



Tesis de Grado

"Diseño y construcción de un banco experimental para estudiar la máquina asíncrona de inducción funcionando como motor y funcionando como generador".

| TURBOMAQUINAS |

Escuela de ingeniería - Abril 02 de 2021

"Diseño y construcción de un banco experimental para estudiar la máquina asíncrona de inducción funcionando como motor y funcionando como generador".

Raúl Gustavo Márquez Girón

Tesis de grado

Asesor:

Profesor: Francisco Javier Botero Herrera

Universidad EAFIT

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a Mi madre (a Martha).

Gracias por todo Martha.

Por tu ayuda, por tus oraciones, en fin, por toda la vida.

Agradecimientos

Deseo expresar mis sinceros agradecimientos a:

La Fuente

A este bonito planeta Tierra.

A mi familia.

A la Universidad.

Al laboratorio de Hidráulica de la U: A Don Carlos, a Arístides, a Milton.

Al profesor Francisco Javier Botero Herrera, mi tutor.
Gracias Profe por tu ayuda, por tus ideas y por tu paciencia.

A Rubén Darío Pantoja Agreda por su ayuda en la transcripción de este libro.
Gracias Rockero por todos esos días de trabajo frente al PC y por todas las idas a Latina Estéreo.

Y nuevamente gracias a La Fuente por inventarnos todo esto.

Índice General



i Prólogo	5
ii Introducción.....	10
Capítulo 1 Marco Teórico.....	17
Capítulo 2 Normas Usadas.....	126
Capítulo 3 Seguridad Eléctrica y Ergonomía.....	137
Capítulo 4 Diseño y Construcción del Equipo.....	148
Capítulo 5 Detalle de primo Motor.....	172
Capítulo 6 Mejoras en el Tránsito de Trabajo.....	185
Capítulo 7 Detalle de un Grupo Motor M Generador G	199
Capítulo 8 Cálculo de Condensadores.....	207
Capítulo 9 Funcionamiento del Equipo.....	216
Capítulo 10 Mediciones Básicas al Sistema.....	268
Capítulo 11 Diseño de Práctica de Laboratorio.....	281
Capítulo 12 Presupuesto.....	299
Capítulo 13 Recomendaciones Generales.....	303
Capítulo 14 Material Didáctico Complementario.....	306
Capítulo 15 Nuevas Vías de Desarrollo.....	313
Capítulo 16 Anexos.....	321
Capítulo 17 Posibles Extensiones al Sistema.....	370
Capítulo 18 Bibliografía.....	383
Conclusiones.	388

Prólogo.



Cuando empecé a escribir este libro sentí miedo.
Y siento más miedo aun escribiendo este prólogo para ti me queridísimo lector.
Es un miedo que no te sé explicar, pero, eso sí, es grande.
Grande porque acá me encuentro frente a ti tratando de contarte cosas que para mí son lógicas, pero que se vuelven completamente ilógicas en el momento de escribirlas.
También es cierto que debo aceptar mi completa inexperiencia para realizar escritos como este.
Bueno, pero he acá mi intento. Perdóname si lo encuentras demasiado aburrido y horrible de entender.

Este trabajo es el resultado de mis gomas por aprender electricidad y electrónica desde hace ya muchos años.
Te cuento que inicialmente mis anhelos eran los de ser aviador, pero la vida me tenía la sorpresa de que en realidad iba a ser un electricista.
(Aún hoy me gustan los aviones, aún sueño con ellos, aún miro las estrellas y me imagino viajando en un avión hacia algunas de ellas).
Sí, estudié electricidad y luego electrónica en la Bolivariana.
Y resulta que el tema este me empezó a gustar con cierta similitud (aunque no tan intenso) a cómo me gusta la aviación.
Pero a diferencia de la Aviación (la que no estudié), empecé a trabajar en la industria manufacturera en la rama de la electricidad.
Allí como te digo, trabajé en temas de electricidad, luego de automatización, realicé algunas especializaciones, siempre buscando satisfacer esa goma que caracteriza al electrónico inquieto y ansioso por aprender el mundo práctico del electrón.

Una intimidad: Debo aceptar que no soy de las personas más inteligentes que digamos, es decir las cosas me cuestan trabajo y veces más de lo estándar establecido.

Es por esto y por lo que he aprendido a lo largo de los años en la vida, que a veces encontrarás muchos detalles en este libro, en algunos temas específicos. A veces hasta realizo dibujos para explicar un tema escrito porque creo que así todo se entiende mejor.

Debo aceptar también que por muchos años he vivido de este tema eléctrico y quiero expresar acá mi agradecimiento por poderme desempeñar en esta rama del saber. Bueno, a esta altura ya sabes que soy un estudioso de la electricidad y la electrónica, que he trabajado en la industria ayudando en el campo de la electricidad y además que me gustan los aviones.

Entonces, figúrate que en una de esas gomas (con avidez de conocimiento), trabajando en la industria, me topé con el tema de las energías renovables.

Aparecieron por consiguiente los temas de, la eficiencia energética en los motores eléctricos y en las instalaciones, las luminarias LED, los aerogeneradores, las celdas fotovoltaicas para tener energía solar, los medidores inteligentes, etc.

Y apareció también este tema de las Turbomáquinas. Primero la Especialización y ahora la Maestría.

Apareció también de una forma rara pero oportuna:

Una máquina que revisaba en el trabajo presentaba una falla con su variador de velocidad electrónico.

Se revisó la falla en el manual del equipo y resultó ser una falla de regeneración de energía.

Analizando el proceso se observó que la masa movida por el motor principal del equipo era muy inercial y cuando se quería pasar el proceso de alta velocidad a baja velocidad, la masa resultaba impulsando al motor al contrario de ser el motor quién disminuyera su velocidad angular de salida para hacer más lento el proceso. Esto no lo ve correcto el variador y por ello saca de servicio al motor.

El problema se corrigió colocando una unidad que absorbía la energía regenerada y la regresaba a la red. Todo por sugerencia del fabricante del variador.

Todo quedó así, pero quedó la inquietud. ¿Como así que el motor de inducción bajo ciertas circunstancias puede generar electricidad y cómo es eso que es factible devolver organizadamente esa energía a la red?

