10	Contactador Tripolar	Zona Negra	Contactador de Giro Horario de Motor de Reóstato 5.3
5c11	Contactador Tripolar	Zona Negra	Contactador de Giro Antihorario de Motor de Reóstato 5.3
5c12	Contactador Tripolar	Zona Negra	Contactador de Giro Horario de Motor de Reóstato 5.4
5c13	Contactador Tripolar	Zona Negra	Contactador de Giro Antihorario de Motor de Reóstato 5.4
5e16	Contactador Tripolar	Zona Café	Contactador que Habilita Variaciones de Corriente de Campo en el Motor DC
5c7	Contactador Tripolar	Zona Café	Contactador de Giro Horario de Motor de Reóstato 5.5
5c8	Contactador Tripolar	Zona Café	Contactador de Giro Antihorario de Motor de Reóstato 5.5
5c1	Contactador Bipolar	Zona Roja	Contactador de Circuito de Excitación Separada Generador DC
5c9	Contactador Bipolar	Zona Roja	Contactador de Circuito de Excitación Separada Motor DC
5c6	Contactador Bipolar	Zona Roja	Contactador de Circuito de Campo del Generador Sincrónico
5u1	Arrancador Y - $\Delta$	Zona Amarilla	Circuito Arrancador Y - $\Delta$ del Motor AC (KM1, KM2, KM3)
5d1	Contactador Tripolar	Izq. de Zona Azul	Contactador de Circuitos de Protección
5d3	Contactador Tripolar	Izq. de Zona Azul	Contactador de Circuitos de Protección
5d5	Contactador Tripolar	Izq. de Zona Azul	Contactador de Circuitos de Enclavamientos

5d4	Contactador Tripolar	Izq. de Zona Azul	Contactador de Circuitos de Enclavamientos
5c6a	Contactador Tripolar	Izq. de Zona Azul	Contactador de Circuitos de Enclavamientos
5a4	Guardamotor	Der. de Zona Amarilla	Guardamotor del Motor Trifásico de Inducción
5a5	Guardamotor	Der. de Zona Amarilla	Guardamotor del Motor DC

**Tabla 26.** Elementos del Sistema Ward Leonard – Cuarto de Máquinas

Código EPN	Tipo	Descripción
ME 001 - 2	R 1426 - 4	Motor Trifásico de Inducción con Rotor en Jaula ( $\Delta$ )
ME 001 - 1	G 1592 - 4	Generador DC de Excitación Separada
ME 001 - 3	QG 1292 - 4	Motor DC de Excitación Separada
ME 001 - 4	QF 1292 - 4	Generador Sincrónico de Rotor Liso (Y)
5.1	K 374 - 6M	Reóstato de Campo del Generador DC - Regulación Amplia
5.2	K 374 - 10M	Reóstato de Campo del Generador DC - Regulación Fina
5.3	K 374 - 3M	Reóstato de Campo del Gen. Sincrónico - Regulación Amplia
5.4	K 374 - 14M	Reóstato de Campo del Gen. Sincrónico - Regulación Fina
5.5	K 374 - 3M	Reóstato de Campo del Motor DC - Regulación Fina
Vent 1	L 258	Ventilador de Motor DC
Vent 2	L 258	Ventilador de Generador Sincrónico de Rotor Liso (Y)

Desde esta sección en adelante se referirá a los elementos con los códigos dispuestos en las primeras columnas de las Tablas 24, 25 y 26; de esta manera simplifica el seguimiento del sistema y su representación en planos en el software AutoCAD.

Puesto en marcha el equipamiento Ward Leonard se obtuvo resultados muy desfavorables, pues ni siquiera existe presencia de una onda de voltaje en los terminales del generador, por lo cual el estado completo del conjunto es **Fuera de Operación**.

Con el fin de volver a poner el Sistema Ward Leonard operativo al cien por ciento de su capacidad, se da inicio a la tarea de diagnosticar cada subsistema por separado: control y fuerza; se encuentra de esta manera los elementos que deben someterse a mantenimiento o ser reemplazados, acciones que se describirán en la sección 2.4 correspondiente a “Plan de Mantenimiento Correctivo y Puesta en Operación”.

### 2.3.1. Diagnóstico de los Sistemas de Control del Equipamiento Ward Leonard

Se ha decidido comenzar por analizar los circuitos de control y protecciones ubicados al interior del Panel 5 del tablero Siemens, pues es el sistema con un mayor número de

elementos asociados. No se puede determinar correctamente el estado de un equipo, sin antes verificar el funcionamiento completo de su circuito de control en forma independiente.

Para este objetivo se ha desconectado todo elemento de las borneras de entrada al tablero, las mismas que se encuentran ubicadas en su parte inferior, para poder diagnosticar el estado de cada uno se expone la Tabla 27.

**Tabla 27.** Diagnóstico del Sistema de Control del Equipamiento Ward Leonard

<b>Cód.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Estado</b>	<b>Observaciones</b>
5g1	Amperímetro AC	Operativo	
5g2	Amperímetro AC	Operativo	
5g3	Amperímetro AC	Operativo	
5g6	Amperímetro AC	Operativo	
5g4	Voltímetro AC	Operativo	
5g5	Frecuencímetro	Operativo	
5b1	Selector 4 Posiciones	Operativo	
5g7	Amperímetro DC	Operativo	
5g8	Amperímetro DC	Operativo	
5g9	Amperímetro DC	Operativo	
5b2	Selector 2 Posiciones con Retorno	Operativo	
5b3	Selector 2 Posiciones con Retorno	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5b4	Selector 2 Posiciones con Retorno	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5b5	Switch "Push & Turn"	Operativo	
5b6	Switch "Push & Turn"	Operativo	
5b7	Switch "Push & Turn"	Operativo	
5b8	Switch "Push & Turn"	Operativo	
5b9	Switch "Push & Turn"	Operativo	
5f2	Arreglo de TC's	Operativo	
5a2	Disyuntor Termomagnético	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Deficiente
5d2	Relé Biestable	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Deficiente
5d6	Relé Biestable	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Deficiente
5ga	Amplificador Biestable	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Deficiente
5e15	Contactador Tripolar	Operativo	
5c2	Contactador Tripolar	Operativo	
5c3	Contactador Tripolar	Operativo	
5c4	Contactador Tripolar	Operativo	
5c5	Contactador Tripolar	Operativo	
5e17	Contactador Tripolar	Operativo	
5c10	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5c11	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5c12	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5c13	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5e16	Contactador Tripolar	Operativo	
5c7	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5c8	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok

5c1	Contactador Bipolar	Operativo	
5c9	Contactador Bipolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5c6	Contactador Bipolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5u1	Arrancador Y - $\Delta$	Operativo	
5d1	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5d3	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5d5	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5d4	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5c6a	Contactador Tripolar	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5a4	Guardamotor	Operativo	
5a5	Guardamotor	Operativo	
-	Breakers de Circuitos Control	Por Definir	Requieren Pruebas

### 2.3.2. Diagnóstico de los Sistemas de Fuerza del Equipamiento Ward Leonard

Como se puede observar en la sección 2.3.1, existen varios elementos fuera de operación en el panel cinco; cuyas acciones correctivas se llevarán a cabo en la sección 2.4, en ausencia del sistema de control y protecciones, se opta por realizar testeos (prueba y error) individuales en cada máquina.

La finalidad de estas pruebas realizadas, no es detectar directamente los fallos, si no la de brindar una idea completa de cuáles son los equipos que operan con normalidad y cuáles deben ser sometidos a pruebas más específicas para determinar el daño, corregirlo y dejarlo operativo para su posterior puesta en servicio, con lo que se obtiene la Tabla 28.

**Tabla 28.** Diagnóstico del Sistema de Fuerza del Equipamiento Ward Leonard

Código EPN	Descripción	Estado	Observaciones
ME 001 - 2	Motor Trifásico de Inducción	Operativo	Requiere Pruebas
ME 001 - 1	Generador DC	Operativo	Requiere Pruebas
ME 001 - 3	Motor DC	Fuera de Servicio	Requiere Pruebas
ME 001 - 4	Generador Sincrónico	Fuera de Servicio	Requiere Pruebas
5.1	Reóstato y Motor de Campo del Generador DC	Operativo	
5.2	Reóstato y Motor de Campo del Generador DC	Operativo	
5.3	Reóstato y Motor de Campo del Gen. Sincrónico	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok

5.4	Reóstato y Motor de Campo del Gen. Sincrónico	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
5.5	Reóstato y Motor de Campo del Motor DC	Fuera de Servicio	Estado Mecánico Ok
Vent 1	Ventilador de Motor DC	Fuera de Servicio	Requiere Pruebas
Vent 2	Ventilador de Generador Sincrónico	Fuera de Servicio	Requiere Pruebas

## 2.4. Mantenimiento Correctivo y Preventivo

El mantenimiento se lo puede definir como la acción de control constante sobre las instalaciones y equipamiento acompañada de un conjunto de trabajos de reparación y revisiones periódicas, necesarias para garantizar el funcionamiento óptimo y su conservación.

Todas estas tareas de mantenimiento planificadas a realizarse sobre el conjunto Ward Leonard tienen varios objetivos propios, mismos que se ponen en concordancia con el objetivo principal y específicos del presente trabajo de titulación; estos son:

- ✓ Evitar, reducir y dado el caso, reparar, daños sobre el conjunto.
- ✓ Disminuir significancia de fallos que no sean evitables.
- ✓ Evitar detenciones fortuitas o paro generalizado de maquinaria.
- ✓ Evitar accidentes.
- ✓ Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.
- ✓ Conservar los sistemas de fuerza y control en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- ✓ Prolongar la vida útil del conjunto Ward Leonard
- ✓ Reducción de Costos

Para detectar problemas, diagnosticar fallos y realizar mediciones con voltaje en un panel trifásico o en la casa de máquinas se procederá con el siguiente protocolo:

1. El uso de EPP (equipo de protección personal) recomendado en esta situación es: casco, gafas transparentes, ropa de preferencia en tela jean, zapatos aislantes, guantes dieléctricos.

2. Antes de cada tarea, verificar que se cuente con todos los instrumentos de medición a utilizar y a su vez, que éstos sean de la categoría de seguridad III en adelante (600 V).
3. Para la toma de mediciones se emplea el sistema de tres puntos: medir en primera instancia un circuito cargado conocido, medir el circuito objetivo y luego volver a medir el circuito cargado. De esta manera se garantiza que el instrumento de medición funcione correctamente en cada medición.
4. Durante el desarrollo de cualquier actividad de mantenimiento se debe detener a analizar cada situación para precautelar la salud y el equipo.

Una vez identificados los factores problemáticos del conjunto Ward Leonard, mediante la aplicación del protocolo descrito, se expone en forma resumida cada acción correctiva a ser implantada. Todos los resultados del mantenimiento se exponen en el capítulo 3.

En primer lugar, se ha realizado una limpieza de todos los elementos del conjunto Ward Leonard (tablero de control y cuarto de máquinas), acompañados de un ajuste completo de terminales y borneras; con la finalidad de evitar daños por desconexiones inesperadas y también para eliminar errores al momento de mapear toda la circuitería, una muestra se expone en la Figura 80 y 81.



**Figura 80.** Labores de Limpieza y Ajuste en Casa de Máquinas

Durante el desarrollo de esta sección se describen las acciones de mantenimiento tomadas en cada problema existente, junto con el resultado parcial correspondiente a dicha acción.



**Figura 81.** Labores de Limpieza y Ajuste en Canales y Tablero Principal

Las labores de limpieza develaron problemas desde un principio, existía cableado correspondiente a los circuitos de fuerza; concretamente a la conexión entre el generador DC y el motor DC, junto a un cortocircuito evidente en el cableado de excitación separada del motor DC. Ambos fenómenos ocasionados por animales roedores que destruyeron las chaquetas plásticas que los protegen, afortunadamente los accesos que comunicaban los canales del laboratorio con el sistema de desagüe de la EPN y la EPMAPS, fueron tapados con cemento para sellarlos. Por lo cual la primera acción de mantenimiento fue reemplazar ese cableado y verificar ausencia de daños de la misma índole, en todo el conjunto de conexiones.