Fue entonces cuando comenzó el estudio de la máquina de inducción en profundidad para observarla cuando su funcionamiento es como motor, cuando es como un freno y cuando es como un generador.

Desde acá empezó todo este cuento y tiene un pico máximo en este estudio que te presento.

En la especialización de Turbomáquinas conocí ese mundo de las máquinas Hidráulicas y observé que sobresalían dos temas: El tema de las bombas hidráulicas y el tema de las turbinas hidráulicas.

Pero cuando conocí la aplicación de las bombas como turbinas, relacioné este tema directamente con el evento regenerativo que observé en la industria.

Las aplicaciones más comunes de las bombas como turbinas apuntan al caso directo de usar una bomba centrífuga al revés, es decir obtener energía cinética en el eje de la bomba a partir de impulsar el impeler de la misma con un chorro de agua.

Y con esta energía cinética generada es factible mover una máquina de inducción trabajando en el modo generador y así lograr tener energía eléctrica trifásica disponible.

Luego aprendí que la energía cinética se puede lograr también con una hélice impulsada por el viento, teniendo así un aerogenerador, y también con un motor Diesel moviendo una máquina asíncrona.

Este trabajo es entonces uno de los picos de todo este tema de las energías renovables en donde busco analizar la máquina asíncrona en dos de sus tres modos de trabajo, el de modo Motor y el de modo Generador.

Estudiaremos el lado Motor mirándolo como esa energía potencial prima que es capaz de mover al eje de una máquina asíncrona y de llevarla a trabajar en su modo Generador.

La energía prima para este estudio es entonces un Motor asíncrono al que se le ha acondicionado un variador de frecuencia de tal modo que pueda variar la velocidad angular de dicho motor con miras a llevarlo a diferentes condiciones de velocidad para que, de esta forma, mueva el eje de un generador asíncrono y así observar su desempeño.

Otra intimidad: Con este estudio y en el trabajo, me he dedicado a la tarea de hacer dibujos en MS Power Point y en Corel Draw. Especialmente para este trabajo he ahondado en los dibujos en MS Power Point dada la facilidad para trasladarlos a MS Word, la cual es la base de la escritura de este trabajo. Gran cantidad de los dibujos de este trabajo son entonces el resultado de incursionar en el mundo del dibujo por computador lo cual es rico, pero a la vez muy laborioso y extenuante.

Te cuento que también esto me ayudado bastante para la elaboración de las clases de electrotecnia que actualmente dicto.

Por ejemplo, observarás a lo largo del trabajo la expresión Grupo Motor – Generador.

Esto lo hemos abreviamos Grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} .

A continuación, te muestro algunos diseños que se utilizan en el trabajo y que provienen de ese trabajo con MS Power Point. Ver figura p.1.

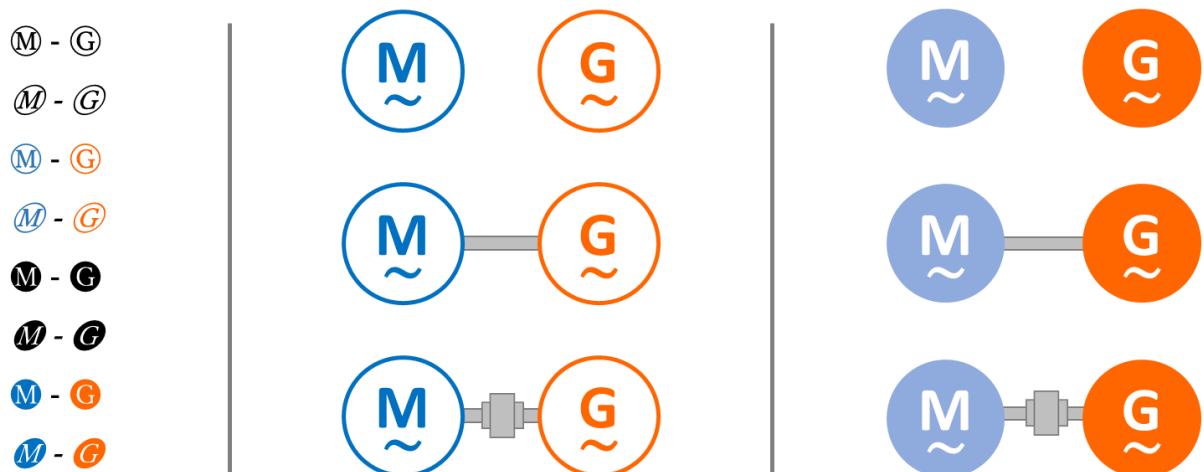


Figura p.1. *Diferentes maneras que encontrarás en este trabajo en las que me refiero al grupo Motor – Generador asíncrono de inducción trifásico.*

Mirando todo lo anterior se me ocurrió construir entonces un banco de trabajo en donde es posible observar al grupo Motor – Generador de una forma segura y amigable.

Pero sobre todo un banco de trabajo en donde se reúnan muchas de esas gomas de electricidad y electrónica que he ido cultivando en el desempeño profesional. He procurado porque el banco sea bonito, útil, adaptado al entorno, practico y amigable.

Todo lo anterior lo he realizado porque me gusta trabajar así y tratar de llevar todo a su máxima expresión desde mis posibilidades y conocimientos, teniendo en cuenta muchos detalles y buscando también que el equipo funcione verdaderamente. Espero que este trabajo te llame la atención así sea solo mínimamente, como un aspecto de cultura general. Con solo esto te estoy muy agradecido. Si te sirve para algo más es Excelente. Nuevamente gracias.

También he querido reunir en un dibujo abstracto muchos de los “ires y venires” de este trabajo dada mi afición a los dibujos por computadora. Ahí lo tienes. Ver figura p.2.