Al momento de realizar el ajuste en borneras se encuentran varios terminales flojos, debido a que la corriente circulante provoca un campo que es capaz de retirar, con el paso del tiempo, ligeramente los tornillos que los sujetan. Esto tuvo como consecuencia directa que, al momento de mover cualquier cable, resultaba en accionamientos de contactores en forma totalmente aleatoria, inclusive sobre los Paneles 2 y 4.

La mejor opción, aunque también la más larga en ejecutar, fue la de mapear todos los circuitos en el software AutoCAD, proceder a retirar todo el cableado; comprobando su estado uno por uno, reemplazándolos cuando fue necesario, con la finalidad de reinstalarlos. Resulta demasiado extenso describir los cables reemplazados uno a uno, por lo que esto no está documentado, en contraparte en el capítulo 3 se presenta un completo detalle del cableado, con el cual el equipamiento Ward Leonard se entrega cien por ciento operativo para integrarse a tareas de investigación o docencia en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Antes de proceder con el mantenimiento en los demás elementos, en este punto se realiza un examen de continuidad completo entre terminales tanto de los circuitos de control y de fuerza para poder proseguir de manera confiable a determinar el conjunto de problemas hallados en el equipamiento Ward Leonard.

Se describe a continuación en la Tabla 29 un conjunto de acciones a desarrollarse sobre los elementos que se determinó con anterioridad como defectuosos.

**Tabla 29.** Plan de Acción de Mantenimiento Sobre el Equipamiento Ward Leonard

<b>Cód.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Acción de Mantenimiento Correctivo</b>
5b3	Selector 2 Posiciones con Retorno	Desarme y Revisión Mecánica
5b4	Selector 2 Posiciones con Retorno	Desarme y Revisión Mecánica
5a2	Disyuntor Termomagnético	Reparación en Taller Especializado
5d2	Relé Biestable	Pruebas Eléctricas de Operación
5d6	Relé Biestable	Pruebas Eléctricas de Operación
5ga	Amplificador Biestable	Pruebas Eléctricas de Operación
5c10	Contactador Tripolar	Corrección en Circuito de Control
5c11	Contactador Tripolar	Corrección en Circuito de Control
5c12	Contactador Tripolar	Reemplazo Total
5c13	Contactador Tripolar	Reemplazo Total
5c7	Contactador Tripolar	Reemplazo Total
5c8	Contactador Tripolar	Reemplazo Total
5c9	Contactador Bipolar	Pruebas Eléctricas y Mecánicas
5c6	Contactador Bipolar	Pruebas Eléctricas y Mecánicas
5d1	Contactador Tripolar	Verificación de Control
5d3	Contactador Tripolar	Verificación de Control
5d5	Contactador Tripolar	Verificación de Control
5d4	Contactador Tripolar	Verificación de Control
5c6a	Contactador Tripolar	Verificación de Control
-	Breakers de Circuitos Control	Reemplazo Total
ME 001 - 2	Motor Trifásico de Inducción	Requiere Pruebas Individuales
ME 001 - 1	Generador DC	Requiere Pruebas Individuales
ME 001 - 3	Motor DC	Requiere Pruebas Individuales
ME 001 - 4	Generador Sincrónico	Requiere Pruebas Individuales
5.3	Reóstato y Motor de Campo del Gen. Sincrónico	Reóstato Fallo Mecánico Motor del Reóstato Requiere Mantenimiento
5.4	Reóstato y Motor de Campo del Gen. Sincrónico	Reóstato Ok Motor del Reóstato Requiere Mantenimiento
5.5	Reóstato y Motor de Campo del Motor DC	Reóstato Fallo Mecánico Motor del Reóstato Requiere Mantenimiento
Vent 1	Ventilador de Motor DC	Requiere Pruebas Individuales
Vent 2	Ventilador de Generador Sincrónico	Requiere Pruebas Individuales

El grupo de mayor importancia en este enfoque de mantenimiento es el cuarto de máquinas, conformada por el motor trifásico de inducción, el generador DC, el motor DC y finalmente el generador sincrónico.

Sobre estas cuatro máquinas se pondrá total atención en sus condiciones operativas, de respuesta y de control, pues son de vital importancia para la puesta en operación del conjunto.

Se realizaron pruebas estrictas sobre su funcionamiento, dejando de lado el enfoque de sus características internas, a excepción de sus circuitos de campo donde se realizan acciones de control. El punto de interés es ver al Ward Leonard como una sola unidad, determinando el comportamiento de cada máquina del conjunto para documentar su respuesta completa.

- Revisión Mecánica de Selectores 5b3 y 5b4

Ambos selectores (5b3 y 5b4) de dos posiciones, con regreso automático, tienen la función de mover los motores de los reóstatos mostrados en la Figura 66, 5b3 controla la intensidad de corriente en el circuito de excitación separada del motor DC, como se explicó en el desarrollo teórico, mediante esta regulación de corriente en el reóstato 5.5 se obtiene una regulación de velocidad propia del motor DC.

Mientras 5b4 tiene una acción muy parecida sobre el generador sincrónico y su circuito de campo, de manera homóloga el control de corriente DC sobre los reóstatos 5.4 y 5.3, resulta en el control de amplitud de la onda de voltaje trifásica suministrada a las mesas a través del disyuntor 5a2.

Se comprueba que físicamente, ambos selectores funcionan correctamente, pero no accionan los contactores asociados a cada uno, por lo cual éstos pasan a declararse como “en funcionamiento” y se traslada la atención a dichos contactores:

- ✓ 5c7 y 5c8 para el reóstato 5.5
- ✓ 5c12 y 5c13 para el reóstato 5.4
- ✓ 5c10 y 5c11 para el reóstato 5.3

- Disyuntor Termomagnético

El disyuntor termomagnético 5a2 y su interruptor asociado 5b9 no responden, de igual manera se comenzó por verificar el estado físico de 5b9, el cual está en perfectas

condiciones, develando así que el disyuntor 5a2 presenta problemas para cerrarse y mantenerse cerrado.

Este problema radica sobre los resortes de accionamiento y el motor del que está provisto para realizar esta acción, por su antigüedad se prefiere contactar a personal dedicado de la misma Siemens para realizar el mantenimiento del equipo.

Se realiza un despiece, cambio de resortes y limpieza del motor, con lo cual se solucionó el problema de la interconexión entre el equipamiento Ward Leonard y las mesas de trabajo. El equipo se encuentra operativo y responde por completo a condiciones simuladas de fallas externas o sobrecargas.

- Relés Biestables

Estos relés junto a su amplificador biestable, tienen la función de controlar el circuito de enclavamientos, por motivos que no se determinaron, estos se encontraron desconectados, con cables faltantes e incluso con un daño irreparable, por fortuna se pide a Siemens y se obtiene uno exactamente igual.

Por esto, el relé de la derecha en la Figura 82 fue reparado, mientras el de la izquierda es remplazado.



**Figura 82.** Relés y Regulador Biestable

Con esto, al sentir un pulso sobre el set del relé, éste se magnetiza a través del diodo principal, cerrando los contactos a posición de trabajo; la única forma de volver a abrir estos contactos es mediante otro pulso de dirección contraria al primero, pues así el relé se desmagnetiza.

Esto garantiza la operación correcta del circuito de protecciones y enclavamientos en toda condición.

- Contactores

Todos los contactores siguieron un mismo protocolo de pruebas, con resultados y acciones diferentes, que se especifican en la Tabla 28. El protocolo es:

- ✓ Comprobar conexionado.
- ✓ Verificación de presencia de voltaje DC en su bobina.
- ✓ Presionar test y verificar cierre de contactos.

**Tabla 30.** Plan de Acción de Mantenimiento Sobre Contactores

<b>Cód.</b>	<b>Problema Identificado</b>	<b>Acción de Mantenimiento</b>	<b>Estado Entrega</b>
5c10	Mal conexionado	Reemplazo de cables y pruebas	Ok
5c11	Mal conexionado	Reemplazo de cables y pruebas	Ok
5c12	Bobina no Opera	Reemplazo de Contactador	Ok
5c13	Bobina no Opera	Reemplazo de Contactador	Ok
5c7	Bobina no Opera	Reemplazo de Contactador	Ok
5c8	Bobina no Opera	Reemplazo de Contactador	Ok
5c9	Conexión Obsoleta	Reemplazo de cables y pruebas	Ok
5c6	Conexión Obsoleta	Reemplazo de cables y pruebas	Ok
5d1	No Alimentados por Vcontrol	Señal de control directa a bobinas	Ok
5d3	No Alimentados por Vcontrol	Señal de control directa a bobinas	Ok
5d5	No Alimentados por Vcontrol	Señal de control directa a bobinas	Ok
5d4	No Alimentados por Vcontrol	Señal de control directa a bobinas	Ok
5c6a	No Alimentados por Vcontrol	Señal de control directa a bobinas	Ok

Toda acción de control tomada, se dimensionó para no interferir con los sistemas de enclavamientos, pues son primordiales para el arranque, operación y apagado del conjunto Ward Leonard.

- Breakers de Control

Ubicados en los contornos del doble fondo del Panel 5, Figura 83, se tiene varios breakers que sirven para activar y desactivar partes del circuito de control y enclavamientos. Si bien esa función no es necesaria en la operación, mantenerlos ahí asegura la salida de cualquier sistema frente a una falla importante que se pudiera dar sobre el equipamiento Ward Leonard.

Estos breakers son c6 modulares para riel din, es decir dimensionados a un corte sobre los 6 A y con un consumo promedio de 4 W, con grado de contaminación hasta nivel 3

resultando muy útil pues están expuestos a impurezas y polvos de forma constante y abundante.

El protocolo utilizado fue sencillo: medir continuidad sobre los polos cuando el switch se encuentra cerrado, todos los que no cumplieron con este requerimiento fueron reemplazados, representando un 30 por ciento del total.



**Figura 83.** Breakers del Circuito de Protección y Enclavamientos

- Reóstatos de Campo

Cuando se refiere a este equipo se debe considerar que se está tratando un solo conjunto compuesto por un reóstato y un motor monofásico de fase partida, por lo cual esta problemática se divide en dos partes.

La primera es comprobar el estado del reóstato, es decir, moviendo en forma manual el volante debe cambiar la resistencia de campo, esto es posible realizando un despiece de la misma y accediendo a los terminales internos como los mostrados en la Figura 84.

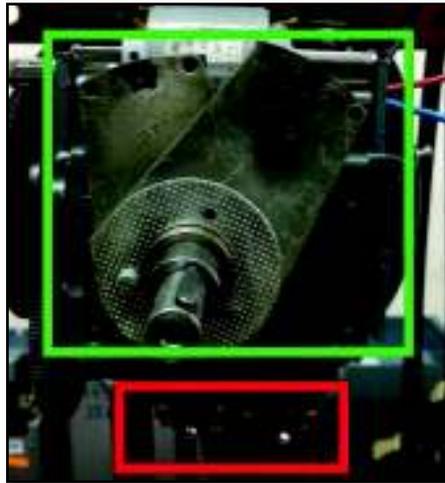


**Figura 84.** Reóstatos de Campo 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5

Al realizar estas pruebas sobre cada uno de los reóstatos de campo, se pudo evidenciar que todo el sistema responde a la perfección, permitiendo una variación muy suave y controlada en comparación de cuando se le hace desde el Tablero Siemens – Panel 5.

En este punto es posible configurar los fines de carrera que detectan cuando el reóstato está en su valor máximo o mínimo, esto es de vital importancia para el sistema de protecciones y enclavamientos. Sin estos fines de carrera calibrados el sistema no arrancará nunca, pues la condición deseada de arranque es con la resistencia máxima para tener la menor corriente de campo e irla variando gradualmente.

Los fines de carrera no son más que switches instalados en su contorno (rojo) que detecta una protuberancia en una placa atada a su eje (verde), una para su valor de resistencia máxima y otra para resistencia mínima como se observa la Figura 85.



**Figura 85.** Estructura Control del Motor Controlador de Reóstatos de Campo



**Figura 86.** Motores de Reóstatos de Campo listo para Pruebas

Entonces, el problema recae sobre los motores monofásicos de fase partida con inversión de giro, de igual manera se procede a analizar uno a uno. El protocolo utilizado es alimentarlo directamente como se indica en la Figura 78 de la sección 2.2.3.1.4 y el proceso se lo verifica en la Figura 86.

**Tabla 31.** Resultados de Pruebas Sobre Motores de Reóstatos

<b>Cód.</b>	<b>Problema Identificado</b>	<b>Descripción</b>	<b>Estado Entrega</b>
5.1	Motor Opera	Control Habilitado desde Panel	Ok
5.2	Motor Opera	Control Habilitado desde Panel	Ok
5.3	Motor Opera	Funcionamiento con Enclavamientos	Ok
5.4	Motor Opera	Funcionamiento con Enclavamientos	Ok
5.5	Motor no Opera	Motor con eje torcido	Ok

La Tabla 31 resume el estado de cada motor monofásico de fase partida mientras el control de campo del generador DC se puede llevar a cabo desde el panel, el control de campo del motor DC se ha habilitado únicamente para regresar a su punto inicial una vez apagado el equipamiento Ward Leonard para volver a encenderse con seguridad. La parte más crítica se encuentra en 5.5 donde el eje dañado impide el giro del motor, calentando sus devanados y averiando el sistema, el mismo se encuentra trabado y no ha sido posible encontrar un reemplazo de idénticas características para sustituirlo.

Se recomienda realizar la variación gruesa de voltaje y frecuencia, excitación separada del generador DC (5.1 y 5.2) desde el panel principal, mientras el control fino de voltaje (5.4 y 5.3) y control fino de frecuencia (5.5) se lo realice manualmente desde el puesto de control al interior del cuarto de máquinas.

Con esto se tiene un control mucho más preciso sobre las variables de voltaje y frecuencia, manteniendo un sistema óptimo de protecciones y enclavamientos. En la sección 2.5 se detalla el origen de esta problemática y su solución con la instalación de un nuevo tablero de medición (ver sección 3.3).

- Ventiladores L258

Al momento de realizar la verificación punto por punto en el Panel 5 del tablero Siemens, se encontró que el sistema de ventiladores asociados al motor DC y al generador sincrónico, fueron desconectados del sistema de control. Esto ocasiona que al trabajar el conjunto motor DC con el generador sincrónico, el sistema de protecciones detenga al conjunto a minutos de empezar a funcionar y no permita accionar nuevamente el conjunto,

esta acción la lleva a cabo el relé biestable pues mide el aumento de temperatura en los bobinados.

La combinación de un circuito de control sin relés de protección junto a la desconexión de los ventiladores, puede resultar perjudicial tanto para las personas, como para los equipos. Se realizan pruebas alimentándolos directamente a la red, lo cual indico que se encuentran totalmente operativos, posteriormente se realiza una limpieza del equipo, junto a una lubricación del eje, extracción y limpieza de filtros.

Como resultado se modificó el circuito de control, para que los ventiladores funcionen siempre desde el arranque del motor trifásico de inducción, compartiendo protecciones también con el mismo motor (Anexo 1).

Nota: Cabe mencionar que el ambiente dentro del cuarto de máquinas es propicio para mantener los equipos en excelentes condiciones, desde el punto de vista ambiental, no existe humedad, ni contacto con el medio externo, razón por la cual el estado interno de las máquinas es realmente bueno tomando en cuenta que fueron instaladas en los años 60.

- Protocolo de Mantenimiento en el Conjunto de Máquinas

El eje transversal de todo el trabajo de titulación son las cuatro máquinas dispuestas en el cuarto de máquinas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FIEE. Éstas han sido descritas partiendo desde las ecuaciones de Maxwell, donde se detalla cada principio y ley física involucrada, pasando por aspectos constructivos, parámetros internos, medios de control y zonas de operación; para llegar al punto de habilitarlos y mantenerlos operativos.

Por consiguiente, el dominio central de esta sección es verificar el estado del motor trifásico de inducción con rotor en jaula, acoplado mecánicamente al generador DC para alimentar al motor DC que a su vez se acopla mecánicamente con el generador sincrónico de rotor liso.

Los dos parámetros a evaluarse serán los siguientes.

- ✓ Resistencia de Aislamiento [14]

La medición de la resistencia de aislamiento de los bobinados de motores y generadores, permite detectar el deterioro sobre la máquina ocasionado por humedad, corrosión, ambiente con impurezas, tiempo de la instalación, exceso de vibración.

Para cada prueba se ha tomado como referencia el estándar 43 de la IEEE; primero se desconectó todo cableado correspondiente a los terminales de las máquinas, para colocar un megómetro entre terminales de todos los bobinados.

En promedio según el estándar 43, el voltaje de prueba aplicado bordea los 1000 voltios y se declara una resistencia mínima aceptable de 8 k $\Omega$ . Dado que el valor de resistencia varía con las condiciones ambientales, para eliminar este factor, se toma medidas por 6 días consecutivos a diferentes horas, tomando como un valor definitivo su promedio.

Las mediciones periódicas sobre la resistencia de aislamiento entre bobinas indican el estado de motores y generadores, los valores obtenidos muestran si se necesita realizar un mantenimiento correctivo, o si están llegando al fin de su vida útil, o por último si ha existido un fallo con consecuencias dañinas para las máquinas.

Para llevar a cabo estas medidas, se utilizó un Fluke 1587 FC Insulation Multimeter (Figura 87), solicitado en forma externa, cuyas características se describen en la Tabla 32 y los resultados en la Tabla 33.

**Tabla 32.** Características Fluke 1587 – Insulation Tester

ítem	Descripción
Measurement range	0.01 M $\Omega$ to 2 G $\Omega$
Test voltages	50, 100, 250, 500, 1000 V
Test voltage accuracy	+20%, -0%
Short-circuit test current	1 mA nominal
Auto discharge	Discharge time <0.5 second for C = 1 $\mu$ F or less
Live circuit detection	Inhibit test if terminal voltage > 30 V prior to initialization of test
Maximum capacitive load	Operable with up to 1 $\mu$ F load



**Figura 87.** Mediciones de Resistencia de Aislamiento entre Bobinas

**Tabla 33.** Resultados de Pruebas de Aislamiento en Máquinas

Motor Inducción	R u-x	8.11 $\Omega$
	R v-y	8.02 $\Omega$
	R w-z	8.05 $\Omega$
	R entre Bobinas	> 11 M $\Omega$
Generador Sincrónico	R r-n	11.14 $\Omega$
	R s-n	11.08 $\Omega$
	R t-n	11.02 $\Omega$
	R entre Bobinas	> 11 M $\Omega$
Generador DC	Aislamiento	> 11 M $\Omega$
Motor DC	Aislamiento	> 11 M $\Omega$

✓ Temperatura

Tomar mediciones de temperatura sobre maquinaria eléctrica es un factor determinante sobre el estado de la misma, un aumento de temperatura es denominado un punto caliente.

Éstos se producen cuando las corrientes parásitas crecen a niveles considerables originadas por cortocircuitos entre espiras, chapas u otro elemento susceptible.

Para esta prueba se empleó un termómetro visual infrarrojo Fluke VT04, el mismo que presenta la capacidad de superponer la imagen visual con la del mapa de calor. El termómetro realiza comparaciones de temperatura rápidamente y de forma sencilla, permitiendo captar variaciones importantes de temperatura inmediatamente, las cuales identifican posibles puntos de averías importantes en las máquinas.

Para realizar las mediciones de temperatura se llevó el equipo Ward Leonard a una condición de operación nominal como se detalla en la Tabla 34. En esta condición el equipo operó por una hora en forma continua, realizando control con el termómetro infrarrojo cada 15 minutos. Y como resultado no se encuentran puntos de temperatura fuera de lo normal.

**Tabla 34.** Condiciones Operativas Para Prueba de Temperatura

Motor Inducción	Velocidad Giro	1755 rpm
	Potencia Out	36 kW
Generador DC	Voltaje Generado	245 VDC
	Potencia In	28 kW
Motor DC	Velocidad Giro	1800 rpm
	Potencia Out	25 kW
Generador Sinc.	Voltaje Generado	230 VAC
	Potencia In	28 kVA

Mientras el conjunto Ward Leonard se encuentra operando, también se realizaron mediciones de control de temperatura sobre el Panel 5, revisando exhaustivamente circuitos de control y fuerza varias veces; y tampoco se encontraron fallos relacionados con incremento de temperatura.

Todas las máquinas del conjunto Ward Leonard pasaron las pruebas de mantenimiento sin mayor novedad, lo cual indica que sobre la casa de máquinas del laboratorio se han realizado actividades de mantenimiento preventivo, aunque éstas no están documentadas en ningún registro. Como se señala, las condiciones ambientales de la instalación, sumado a su bajo nivel de uso, mantuvo las máquinas en muy buenas condiciones, declarándolas listas para entrar en servicio.

Por estos motivos se procede a realizar un mantenimiento predictivo de rutina para cada máquina, con el fin de minimizar las probabilidades de daño y salida de servicio del conjunto Ward Leonard.

## 2.5. Plan de Mantenimiento Predictivo y Puesta en Operación

Predecir la ocurrencia de fallas antes de que se produzcan es una tarea trascendental en la industria, pues conseguir adelantarse a este momento donde el equipo deja de trabajar en condiciones óptimas requiere herramientas técnicas de monitoreo y seguimiento periódico.

Este mantenimiento abarca un conjunto de técnicas de inspección organizadas y planificadas que se detallan en la Tabla 35, cuyo objetivo es ajustar al máximo la vida útil del elemento en servicio sin intervenir en su régimen de trabajo; en un sentido más amplio se puede decir que el mantenimiento predictivo se incluye en el mantenimiento preventivo, en un sentido mucho más amplio.