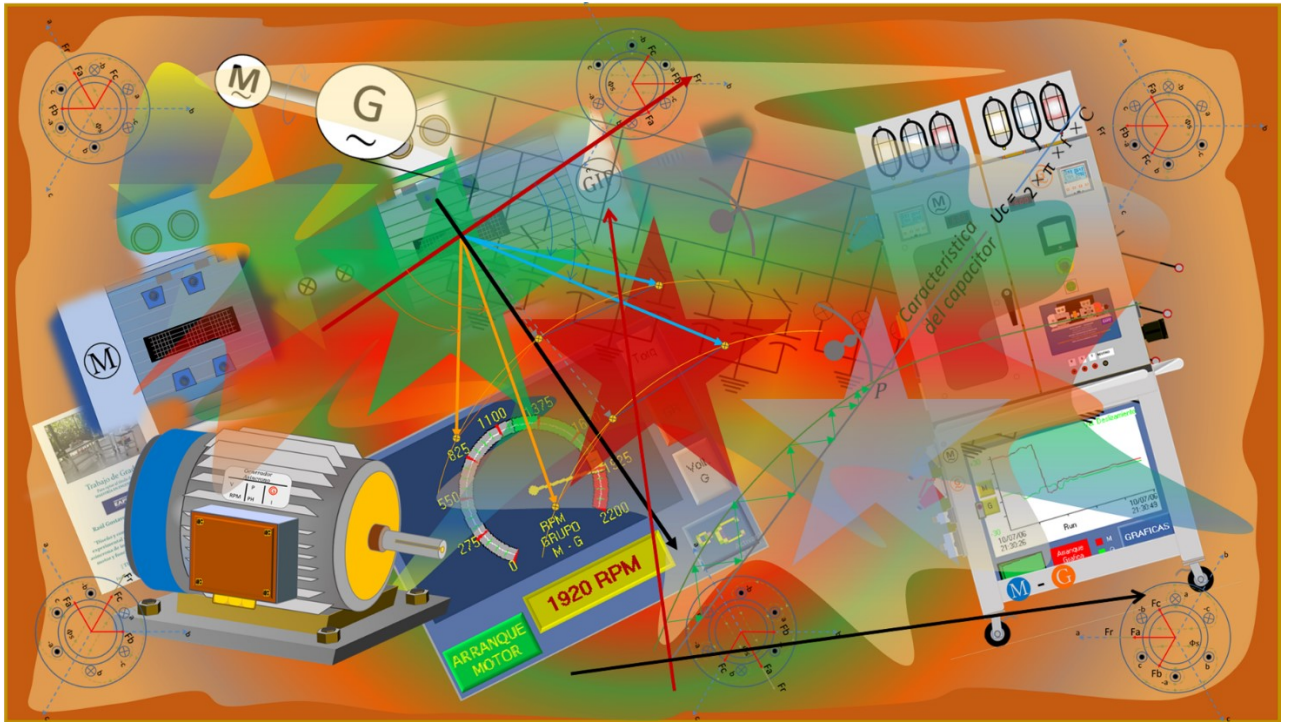


Figura p.2. Zaperoco de cosas de la tesis.

Introducción.



Objetivo general:

"Diseño y construcción de un banco experimental para estudiar la máquina asíncrona de inducción funcionando como motor y funcionando como generador".

Ampliando un poco más el objetivo general , lo que se busca es verificar con un grupo Motor – Generador $\text{M} - \text{G}$ de inducción, el modo Motor y el Modo Generador en las maquinas asíncronas trifásicas y conocer sus características más relevantes así como su forma de utilización segura, e inducir a ahondar en su estudio.

Abstract.

General purpose:

"Design and construction of an experimental work table to study the asynchronous induction machine operating as a motor and operating as a generator".

Expanding the general objective a little more, what is sought is to verify with an induction Motor - Generator $\text{M} - \text{G}$ group, the Motor mode and the Generator mode in three-phase asynchronous machines and to know their most relevant characteristics as well as their way of use safe, and induce further study.

Detalle:

Las ideas fundamentales detrás de la máquina asincrónica de inducción, desarrolladas por Nikola Tesla a finales de la década de 1880, se convirtieron en uno de los pilares que ha soportado el desarrollo industrial y tecnológico de la humanidad desde el siglo pasado.

Incluso hoy, siguen representando una forma limpia, segura y renovable de aprovechamiento de la energía a gran escala. Esta es una máquina robusta.

Por un lado, consta de solo dos componentes principales y esto hace que se pueda producir fácil y rápidamente.

Por otro lado, ostenta la propiedad de reversibilidad, es decir, puede ser usada como motor Ⓜ o como generador ⓐ , aunque esta última forma no sea tan difundida.

De hecho, son esas propiedades las que han motivado el desarrollo de este proyecto al trazarse como meta el diseño y construcción de un banco experimental, didáctico y modular, que permita el estudio de la máquina asincrónica de inducción funcionando como motor Ⓜ y funcionando como generador ⓐ .

La máquina de inducción es uno de los dispositivos de cambio de energía que le han prestado un gran servicio a la humanidad.

El motor de inducción es un equipo que transforma energía eléctrica en energía de movimiento en un eje con el que se pueden realizar gran diversidad de trabajos.

Y la manera en que esta función se lleva a cabo es una manera que le es asequible a gran cantidad de personas del mundo tanto en la ciudad como en la ruralidad.

El motor de inducción es económico y se adapta a muchas de las necesidades cotidianas en lo referente a la conversión de energía eléctrica en energía mecánica.

En cualquier parte del mundo se puede ver la utilización del motor de inducción.

Este trabajo busca incrementar la comprensión de estos equipos desde el punto de vista práctico en ambos lados de su utilización (el lado motor y el lado generador). Cabe resaltar acá que la aplicación desde el lado motor puede utilizarse para representar diferentes casos en donde es posible utilizar la energía potencial y convertirla en energía cinética.

Para lo anterior, tal es el caso de un flujo de agua que cae a través de una tubería desde una altura determinada donde al final de la caída colocamos un juego de aspas (impeler) que es impulsado por el chorro de agua convirtiendo así la energía potencial del agua en la altura en energía cinética de movimiento.

Esta energía cinética puede acoplarse mediante un eje a un generador de inducción que traduce a su vez esta energía cinética en energía eléctrica para utilizarse así en diferentes aplicaciones de la vida diaria.

Y buscando las aplicaciones prácticas podemos ver que en el ejemplo anterior es factible usar un sistema de bombeo de los del tipo normal en donde se tiene una bomba centrífuga eléctrica la cual usaremos al revés, pensando obtener energía de la caída del agua, usando el impeler de la bomba no para impulsar sino para ser impulsado, y el motor mismo pasaría al modo generador.