**Tabla 35.** Tareas de mantenimiento realizadas y programadas del conjunto Ward Leonard

Ítem	Cód.	Tipo	Acción	Actividad	Equipo	Fecha	Próx.
Motor Inducción Trifásico Jaula de Ardilla	ME 001 2	R 1426-4	Medición de Resistividad Y Aislamiento	Tomar valores de resistencia de las 3 bobinas	Multímetro Convencional	04-09-17	6 meses
				Tomar valores de aislamiento entre bobinas	Insulation Tester	04-09-17	

				Tomar valores de aislamiento bobinas con carcaza		04-09-17	
			Limpieza y Ajuste	Ajuste de conexiones en terminales	Herramientas	05-09-17	3 meses
				Limpieza interna del motor	Pistola de Aire	05-09-17	
				Limpieza externa del motor	-	06-09-17	
			Rodamientos	Engrase y Limpieza de Rodamientos	Desengrasante y Aceite	07-09-17	2 años
				Cambio de Rodamientos	Rodamientos Nuevos		
				Observar estado de Lubricación	-	07-09-17	
			Overhauling	Despiece Total, Limpieza, Reconstrucción	Técnico Especializado		5 años
Generador Sincrónico Rotor Liso 4 Polos Conexión Y	ME 001 4	QF 1292 - 4	Medición de Resistividad Y Aislamiento	Tomar valores de resistencia de las 3 bobinas	Multímetro Convencional	08-09-17	6 meses
				Tomar valores de aislamiento entre bobinas	Insulation Tester	08-09-17	
				Tomar valores de aislamiento bobinas con carcaza		09-09-17	
			Limpieza y Ajuste	Ajuste de conexiones en terminales	Herramientas	09-09-17	3 meses
				Limpieza interna del generador	Pistola de Aire	10-09-17	
				Limpieza externa del generador	-	10-09-17	
			Rodamientos	Engrase y Limpieza de Rodamientos	Desengrasante y Aceite	12-09-17	2 años
				Cambio de Rodamientos	Rodamientos Nuevos		
				Observar estado de Lubricación	-	15-09-17	
			Escobillas	Extracción y Limpieza	Kit Herramientas - Lija	15-09-17	2 años
				Verificación Mínima 8 mm		15-09-17	
				Cambio de Escobillas	Escobillas		

			Overhailing	Despiece Total, Limpieza, Reconstrucción	Técnico Especializado		5 años
Motor DC Excitación Separada	ME 001 3	QG 1292 - 4	Medición de Resistividad Y Aislamiento	Tomar valores de resistencia de bobina	Multímetro Convencional	18-09-17	6 meses
				Tomar valores de aislamiento bobina con carcaza	Insulation Tester	18-09-17	
			Limpieza y Ajuste	Ajuste de conexiones en terminales	Herramientas	19-09-17	3 meses
				Limpieza interna del motor	Pistola de Aire	19-09-17	
				Limpieza externa del motor	-	19-09-17	
			Rodamientos	Engrase y Limpieza de Rodamientos	Desengrasante y Aceite	20-09-17	2 años
				Cambio de Rodamientos	Rodamientos Nuevos		
				Observar estado de Lubricación	-	20-09-17	
			Escobillas	Extracción y Limpieza	Kit Herramientas - Lija	22-09-17	2 años
				Verificación Mínima 8 mm		22-09-17	
				Cambio de Escobillas	Escobillas		
			Overhailing	Despiece Total, Limpieza, Reconstrucción	Técnico Especializado		5 años
			Generador DC Excitación Separada	ME 001 1	G 1592 - 4	Medición de Resistividad Y Aislamiento	Tomar valores de resistencia de bobina
Tomar valores de aislamiento bobina con carcaza	Insulation Tester	25-09-17					
Limpieza y Ajuste	Ajuste de conexiones en terminales	Herramientas				26-09-17	3 meses
	Limpieza interna del generador	Pistola de Aire				27-09-17	
	Limpieza externa del generador	-				27-09-17	
Rodamientos	Engrase y Limpieza de Rodamientos	Desengrasante y Aceite				28-09-17	2 años
	Cambio de Rodamientos	Rodamientos Nuevos					

				Observar estado de Lubricación	-	28-09-17	
			Escobillas	Extracción y Limpieza	Kit Herramientas - Lija	29-09-17	2 años
				Verificación Mínima 8 mm		29-09-17	
				Cambio de Escobillas	Escobillas	29-09-17	
			Overhauling	Despiece Total, Limpieza, Reconstrucción	Técnico Especializado		5 años
Reóstatos de Campo y Motores Asociados	5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5	Mantenimiento	Desarme y Limpieza Carcaza	Herramientas	23-09-17	1 año	
					Ajuste de Contactos		23-09-17
			Desengrase de Motor	Desengrasante y Aceite	23-09-17		
			Chequeo de Continuidad	Multímetro Convencional	30-09-17		
			Verificación de Sistema de Control	Manual	30-09-17		
Tableros de Control y Mediciones		Mantenimiento de Ambos Tableros	Limpieza General	Pistola de Aire	09-09-17	6 meses	
			Ajuste General de Conexiones	Herramientas	09-09-17		
			Chequeo de Continuidad	Multímetro Convencional	09-09-17		
			Chequeo de Funcionamiento Enclavamientos	Manual y Visual	16-09-17		
En Operación		Chequeo en Operación	Búsqueda de Puntos Calientes Tablero	Fluke VT04	16-09-17		
			Búsqueda de Puntos Máquinas	Fluke VT04	16-09-17		

Durante el desarrollo de la sección 2.4, se describen acciones correctivas sobre los circuitos de control y fuerza del conjunto Ward Leonard, las cuales concluyen declarando al sistema motriz listo para entrar en operación, sin embargo, existe un problema en el control de los circuitos de campo.

Anteriormente se expuso la forma de control de los reóstatos de campo a través de motores monofásicos de fase partida (Figura 66). En resumen, se tiene que los reóstatos 5.1 y 5.2 controlan el voltaje DC generado que alimenta al motor DC, que afectan la velocidad del mismo y se pueden operar desde el panel, mientras que los reóstatos 5.3, 5.4 y 5.5 tienen la función de realizar variaciones sobre los parámetros finales de voltaje - frecuencia suministrada a las mesas de trabajo.

Esta regulación o control de corrientes de campo en los reóstatos 5.3, 5.4 y 5.5 se la realiza mediante un juego de contactores que dan el sentido de giro a los motores monofásicos asociados a los reóstatos de campo.

El problema ocurre en que por medio de contactores no se puede lograr una regulación fina de voltaje y frecuencia, como si se la obtendría operándolos de forma manual desde el propio panel donde están instalados.

Los contactores del circuito de control son básicamente electroimanes en DC, físicamente esto quiere decir que la fuerza de atracción  $F_1$  es constante se obtiene siempre un cierre perfecto sin lugar a oscilaciones:

$$F_1 = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot N_1^2 \cdot i_1^2}{2x^2} = k_2 \cdot i_{DC}^2 \quad (78)$$

En la ecuación 78, se evidencia este fenómeno donde la fuerza es proporcional a la corriente DC en la longitud del entrehierro  $x$ . Cuando el electroimán está cerrado, la intensidad de corriente que circula es la misma que la del cierre, no obstante, una intensidad de corriente mucho menor bastaría para mantener el circuito en posición de cierre [15].

Debido a que el contactor permanece cerrado aun con una corriente remanente muy pequeña y de corta duración, los motores monofásicos de fase partida continúan energizados por corto tiempo variando el valor de la resistencia de campo.

La variación de resistencia provoca que sea demasiado complicado llegar a un valor deseado de voltaje y es mucho más evidente aún en el campo del motor DC, con el control de frecuencia; por ejemplo, si en una situación se desea configurar el equipamiento Ward Leonard a 120 Voltios y 60 Hercios, lo más probable es que obtengamos un voltaje de  $120 \pm 8$  V y una frecuencia de  $60 \pm 3$  Hz.

El problema de no poder establecer un valor concreto con exactitud es inherente al uso de contactores y no resulta beneficioso en el marco de utilidad del equipamiento Ward Leonard, pues se desea lograr probar equipos frente a variaciones determinadas y estudiar su comportamiento.

Esta es la principal razón por la cual se deshabilita el control de incremento de los reóstatos 5.3, 5.4 y 5.5, dejando únicamente disponible el sistema de enclavamientos para que el Ward Leonard siempre comience su operación con corrientes de campo mínimas y se las pueda aumentar gradualmente en modo manual desde el sitio de control de la Figura 66.

Para facilitar esta tarea, se implementa en el espacio vacío un nuevo panel de medición con el cual la tarea de alcanzar cualquier variación de voltaje y frecuencia resulta un proceso relativamente sencillo y sin complicaciones, para este efecto se detalla un manual de operación en la sección 3.5.

Adicionalmente es importante mencionar que los procesos de examinación y limpieza de rodamientos, se llevaron a cabo con personal especializado de la empresa Siemens, ya que al ser procesos delicados que utilizan herramientas especiales para su extracción se debe contar con amplia experiencia en ese campo para no ocasionar daños adicionales sobre las máquinas.

Los rodamientos de todas las maquinas del conjunto Ward Leonard fueron extraídos uno por uno con herramienta especializada, sin desacoplar los ejes de las mismas, para proceder con la limpieza y el engrase de cada parte mecánica.

Una vez terminado, fueron reinstalados y se sometieron a pruebas de giro libre de eje, sin restricciones de movimiento y conservación de inercia una vez se apaga el conjunto, garantizando así el estado óptimo de estos elementos.

En este marco los señores de la empresa Siemens se negaron a brindar la opción de documentar dicho proceso por reglamentos estrictos de la misma compañía.

Todo proceso realizado sobre el equipamiento Ward Leonard ha sido documentado y llevado a cabo con cumplimiento estricto de normas de seguridad y de operación antes descritas; las cuales fueron respaldadas con los mismos técnicos de Siemens para garantizar el estado operativo de las mismas bajo cualquier condición de servicio.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS DE PUESTA EN OPERACIÓN DEL SISTEMA WARD LEONARD

#### 3.1. Diagramas Unifilares

Poner el Conjunto Ward Leonard de nuevo al servicio de la Escuela Politécnica Nacional y concretamente a la Facultad de Ingeniería Eléctrica, es la culminación exitosa de una planificación que inicio en el mes de mayo del 2017.

En primera instancia fue necesario consolidar una base que sirva de referencia tanto para el desarrollo del presente trabajo de titulación, como para la comunidad politécnica. Como se detalla en la sección 2.2, fue preciso crear un punto de partida, ya que no existe referencias sobre la constitución del equipamiento Ward Leonard.

Se presentan los diagramas unifilares creados a partir de un seguimiento muy cuidadoso en conjunto con las labores de mantenimiento realizadas, mismas que están descritas en el Capítulo 2.

Por su tamaño se presentan en forma de anexos:

ANEXO 1	Diagrama de Fuerza del Equipamiento Ward Leonard
ANEXO 2	Circuito de Control General del Equipamiento Ward Leonard
ANEXO 3	Diagrama de Enclavamientos del Equipamiento Ward Leonard

Todos los planos presentados están realizados en el software AutoCAD, empleando la nomenclatura que se describe en Tablas en cada sección del Capítulo 2.

Es importante mencionar que cada elemento constituyente de estos diagramas está visualmente identificado tanto en el Tablero de Control como al interior dela cuarto de máquinas.

## 3.2. Curvas de Operación Independientes

Como resultado de la puesta en operación del equipamiento Ward Leonard se presenta gráficamente curvas de operación obtenidas en pruebas individuales sobre cada una de ellas.

### 3.2.1. Motor Trifásico de Inducción

El motor trifásico de inducción con rotor jaula de ardilla cuenta con un sistema de arranque estrella – triángulo, mismo que se habilita bajo condiciones que se describen en 3.3.

Una vez energizado se obtienen los siguientes datos de su funcionamiento y se indican en la tabla 36.

**Tabla 36.** Datos Medidos en Operación del Motor de Inducción

Voltaje de Alimentación	220 V
Velocidad	1755 rpm
Corriente Consumida	120 A

Aplicando la ecuación 20, se obtiene la velocidad sincrónica del motor:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

El deslizamiento (59) del motor es:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \times 100\% = \frac{1800 - 1755}{1800} = 2,5\%$$

Y la frecuencia del rotor (61):

$$f_r = s \cdot f_e = 0.025(60 \text{ Hz}) = 1,5 \text{ Hz}$$

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{sincronica} - n_{mecanica}) = \frac{4}{120} (1800 - 1755) = 1.5 \text{ Hz}$$

El motor de inducción actúa como máquina motriz del generador DC, por lo cual prácticamente se mantiene operando en condición de vacío, sin ningún tipo de regulación sobre él, por lo cual desde el punto de vista de operación en el conjunto Ward Leonard, no es relevante ningún otro dato adicional.

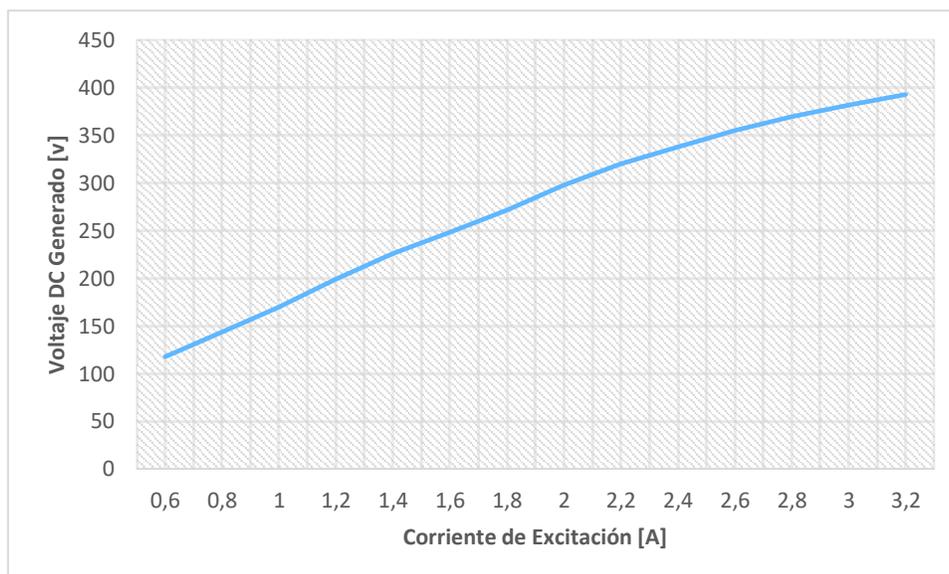
### 3.2.2. Generador DC

El generador DC de excitación separada está mecánicamente acoplado al eje del motor trifásico de inducción, que le proporciona una velocidad en su eje de 1755 rpm.

Los generadores DC de excitación separada se explican en la sección 1.3.8.1 y su curva característica de operación se obtiene realizando mediciones de voltaje generado en función de la variación de corriente de campo con los reóstatos 5.1 y 5.2.

**Tabla 37.** Medidas en Condiciones de Operación del Generador DC

Corriente Excitación [A]	Voltaje DC Generado [V]
0,6	117,60
0,8	143,65
1	169,87
1,2	198,86
1,4	226,01
1,6	248,06
1,8	271,38
2	297,55
2,2	319,77
2,4	337,69
2,6	354,84
2,8	369,58
3	381,59
3,2	392,61



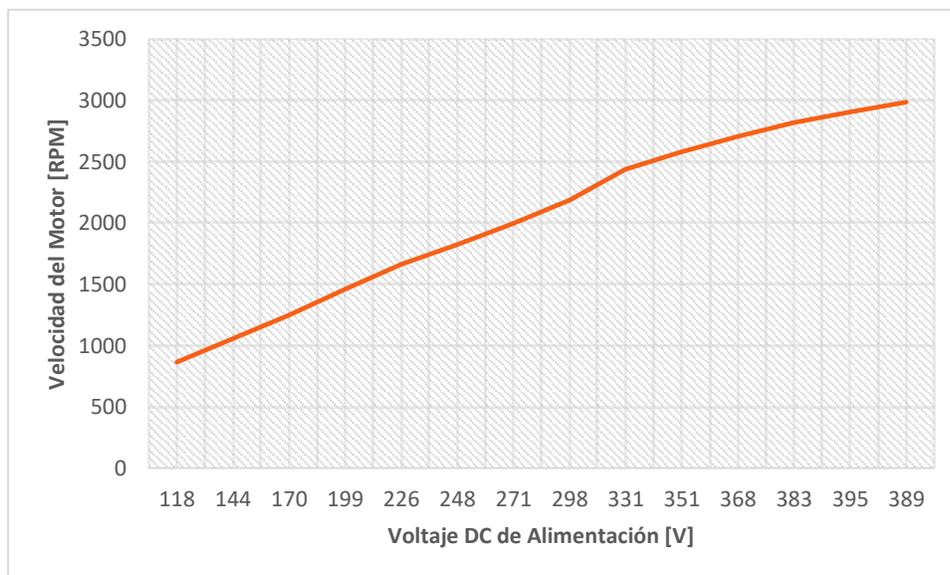
**Figura 88.** Curva Característica de Operación del Generador DC

### 3.2.3. Motor DC

A los terminales del generador DC se tiene conectado el motor DC; por lo cual el voltaje terminal suministrado determina la velocidad de giro primaria del motor, esto constituye la primera acción de control sobre la velocidad, Tabla 38 y Figura 89.

**Tabla 38.** Variación de Velocidad del Motor DC por Voltaje Suministrado

Voltaje DC Alimentación [V]	Velocidad de Giro [RPM]
117,60	864
143,65	1055,4
169,87	1248
198,86	1461
226,01	1660,5
248,06	1822,5
271,38	1993,8
297,55	2186,1
319,77	2435,3
337,69	2581
354,84	2707
369,58	2815,3
381,59	2903,5
392,61	2984,5



**Figura 89.** Curva de Respuesta de Velocidad del Motor DC por Voltaje de Alimentación

El motor DC en cuestión es de excitación separada, lo que permite tomar una nueva acción de regulación de velocidad sobre esta primera acción de control (Tablas 39 y 40),

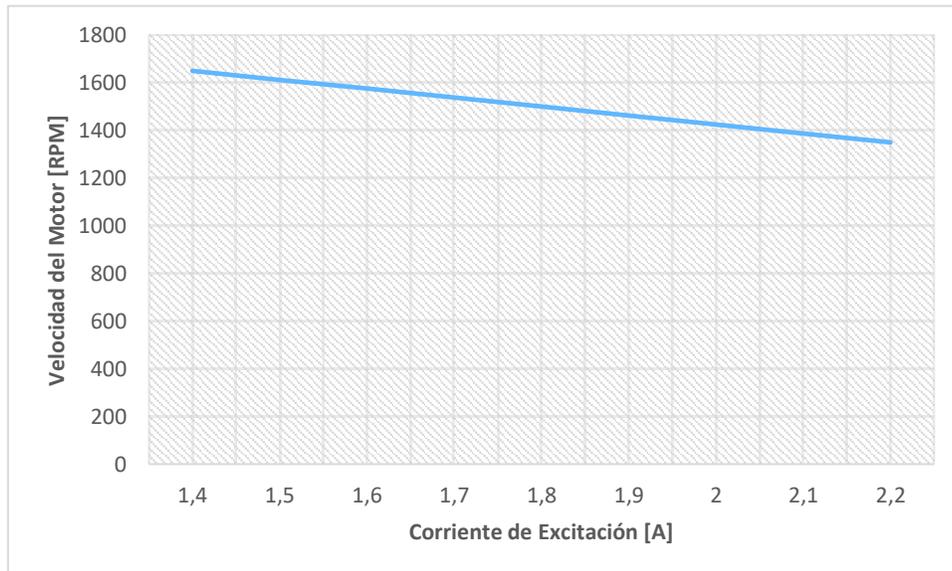
permitiendo realizarse un control más fino sobre su velocidad a través del reóstato de campo 5.5, para observar este efecto, se definió condiciones de partida, Tabla 39 - 40 y Figura 90.

**Tabla 39.** Condiciones definidas para segunda acción de control por campo

Corriente de Excitación Mínima	1,4 A
Corriente de Excitación Máxima	2,2 A
Velocidad Inicial Regulada por Generador DC	1650 rpm

**Tabla 40.** Mediciones realizadas sobre el motor DC por variación de corriente de campo

Corriente de Excitación [A]	Velocidad de Giro [RPM]
1,4	1650
1,5	1612,5
1,6	1575
1,7	1537,5
1,8	1500
1,9	1462,5
2	1425
2,1	1387,5
2,2	1350



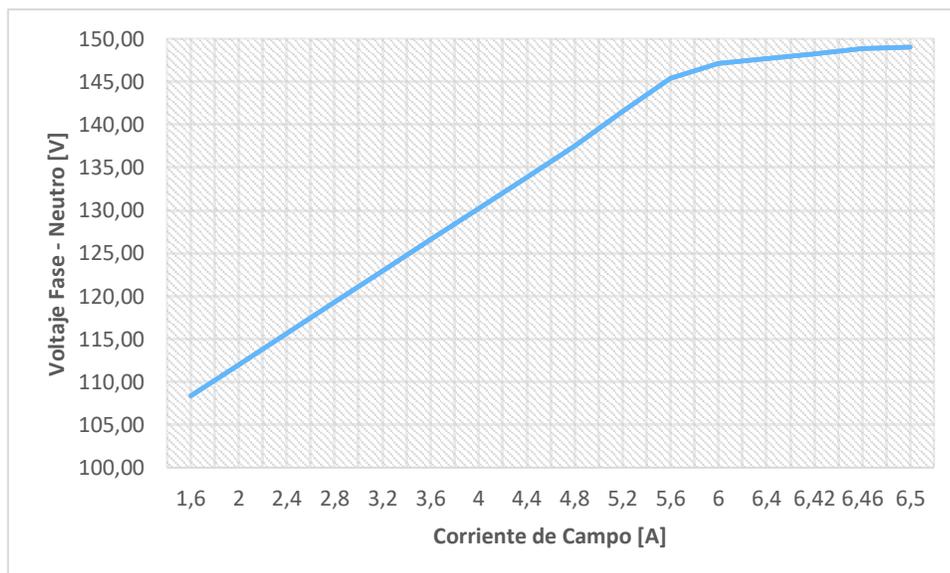
**Figura 90.** Respuesta de Velocidad del Motor DC frente a Variación de Corriente de Excitación

### 3.2.4. Generador Sincrónico

El generador sincrónico de rotor liso regula su voltaje terminal de dos formas: la más evidente es a través de su corriente de campo que provoca una variación proporcional en el voltaje, Tabla 41 y Figura 91.

**Tabla 41.** Mediciones de Variación de Voltaje Terminal Por Control de Campo

Voltaje fase fase [V]	Voltaje fase neutro [V]	Corriente Campo [A]	Frec. [Hz]	Velocidad [RPM]
187,70	108,37	1,6	60	1800
194,00	112,01	2	60	1800
200,30	115,64	2,4	60	1800
206,60	119,28	2,8	60	1800
212,90	122,92	3,2	60	1800
219,20	126,56	3,6	60	1800
225,50	130,19	4	60	1800
231,80	133,83	4,4	60	1800
238,10	137,47	4,8	60	1800
245,00	141,45	5,2	60	1800
251,80	145,38	5,6	60	1800
254,75	147,08	6	60	1800
255,75	147,66	6,4	60	1800
256,75	148,23	6,42	60	1800
257,75	148,81	6,46	60	1800
258,00	149,00	6,5	60	1800



**Figura 91.** Curva de Voltaje Terminal por Variación de Corriente de Campo

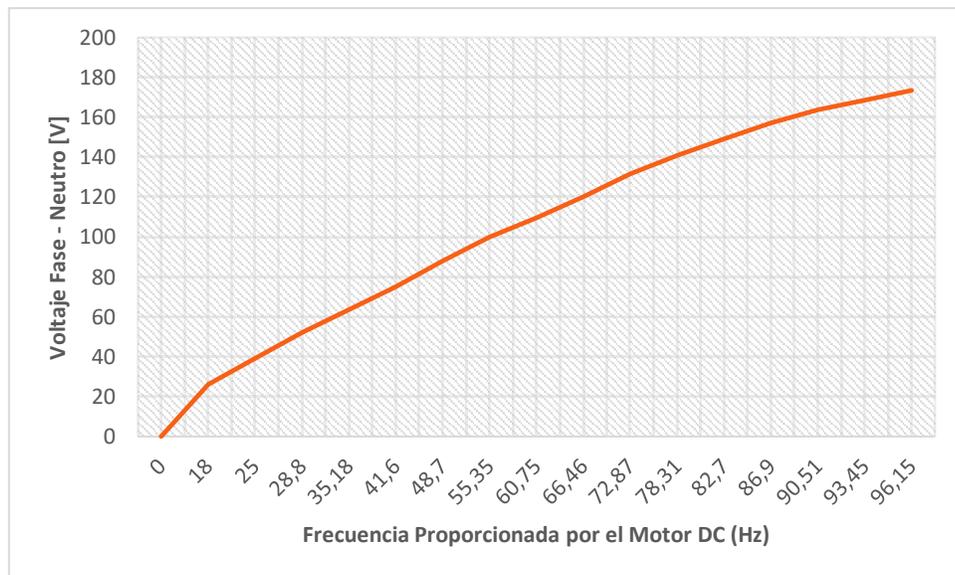
La segunda forma proviene del análisis realizado en 1.3.5.3, retomando esta sección se demostró que el voltaje RMS en cualquier fase del generador sincrónico es:

$$E_{rms} = \sqrt{6} \cdot \pi \cdot N \cdot \Phi \cdot f; \text{ Si la conexión de devanados es Y} \quad (28)$$

Donde la frecuencia depende de la velocidad que tenga el motor DC, por lo tanto, una variación sobre la velocidad del motor DC, también provoca una variación en el voltaje terminal del generador sincrónico, Tabla 42 y Figura 92.