La máquina de inducción permite lo anterior. La hemos usado más que todo en su modo motor pero vale la pena trabajarle y usarle su modo generador dada su viabilidad y economía.

Esta tesis consiste entonces en estudiar los aspectos anteriores en un acoplamiento entre un motor de inducción y un generador de inducción.

El motor de inducción lo asistiremos con un variador de velocidad electrónico para incrementar su versatilidad y poder tener diferentes escenarios de estudio que impacten el estudio del generador. Para el caso de la caída de agua a través de una tubería tendríamos que el variador de velocidad se puede asemejar a una válvula análoga colocada justo antes de la llegada al impeler la cual controla el flujo de agua que llega a dicho impeler, posibilitando el control para tener unas condiciones determinadas.

El generador de inducción \textcircled{G} no es más que un motor de inducción trabajando al revés. Es una maquina trabajando en otro punto de su curva de funcionamiento. Ver figura i1.

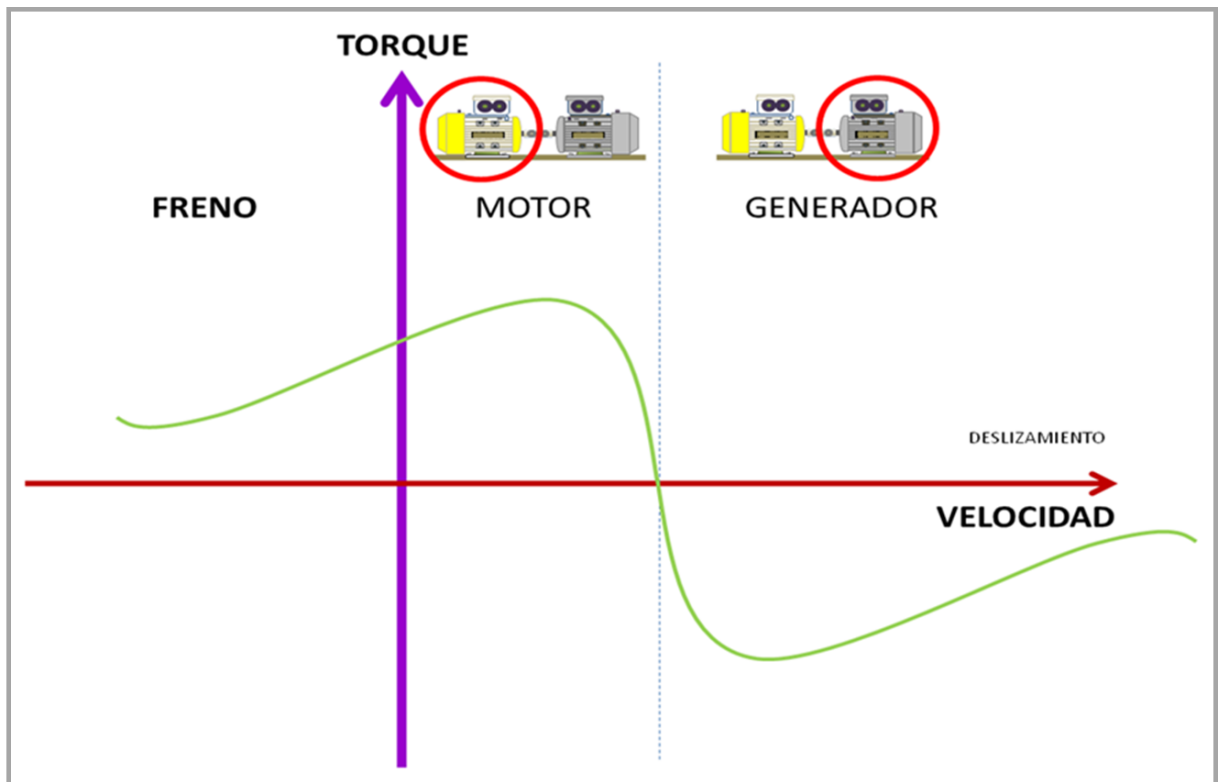


Figura i1. Zonas de trabajo de la maquina asíncrona de Inducción. Esquema indicativo.

Este trabajo busca mostrar en un bloque conjunto tanto al motor como el generador funcionando a la par.

Y busca también realizar algunas mediciones en donde se comienzan a estudiar en forma práctica los diferentes requerimientos de la inducción electromagnética para el trabajo como motor y para el trabajo como generador.

La tesis propone un banco de trabajo en donde se acoplen directamente dos máquinas de inducción, una de ellas siendo el motor impulsor \textcircled{M} y la otra actuando como el generador \textcircled{G} .