**Tabla 42.** Variación de Voltaje Terminal por Variación de Frecuencia

Frecuencia [Hz]	Voltaje fase neutro [V]	Frecuencia [Hz]	Voltaje fase neutro [V]
18	26	66,46	120
25	39	72,87	131,5
28,8	52	78,31	140,9
35,18	63,6	82,7	149
41,6	75	86,9	157
48,7	88	90,51	163,6
55,35	99,8	93,45	168,4
60,75	109,6	96,15	173,4



**Figura 92.** Curva de Voltaje Terminal en Función de la Frecuencia Proporcionada por el Motor DC

El generador sincrónico es el único encargado de transferir toda la potencia eléctrica a las mesas de trabajo en el laboratorio, como se explica en la sección 1.3.5.8, los parámetros de potencia activa y reactiva son determinantes en el desempeño de la máquina.

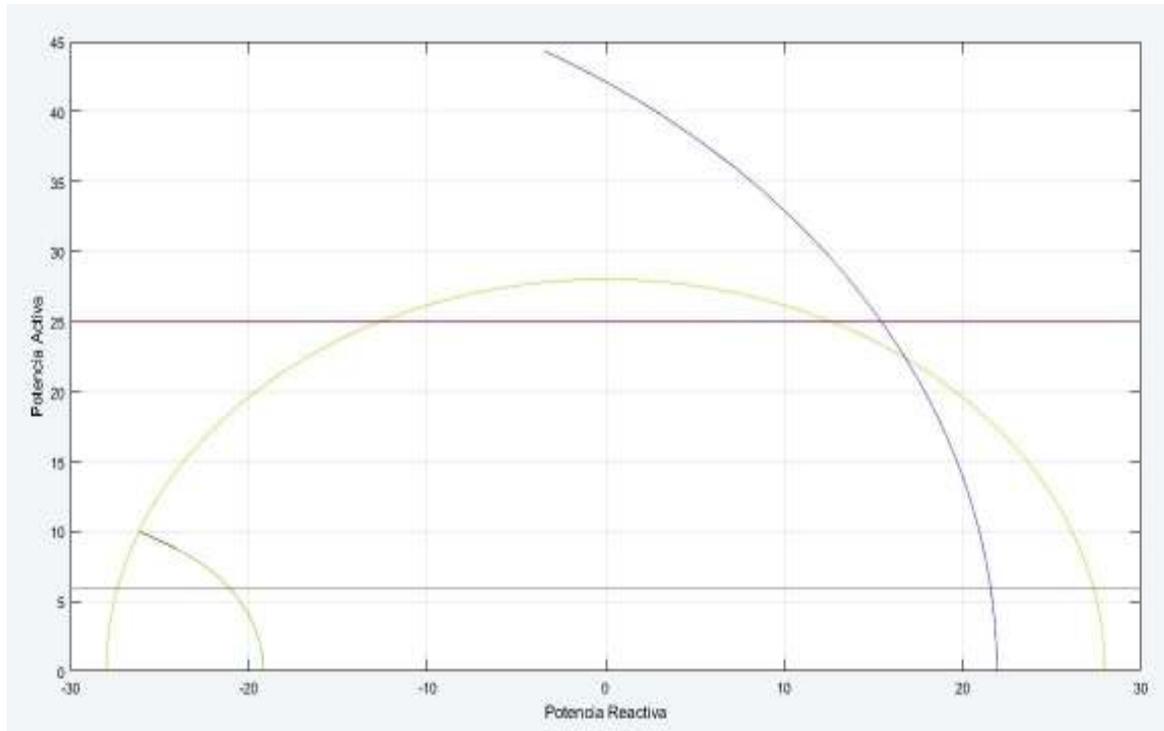
Complementariamente en la sección 1.3.5.9 se muestran las curvas de capacidad para una operación segura, para determinar brevemente estas curvas de capacidad sobre el generador sincrónico del conjunto Ward Leonard se ha empleado el siguiente script de MATLAB, disponible en el laboratorio de Introducción a Sistemas Eléctricos de Potencia. Para lo cual asumimos una reactancia de 0,95 por unidad.

```

%% DATOS DE PLACA GENERADOR SINCRÓNICO DE ROTOR CILÍNDRICO
S=28; %Potencia aparente en MVA
V=0.23; %Voltaje en kV
fp=0.8; %Factor de potencia nominal
Xd_pu=0.95; %Reactancia en el eje directo en pu
Pmax=0.025; %Potencia mecánica máxima en MW
Pmin=0.0065; %Potencia mecánica mínima en MW
%%
Zbase=V^2/S;
Xd=Xd_pu*Zbase;
Inom=S/(sqrt(3)*V);
teta=acos(fp);
E=sqrt(3)*abs(V/sqrt(3)+1j*Xd*Inom*(cos(-teta)+1j*sin(-teta)));
Emin=0.2*E;
%Porcentaje del nominal
MEEE=0.15*Pmax;
%Porcentaje potencial Max
%% _ POTENCIA APARENTE NOMINAL
Q=-S:0.01:S;
P_Snom=sqrt(S^2-Q.^2);
%% _ CORRIENTE DE CAMPO NOMINAL
delta=0:0.01:(pi)/3;
P_Enom=E*V*sin(delta)/Xd;
Q_Enom=E*V*cos(delta)/Xd-V^2/Xd;
%% _ CORRIENTE DE CAMPO MÍNIMA
P_Emin=Emin*V*sin(delta)/Xd;
Q_Emin=Emin*V*cos(delta)/Xd-V^2/Xd;
%% _ MARGEN DE ESTABILIDAD EN ESTADO ESTABLE
P1=Pmin:0.01:1.2*Pmax;
E1=P1*Xd/V;
P0=P1-MEEE;
delta0=asin((P0*Xd)/(E1*V));
Q0=(E1*V).*cos(delta0)/Xd-V^2/Xd;

```

Con esta ayuda por software es posible graficar las correspondientes curvas de capacidad del generador sincrónico, rotor cilíndrico, 4 polos, devanados en Y. La zona segura es la que queda encerrada por todas las curvas trazadas en la Figura 93.



**Figura 93.** Curvas de Capacidad del Generador Sincrónico del Conjunto Ward Leonard

### 3.3. Funcionamiento del Conjunto Ward Leonard

En esta sección se realiza un análisis matemático de lo expuesto en la sección 3.2. El punto de partida es el motor trifásico de inducción, cuya función es la de una máquina motriz girando a 1755 rpm, con un deslizamiento del 2,5 por ciento, por ende, no existe ninguna variable a controlar en este punto del equipo.

Acoplado mecánicamente al eje del motor de inducción se tiene al generador DC, sobre el que sí se puede controlar una variable: el voltaje DC terminal generado.

La Figura 88 muestra su respuesta a la variación de intensidad de corriente en el circuito de excitación, esta se puede reducir a la Tabla 43.

**Tabla 43.** Control de Voltaje Terminal Generador DC con Corriente de Campo

Acción	Reacción
Incremento del 6,67% en la $I_f$ (5.1/5.2)	Incremento del 8,67% en $V_{DCgen}$
Decremento del 6,67% en la $R_f$ (5.1/5.2)	Incremento del 8,67% en $V_{DCgen}$

Sobre el motor DC se tienen dos acciones de control sobre su velocidad, como se expuso anteriormente, por su circuito de excitación se tiene la Tabla 44.

**Tabla 44.** Control de Velocidad Motor DC por Circuito de Excitación Expresado en Porcentajes

Acción	Reacción
Incremento del 9% en la $I_f(5.5)$	Decremento del 2,3% en frecuencia (rpm)
Decremento del 9% en la $R_f(5.5)$	Decremento del 2,3% en frecuencia (rpm)

Adicionalmente, un aumento en el voltaje terminal de alimentación también supone un efecto sobre la velocidad de giro o frecuencia. Tabla 45.

**Tabla 45.** Control de Velocidad Motor DC por Voltaje DC de Alimentación

Acción	Reacción 1	Reacción 2
Incremento del 1,7% en $I_{f_{genDC}}(5.1/5.2)$	Incremento del 2,25% en $V_{DCgen}$	Incremento del 5,71% en frecuencia (rpm)
Decremento del 1,7% en $R_{f_{genDC}}(5.1/5.2)$	Incremento del 2,25% en $V_{DCgen}$	Incremento del 5,71% en frecuencia (rpm)

Como se puede observar:

- ✓ Un cambio del 9% en la resistencia 5.5 provoca una variación del 2,3% sobre la frecuencia.
- ✓ Un cambio del 1.7% en el conjunto de resistencias 5.1 y 5.2 provoca una variación del 5,71% sobre la frecuencia.

Con lo cual se demuestra que el conjunto 5.1 y 5.2 procede como elemento de variación conjunta y de gran escala en el conjunto Ward Leonard; mientras que 5.5 realiza una variación fina de frecuencia.

El mismo caso se replica sobre el generador sincrónico con una ventaja adicional, esto es:

- ✓ 5.1 y 5.2 determinan en primera instancia la regulación gruesa de voltaje terminal.
- ✓ A este efecto se suma la contribución por variación de frecuencia del motor DC, expuesta en la Figura 92 y Tabla 42, como una regulación ligera.

- ✓ Finalmente es el conjunto de reóstatos 5.3 y 5.4 quienes realizan un ajuste fino del voltaje terminal suministrado a las mesas.

Nota: Los conjuntos reguladores 5.1/5.2, 5.3/5.4 y 5.5, actúan simultáneamente sobre la variación de corriente en sus respectivos circuitos de excitación. Al ser de diferente valor en ohmios se clasifican en la Tabla 46.

**Tabla 46.** Características de Funcionamiento de los Conjuntos Reguladores

<b>Reóstato</b>	<b>Función 1</b>	<b>Función 2</b>
5.1	Regulación fina de corriente de excitación del Generador DC	Regulación Gruesa de Voltaje y Frecuencia del Conjunto Ward Leonard
5.2	Regulación amplia de corriente de excitación del Generador DC	
5.3	Regulación fina de corriente de campo del Generador Sincrónico	Regulación Fina de Voltaje Generado del Conjunto Ward Leonard
5.4	Regulación amplia de corriente de campo del Generador Sincrónico	
5.5	Regulación fina de corriente de excitación del Motor DC	Regulación Fina de Frecuencia del Voltaje Generado en el Conjunto Ward Leonard

### 3.4. Producto Final Entregado

Todas las tareas de mantenimiento descritas en este documento se han realizado en estricto cumplimiento del artículo 92 y 93 del Decreto Ejecutivo 2393 - Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo [16].

1. El mantenimiento de máquinas deberá ser de tipo preventivo y programado.
2. Las máquinas, sus resguardos y dispositivos de seguridad serán revisados, engrasados y sometidos a todas las operaciones de mantenimiento establecidas por el fabricante que aconseje el buen funcionamiento de las mismas.

3. Las operaciones de engrase y limpieza se realizarán siempre con las máquinas paradas, preferiblemente con un sistema de bloqueo, siempre desconectadas de la fuerza motriz y con un cartel visible indicando la situación de la máquina y prohibiendo la puesta en marcha.

4. La eliminación de los residuos de las máquinas se efectuará con la frecuencia necesaria para asegurar un perfecto orden y limpieza del puesto de trabajo.

Se adoptarán las medidas necesarias conducentes a detectar de modo inmediato los defectos de las máquinas, resguardos y dispositivos de seguridad, así como las propias para subsanarlos, y en cualquier caso se adoptarán las medidas preventivas indicadas en el artículo anterior [16].

Adicionalmente, en cumplimiento del mencionado decreto ejecutivo 2393, se ha reacondicionado el cuarto de máquinas previo a la instalación del nuevo tablero de mediciones, estas acciones son las que se denotan a continuación y se muestran en las Figuras 94-101.

- ✓ Pintura de Máquinas
- ✓ Señalización de seguridad por ruido.
- ✓ Delimitación de espacios peligrosos.
- ✓ Identificación clara de todos los elementos del conjunto Ward Leonard.



**Figura 94.** Anillos del Colector después de Tareas de Mantenimiento



**Figura 95.** Mantenimiento e Inspección de Escobillas



**Figura 96.** Trabajo de Pintura en Carcazas y Bases de Máquinas



**Figura 97.** Estado de Entrega del Equipamiento Ward Leonard al Laboratorio de Máquinas Eléctricas



**Figura 98.** Finalización de Mantenimiento en Elementos de Control de Campo



**Figura 99.** Ejemplo de Identificación Colocada en los componentes del Conjunto Ward Leonard

El tablero instalado consta de dos voltímetros: medición de voltajes de fase y de línea, junto a un frecuencímetro digital con un rango de 0 a 100 Hz; el tablero cubre cualquier rango de operación respetando los límites descritos en el manual de uso.



**Figura 100.** Nuevo Panel de Mediciones que Permite Regulación Manual In Situ



Figura 101. Estado de Entrega de los Equipos de Control de Campo y Tablero de Mediciones

Con la finalización del presente trabajo de titulación y el respaldo fotográfico presentado, se entrega al Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica el Conjunto Variador de Frecuencia y Voltaje Ward Leonard en perfectas condiciones físicas, mecánicas y eléctricas listo para entrar en operación a plena capacidad.

### 3.5. Manual de Uso

1. Verificar existencia de voltaje DC en el tablero Siemens proveniente del arreglo de semiconductores.
2. Utilizar los Switch "Push & Turn" para conectar los circuitos de campos en este orden: Motor DC (5b7), Generador DC (5b6), Generador Sincrónico (5b8)
3. Utilizar el Switch "Push & Turn" 5b5 para dar inicio a la secuencia de arranque Y- $\Delta$ , espere hasta que se escuche el cambio de conexión por acción de los contactores (5u1).
4. Con la perilla 5b2, correspondiente a la variación gruesa, aumente gradualmente la corriente de excitación y visualice su valor en 5g7. Lleve el Conjunto Ward Leonard

a un punto de voltaje y frecuencia cercano al que desea obtener. Este punto puede realizarse tanto desde el tablero Siemens como también manualmente desde los reóstatos del Generador DC (5.1 y 5.2)

5. En el tablero de mediciones energice el frecuencímetro digital, este equipo tiene la capacidad de mostrar voltaje fase – fase generado y a la vez su frecuencia. La selección de magnitud a mostrarse se selecciona por el pulsador.
6. Fije primero la frecuencia a la que desea trabajar, recuerde que un aumento posterior sobre la frecuencia representa también un aumento en el voltaje generado. Para este objetivo utilice el reóstato del Motor DC (5.5).
7. Eleve el voltaje utilizando los reóstatos del Generador Sincrónico (5.4 y 5.3). Todos los valores se muestran en ambos paneles simultáneamente, los límites de operación se aprecian visualmente con los instrumentos de medida.

#### Consideraciones:

- ✓ Los Reóstatos del Generador Sincrónico permiten tener una variación de voltaje  $\Delta V = 70 \text{ V fase – fase o } 40 \text{ V fase – neutro}$ .
  - ✓ El Reóstato del Motor DC permite una variación de frecuencia  $\Delta f = 10 \text{ Hz}$ .
  - ✓ Los Reóstatos del Generador DC, varían uniformemente voltaje y frecuencia en todo el rango.
8. Utilizar el Switch "Push & Turn" 5b9 para energizar el panel 10 por acción del disyuntor 5a2.
  9. Diríjase al Panel 10, las columnas representan el número de panel, mientras las filas son las mesas a energizar, al Conjunto Ward Leonard le corresponde la Columna 2. Energice con la llave de seguridad la mesa donde se va a trabajar.
  10. En la mesa de trabajo conecte la palanca señalizada como "Voltaje a Elegir", los bornes dispuestos sobre la palanca son R, S, T y N respectivamente.

Precaución, cuando se trabaja en el laboratorio con el conjunto 1 para obtener DC variable, se emplean los mismos terminales de salida verificar que no se otorgue a la misma mesa de trabajo ambas salidas desde el panel 10.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- Se establece una base sólida como punto de partida en la tarea de identificar cada componente mediante la elaboración de diagramas unifilares de los circuitos de control y fuerza, permitiendo efectuar pruebas eléctricas y mecánicas con seguridad pues de esta manera se tiene total certeza sobre la función que cumple cada elemento del conjunto, así como las limitaciones inherentes de un sistema fuera de operación por varios años.
- El mantenimiento industrial es de enorme importancia en toda área donde se trabaje con maquinaria, ya que engloba en un solo proceso actividades de inspección, detección, reparación, calibración y mejora, las mismas que han sido correctamente aplicadas y llevadas a término sobre el equipamiento Ward Leonard, prolongando su vida útil a su vez permitiendo aumentar el potencial de investigación y desarrollo en el Laboratorio de Máquinas de la FIEE.
- Toda actividad de mantenimiento se debe realizar siguiendo protocolos y normativas vigentes en la legislación nacional en conjunto con estándares internacionales. De esta forma se garantiza que no existan daños sobre la maquinaria y principalmente se resguarda el bienestar de toda persona involucrada en la puesta en línea y operación del equipamiento Ward Leonard, poniendo énfasis en la utilización de equipo de protección personal y herramientas adecuadas para trabajar en paneles energizados y espacios confinados.
- Los circuitos de excitación independiente del generador DC y del generador sincrónico están implementados con dos reóstatos de diferente valor, conectados en serie para aumentar su rango de voltaje terminal, permitiendo un control en dos etapas sobre el segmento regulador correspondiente. Esto significa que ambas máquinas cuentan con un reóstato de regulación fina independientemente a la regulación propia que ejerce cada máquina sobre el conjunto.

- El equipamiento Ward Leonard en principio es un variador de frecuencia, al cual se le ha provisto de un generador sincrónico para el suministro de voltaje y frecuencia variables. Su control es realizado en tres partes, todas bajo el mismo principio de variación de la corriente DC de sus bobinados de campo, esto permite alcanzar en forma general un rango de variación de voltaje fase-fase de 0 a 300 V y un rango de variación de frecuencia de 0 a 100 Hz se obtiene un control de voltaje de  $\pm 70$  V y un control de frecuencia de  $\pm 10$  Hz. Cabe recordar que una variación sobre la frecuencia (velocidad del motor DC) también incide en el voltaje generado.
- Con el nuevo panel de mediciones instalado, se pueden realizar ajustes mucho más finos debido a que la variación de parámetros de frecuencia y voltaje es realizada en forma manual y verificada visualmente, sin la necesidad de moverse del conjunto regulador.
- La disponibilidad de un control amplio y fino, de voltaje y frecuencia, abre la posibilidad de ejecutar estudios de respuesta de aparatos y equipos de carga no lineal a cambios de estas dos variables, a fin de obtener sus correspondientes modelos e incorporarlos en estudios eléctricos transitorios y de pequeña señal.