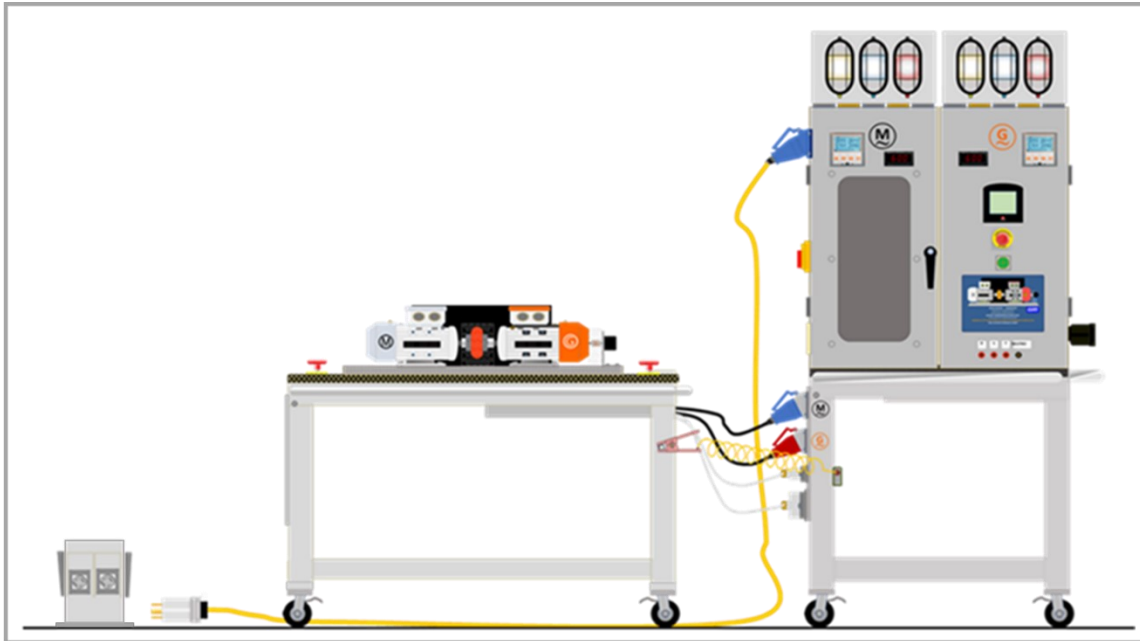


Figura i2. Dibujo ilustrativo del Banco de trabajo de la tesis.

Buscando conocer un dispositivo que nos permitiera conocer más los fenómenos eléctricos que se presentan cuando los dispositivos hidráulicos funcionan en un sistema, la mesa de trabajo de la figura i2 permite la interacción de tanto un motor \textcircled{M} como un generador \textcircled{G} a la vez.

Para el estudio de las variables hidráulicas que se presentan en un sistema hidráulico, es factible con la parte MOTOR simular en el banco de trabajo como desarrollar fenómenos similares y predecir así muchos comportamientos que pueden surgir mientras el sistema funciona.

El grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} es un conjunto netamente eléctrico pero conecta con los fenómenos hidráulicos de una manera directa y totalmente relacionada. Ver figura i3.

Tal como mencionamos al comienzo la parte \textcircled{M} (motor) puede simular una caída de agua por una tubería. Una válvula para el estrangulamiento del flujo puede ejecutarse variando la velocidad de M mediante un sistema sencillo de variación de velocidad que puede colocársele a motor (un variador de velocidad electrónico).

Muchos más fenómenos hidráulicos pueden asemejarse si conjugamos un variador de velocidad (Variador de frecuencia eléctrica), un autómata programable (PLC - Controlador lógico programable) y \textcircled{M} (para nuestro caso un motor de inducción).

\textcircled{M} moverá al \textcircled{G} tal como se dicte mediante programación que se le realice al Autómata que comanda el Variador de velocidad de \textcircled{M} . Esto puede ejecutarse con señales análogas y digitales, o mediante protocolos de comunicación maestro esclavo con funciones de control claramente definidas (P. E. Red MODBUS).

Ya que \textcircled{M} es un Motor trifásico de inducción emplearemos también un medidor de parámetros eléctricos para medir el desempeño eléctrico de \textcircled{M} en todo momento y enlazaremos también este dispositivo con la red Variador- PLC para manejar unos datos muy completos para el conocimiento del desempeño de \textcircled{M} .

A modo de ejemplo tendremos la potencia activa instantánea que se podrá medir en el motor. Con este dato y con la medida de la velocidad de rotación del motor, también en forma instantánea, podremos tener un dato del torque instantáneo, también en todo momento. Esto es muy importante ya que si logramos tener *también* el dato del torque en \textcircled{G} podremos así estimar lo que se pierde cuando \textcircled{M} mueve a \textcircled{G} .

Otros datos que se le pueden tomar a \textcircled{M} :

- Voltajes.
- Corrientes.
- Formas de onda.
- Distorsiones armónicas en voltaje y corriente.
- Potencia aparente
- Potencia reactiva.
- Factor de Potencia.

Para el generador trifásico de inducción \textcircled{G} buscaremos conocer en todo momento todos los requisitos que este tipo de máquinas presentan para funcionar como Generador.

Algunos de estos requisitos son:

- Su velocidad por encima de la velocidad de sincronismo.
- Su trabajo en conjunto con un banco de condensadores.
- Su requisitos en la cargas.
- El voltaje entregado y su variabilidad.
- Su frecuencia de trabajo.
- Su corrección de velocidad.
- Etc.

El estudio del generador es clave en este banco de trabajo y conlleva realizar diversas pruebas y trabajar además con distintas potencias.

Es por esto que el banco de trabajo consta de dos grupos \textcircled{M} - \textcircled{G} con potencias de 0,18 HP y 1.2 HP respectivamente.

El banco diseñado servirá para medir las distintas variables que se presentan en las pruebas y poseerá también la opción de conexión con la maleta de medición de Variables eléctricas de LABVIEW que posee el laboratorio de Hidráulica.

Inicialmente las cargas que se le conectarán al generador serán de las del tipo resistivo pero se trabajará posteriormente también con cargas inductivas y electrónicas.

Para completar el desarrollo, se adoptó la siguiente metodología:

- Construcción del marco teórico y conceptual a partir de la exploración del estado del arte. Se abordan los aspectos teóricos de las máquinas eléctricas de inducción más relevantes con respecto a su funcionamiento, partiendo de un breve repaso de conceptos claves del electromagnetismo hasta llegar al concepto motor, haciendo énfasis en la máquina asíncrona de inducción trifásica en sus modos de operación *motor*, *generador* y *freno eléctrico*, que se representan respectivamente mediante los símbolos \textcircled{M} , \textcircled{G} y \textcircled{F} , tanto a lo largo de este manuscrito como en el banco experimental.

El soporte y resultado se reporta en el Capítulo 1. El Capítulo 5 incluye detalles sobre el concepto del primo motor con un particular énfasis a la aplicación de *bomba-como-turbina* (PAT por sus siglas en inglés) que vincula este trabajo con investigaciones en el campo de las turbomáquinas hidráulicas.

- Estandarización y normatividad técnica pertinente. Se revisan e incorporan normas técnicas nacionales y algunas internacionales (como la IEC) para garantizar la calidad y seguridad de banco de pruebas. Las normas conciernen principalmente a los motores eléctricos de inducción y al tablero eléctrico de maniobra y control para dichos motores. Esta etapa se desarrolla en el Capítulo 2.
- Seguridad y ergonomía. Dos consideraciones se tienen en cuenta para la formulación de los aspectos relacionados. El primero es el riesgo inherente al uso y manipulación de la energía eléctrica. El segundo es la poca experiencia y desparpajo que pueden manifestar algunos de los estudiantes universitarios que componen gran parte del universo de usuarios de este proyecto. Se consideran tanto los estándares revisados en el Capítulo 2 como en las recomendaciones del personal técnico del Centro de Laboratorios de EAFIT. El soporte se consigna en los capítulos 3, 6, 9 y 13.
- Diseño, cálculos y construcción. Se comienza por el desarrollo de un primer modelo operativo que se perfecciona a medida que se adquiere dominio sobre cada uno de los componentes del sistema y se valida su funcionamiento, hasta llegar al prototipo definitivo. Tal proceso se describe en los 4 y 7. Se da especial relevancia al cálculo de los condensadores requeridos para la operación en modo *generador* y por eso el Capítulo 8 es dedicado a ese propósito. El capítulo 12 describe el presupuesto.
- Caracterización del banco experimental (prototipo definitivo). El Capítulo 9 presenta a manera de *manual de usuario*, la secuencia operativa del equipo partiendo desde su forma adecuada de conexión hasta llegar al momento en donde se observa la maquina asíncrona funcionando. Busca que la correcta utilización prolongue la vida del equipo, además de que permita identificar posibles averías antes de que estas se conviertan en daños reales. El Capítulo 10 presenta las variables registradas y los instrumentos usados para su indicación.
- Redacción y diseño de guías de laboratorio y material didáctico. Los aprendizajes durante el desarrollo del proyecto: pruebas, mejoras y validaciones, se capitalizaron en guías didácticas de laboratorio, que permiten la explotación adecuada y segura de los conceptos relacionados con las máquinas asíncronas de inducción usando el prototipo experimental producido. El capítulo 11 presenta el material didáctico complementario que se diseñó para facilitar de manera amigable el uso seguro del banco experimental por parte de personas inexpertas. Cabe mencionar que los capítulos que soportan esta parte del proyecto no lo limitan, y que por el contrario su potencial se demuestra en los capítulos 15 y 17, como nuevas vías de desarrollo y extensiones del sistema (nuevas adiciones).

RESUMEN:

Este trabajo consiste en diseñar e implementar una mesa de estudio de un grupo motor generador $\text{M} - \text{G}$ enteramente del tipo inductivo asíncrono trifásico.

La mesa estudio comprende este tipo de máquinas ya que son los maquinas más comunes en el país y también son las más económicas.

El generador de inducción G es en realidad un *motor* que es impulsado por alguna fuente externa (puede ser agua o aire o un hidrocarburo en explosión controlada) y que dada su simplicidad es ideal conocerlo para tener un aprovechamiento al máximo del mismo.

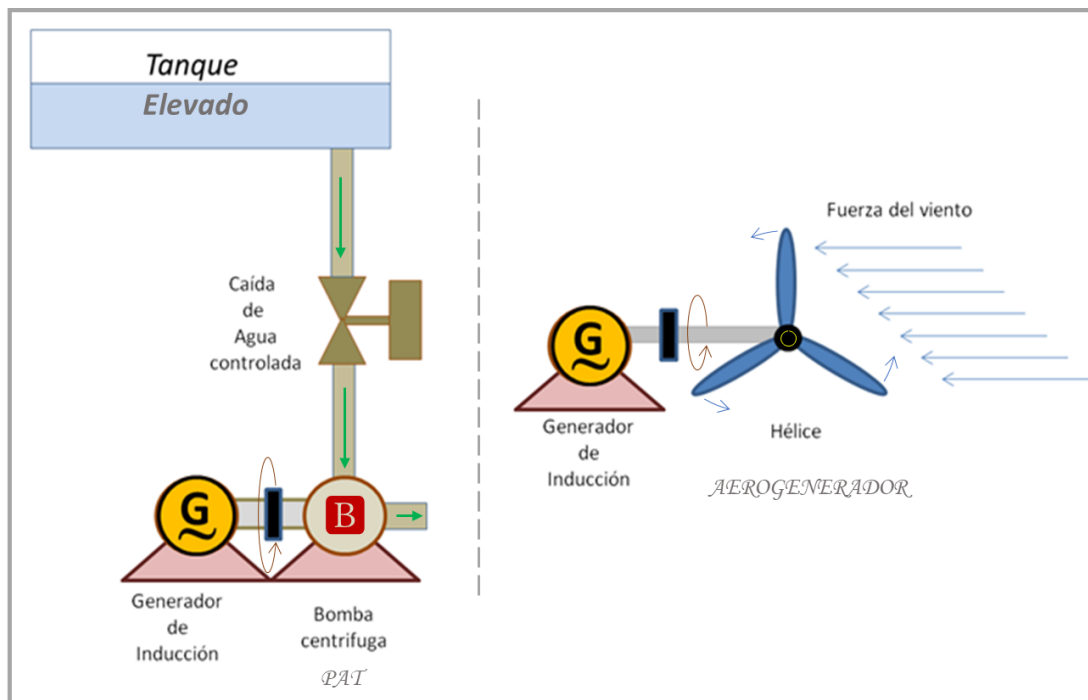


Figura i3. Ejemplos de fuentes externas. Izquierda: Bomba trabajando como turbina impulsando un generador de inducción trifásico (una maquina asíncrona trabajando en modo generador). Derecha: Aerogenerador común.

Capítulo 1

Marco teórico

Objetivo específico:

Observar algunos de los aspectos teóricos de las máquinas eléctricas de inducción más relevantes con respecto a su funcionamiento, partiendo de un breve repaso de conceptos claves del electromagnetismo hasta llegar al concepto motor, haciendo énfasis en la máquina asíncrona de inducción trifásica en sus aspectos de Motor \textcircled{M} , Generador \textcircled{G} y Freno eléctrico \textcircled{F} .

Este trabajo observará con dedicación la máquina de corriente alterna asíncrona trifásica, pero no olvida sus orígenes que provienen de la hidráulica aplicada. La razón de lo anterior se basa en que este es un estudio de algunos elementos que participan activamente en los procesos hidráulicos. Analicemos las siguientes dos situaciones:

El motor eléctrico es uno de los elementos que pueden impulsar una bomba centrífuga hidráulica.