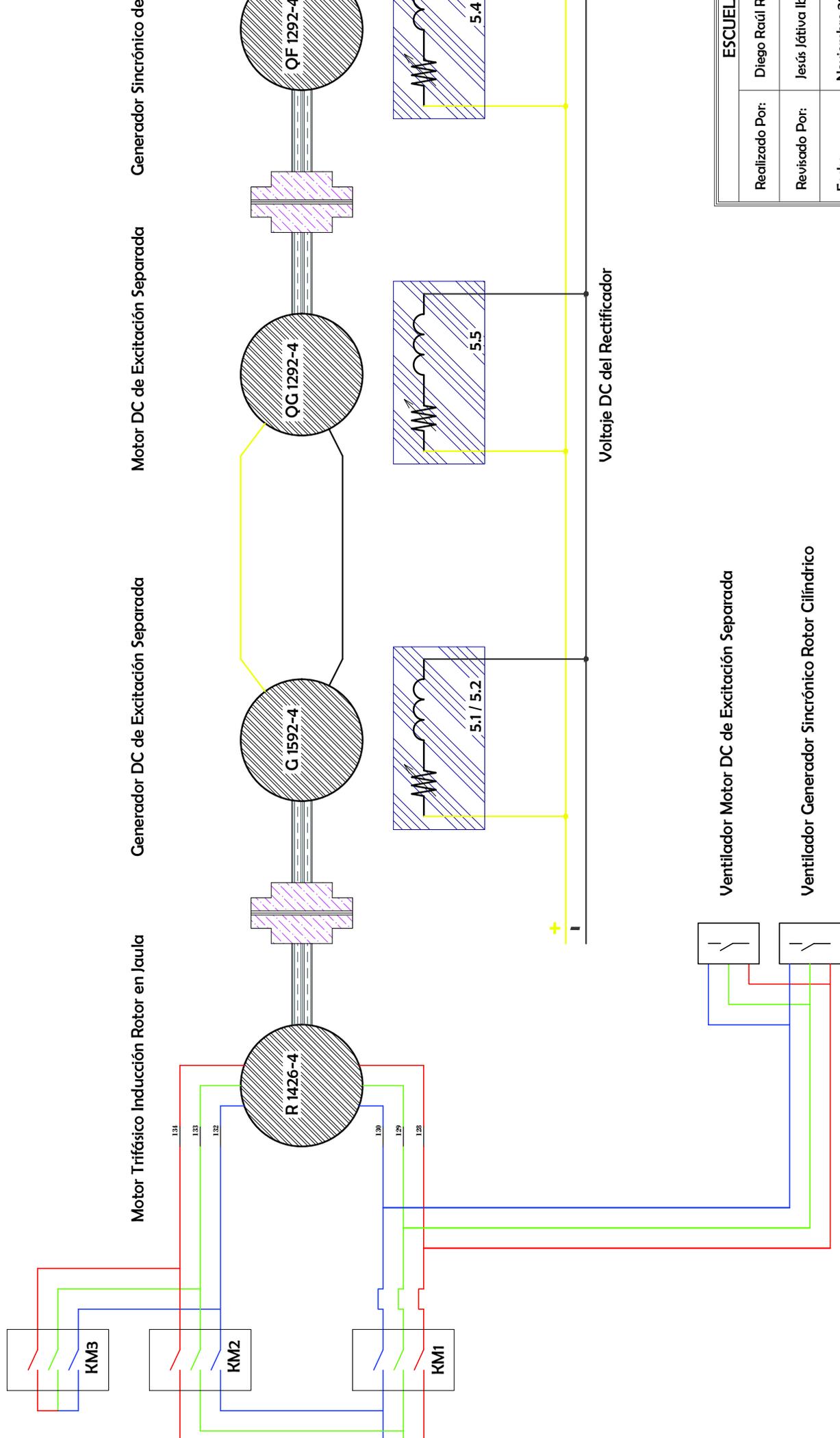
## **4.2. Recomendaciones**

- Cuando el tablero principal Siemens sea desconectado totalmente, las barras que cruzan sobre él se mantienen energizadas en todo momento, por lo cual se debería planificar la instalación de un disyuntor principal que gestione esta acción para facilitar las acciones de inspección y corrección sobre cada panel.
- Una vez terminada toda tarea de mantenimiento, se debe cumplir el plan expuesto en el numeral 2.5, a fin de evitar que el conjunto Ward Leonard vuelva a estar fuera de servicio.
- Implementar prácticas de laboratorio con el conjunto Ward Leonard con la finalidad de enriquecer la formación profesional durante la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. H. B. Guru, Máquinas Eléctricas y Transformadores, México d.f.: Oxford University Press, 2003.
- [2] S. . J. Chapman, Máquinas Eléctricas, México, D.F.: McGraw-Hill, 2012.
- [3] «Electricidad Practica,» 2013. [En línea]. Available: <http://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com/2011/07/motores-electricos.html>. [Último acceso: 19 10 2017].
- [4] «Espacio Tesla,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/espaciotesla/corriente-alterna>. [Último acceso: 3 10 2017].
- [5] T. Luis, Máquinas Eléctricas, Quito: EPN, 2005.
- [6] J. Játiva, «Sistemas Eléctricos de Potencia,» de EPN, Quito, 2016.
- [7] «Apuntes de Máquinas Eléctricas,» Instituto Politécnico Nacional México - Esime, [En línea]. Available: <http://ramonmar.mex.tl>.
- [8] «Motor Asíncrono y Síncrono,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.tuveras.com/máquinaasincrona/motorasincrono1.htm>.
- [9] O. Lobosco y J. L. Pereira, Selección y Aplicación de Motores Eléctricos, Barcelona: Siemens AG, 1989.
- [10] J. Cembranos, Automatismos Eléctricos Neumáticos e Hidráulicos, Paraninfo, 2008.
- [11] 1. IEEE Std, Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, New York: IEEE, 2004.
- [12] B. Nieto, Automatización del Tablero de Control del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN, Quito: EPN, 2009.
- [13] D. Trujillo, Diagnóstico y Actualización del Tablero de Control y Mesas de Trabajo del Laboratorio de Máquinas Eléctricas EPN, Quito: EPN, 2009.
- [14] 4. IEEE Std, Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery, New York: IEEE, 2013.
- [15] P. Angulo, «Blog de Pablo Angulo,» Blog EPN Profesores, 2017. [En línea]. Available: <http://pabloangulo.blog.epn.edu.ec/wp-content/uploads/sites/174/2014/09/El-Contactor-Electromagn%C3%A9tico.pdf>. [Último acceso: 12 octubre 2017].
- [16] RegistroOficial, Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo - Decreto Ejecutivo 2393, Quito, 2008.

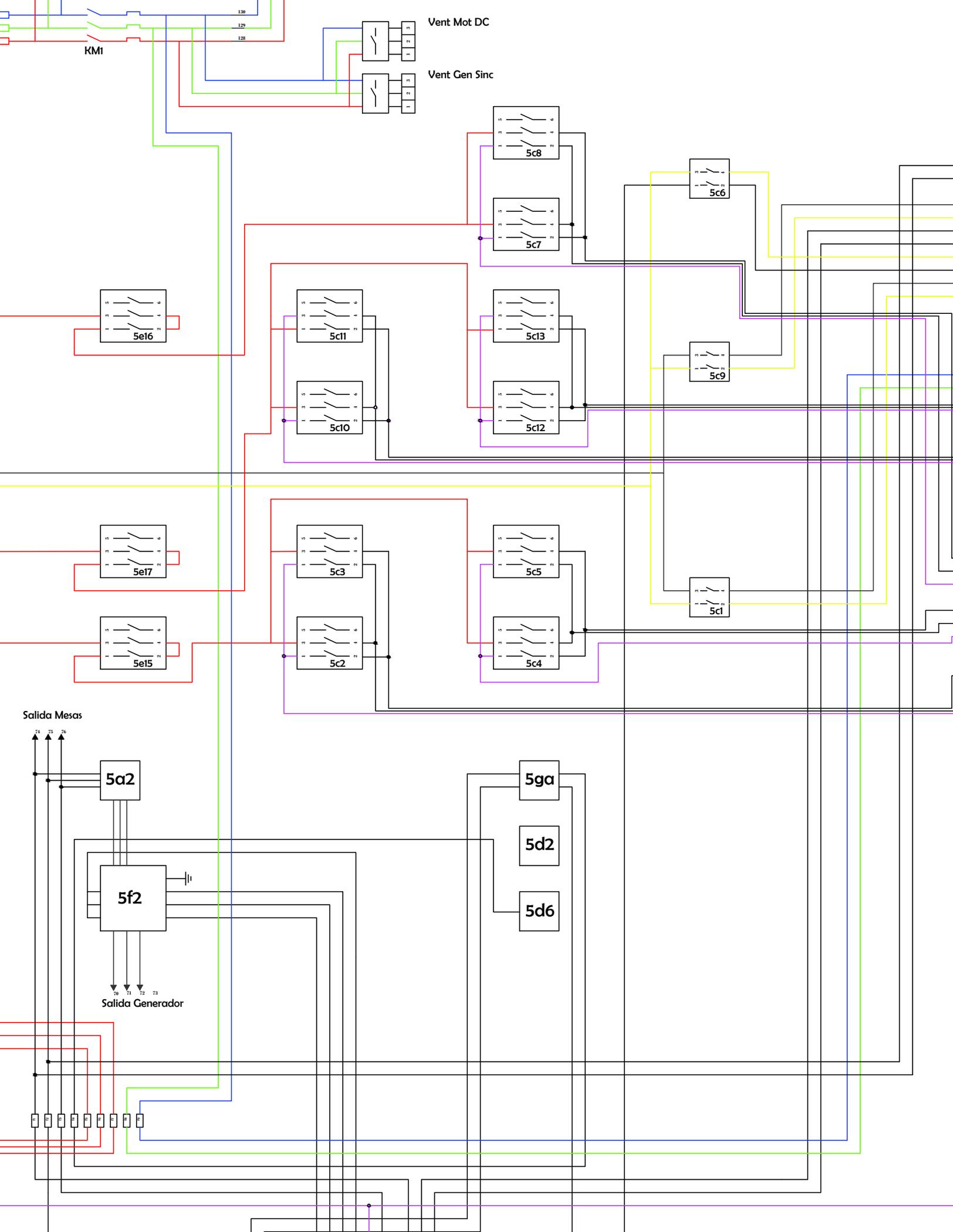
## **ANEXOS**



ESCUELA		
Realizado Por:	Diego Raúl R	
Revisado Por:	Jesús Játiva It	
Fecha:	Noviembre 20	

Ventilador Motor DC de Excitación Separada

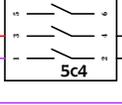
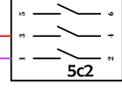
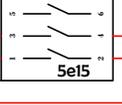
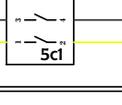
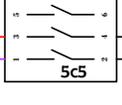
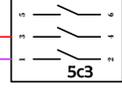
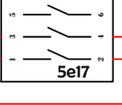
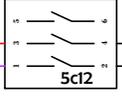
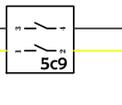
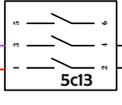
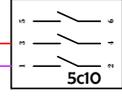
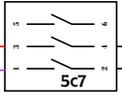
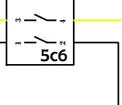
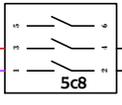
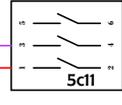
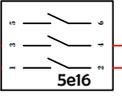
Ventilador Generador Sincrónico Rotor Cilíndrico



KM1

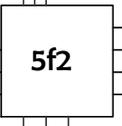
Vent Mot DC

Vent Gen Sinc



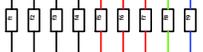
Salida Mesas

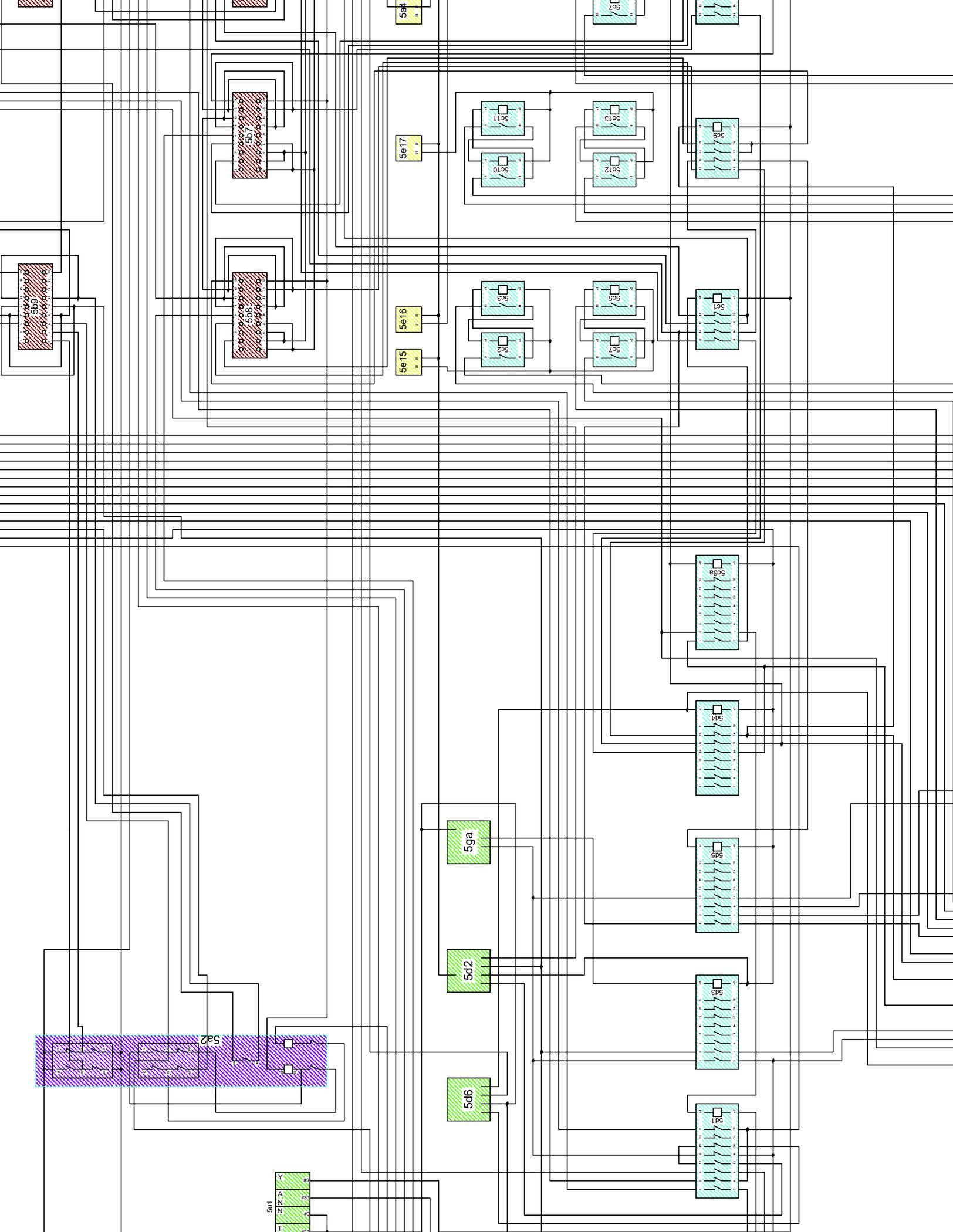
74  
75  
76



Salida Generator

70  
71  
72  
73





5a4

5e17

5e16

5e15

5ga

5d2

5d6

5u1

5a2

5b7

5b8

5c11

5c10

5c13

5c12

5c8

5c9

5c2

5c6

5c7

5c4

5f6

5f5

5f4

5f3

5f2