Y el Generador eléctrico es el elemento anexo a las turbinas hidráulicas, las cuales son impulsadas por un chorro de agua.

En estas dos situaciones anteriores, la componente eléctrica es siempre fundamental. Muchos de los sistemas de bombeo de agua en el mundo de hoy, son impulsados con motores eléctricos los cuales por lo general, son de los del tipo asíncronos trifásicos de jaula de ardilla y gran parte de los generadores de electricidad hidráulica del mundo

son de los del tipo síncronos trifásicos, aunque la generación con maquinas asíncronas ya también esta presente en el mundo muy del lado de los aerogeneradores. Para observar un poco la componente hidráulica analizaremos el siguiente ejercicio de hidráulica:

Ejercicio de hidráulica

En una fabrica de Pinturas Vinílicas (a Base de Agua) se desea elevar un caudal de agua a razón de 139 l / min a un tanque de 5000 l ubicado a 25 m de altura.

El agua se bombea desde un reservorio a presión atmosférica a 4m por debajo del suelo. Ver figura 1.1.

¿Cuál debe ser la potencia de la bomba si su eficiencia es del 75% ?

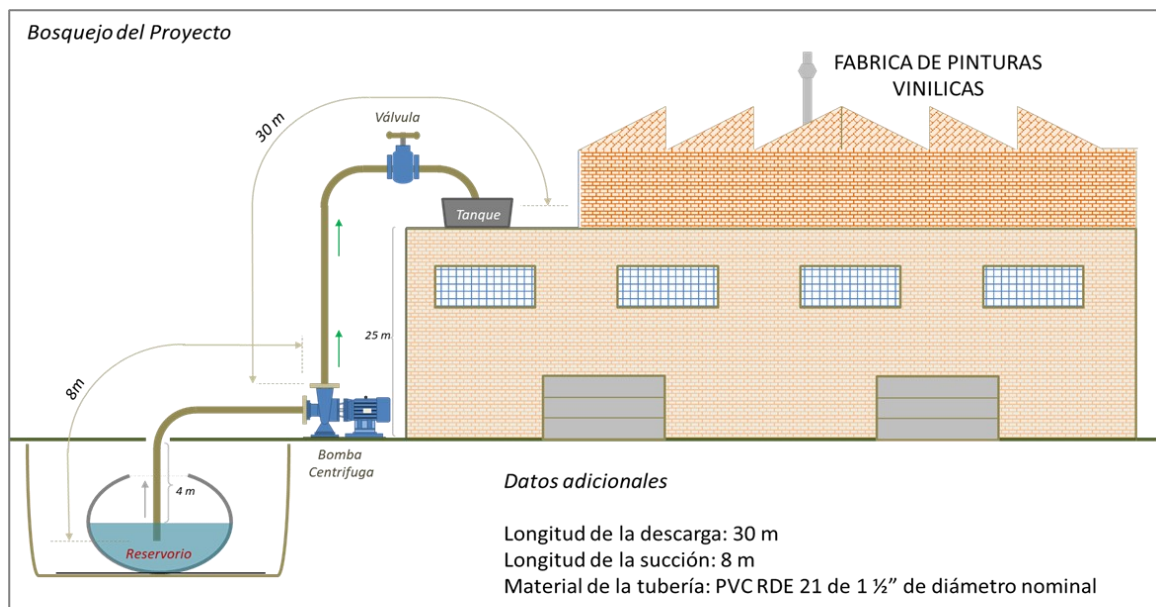


Figura 1.1 Bosquejo del proyecto ejercicio de hidráulica

Desarrollo:

En el ejercicio utilizaremos el mismo diámetro de tubería, tanto para la succión como para la descarga. Esto para asuntos de simplificar el ejercicio. Pero en la realidad suelen ser diferentes. Y por lo general el diámetro de succión es más grande que el diámetro de descarga. Ver figura 1.2.

Para calcular la potencia de la bomba se utiliza la siguiente ecuación:

Por lo general
 \varnothing Succión > \varnothing Descarga

Nota:
 Para simplificar el ejercicio usaremos diámetros iguales.

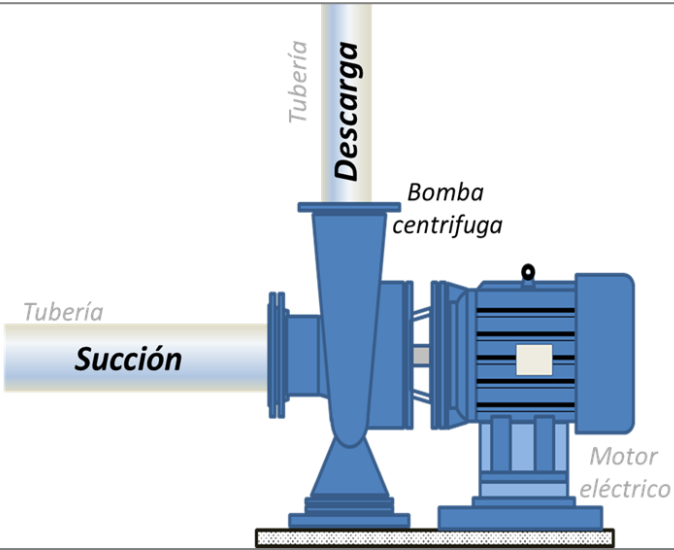


Figura 1.2. Succión y descarga de la bomba centrífuga.

$$\text{Pot bomba (hp)} = \frac{Q * \rho * g * h_b}{746 * \text{Eff}_b}$$

Terminos de la ecuación:	Unidad	Valor
Pot bomba =	HP	Se encontrará
Caudal =	litros / min	139
	m ³ / seg	0,0023
Densidad del agua (ρ) =	kg / m ³	998
Gravedad (g) =	m / s ²	9,8
Cabeza neta de la bomba (h_b) =	m	Se encontrará
Eficiencia de la bomba (Eff_b) =	%	75
1 HP =	Wattios	746

Para calcular la potencia de la bomba se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Pot bomba (hp)} = \frac{Q * \rho * g * h_b}{746 * \text{Eff}_b}$$

En la ecuación anterior conocemos todos los componentes del lado de la derecha a excepción del dato de la cabeza neta de la bomba h_b , el cual trataremos de encontrar:
 Este se logra a través del balance de energía mecánica del fluido que nos presenta la ecuación de Bernoulli.
 Dicho balance lo realizaremos desde el punto ① hasta el punto ③. Ver figura 1.3.
 El punto es la cota donde se encuentra la bomba, la cual debe procurarse que este cercana al reservorio debido a lo que se conoce como la cabeza neta de succión de la bomba.

Con lo anterior, nuestro balance lo realizaremos desde el punto ① hasta el punto ③.

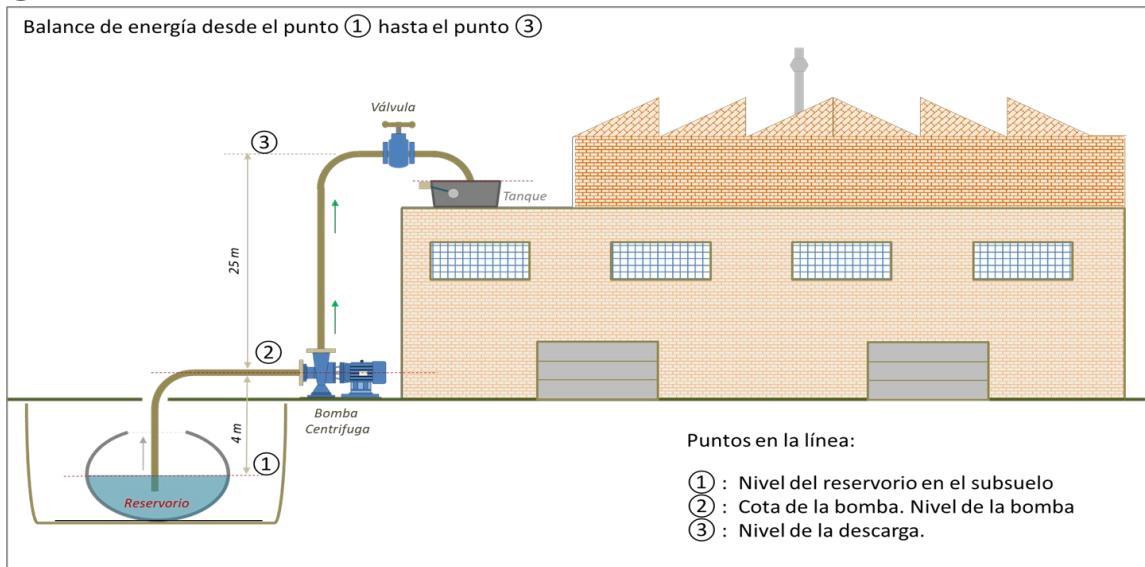


Figura 1.3. Definición de puntos de balance en el bosquejo del proyecto

Balace de energía mecánica del fluido que nos presenta la ecuación de Bernoulli. El balace es el siguiente:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\varphi} + h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\varphi} + h_{f_{1 \rightarrow 3}}$$

Donde:

h_1	:	Cabeza de altura en la cota 1.
$v_1^2 / (2 * g)$:	Cabeza de velocidad en la cota 1.
p_1	:	Cabeza de presión en la cota 1
h_B	:	Cabeza neta de la bomba
h_3	:	Cabeza de altura en la cota 3. En la descarga
$v_3^2 / (2 * g)$:	Cabeza de velocidad en la cota 3. En la descarga
p_3	:	Cabeza de presión en la cota 3. En la descarga
$h_{f_{1 \rightarrow 3}}$:	Perdidas por fricción en toda la línea desde la cota 1 hasta la cota 3

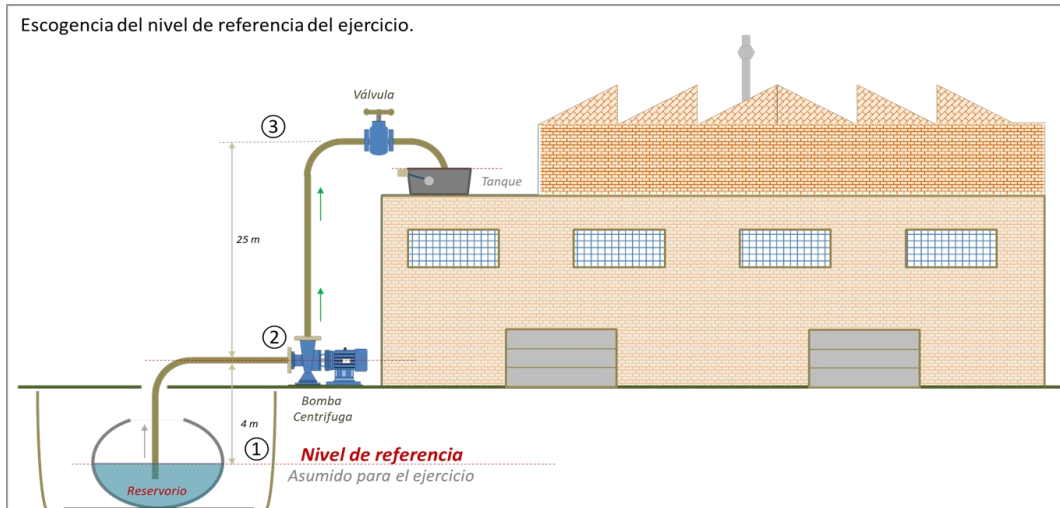


Figura 1.4. Escogencia del nivel de referencia en el bosquejo del proyecto.

Si tomamos como nivel de referencia la cota 1, o sea $Y = 0 \text{ m}$, entonces $h_1 = 0 \text{ m}$. Ver figura 1.4.

La velocidad v_1 es cero debido a que suponemos que siempre el nivel es el mismo y que se mantiene en un estado estacionario. Es decir, el reservorio se va llenando constantemente.

La presión 1 (p_1) es igual a la presión 3 (p_3) debido a que las dos están bajo la presión atmosférica, cancelándose en la ecuación. Si tomamos como nivel de referencia la cota 1, o sea $Y=0$, entonces $h_1 = 0 \text{ m}$

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} + h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho} + h_{f_{1 \rightarrow 3}}$$

$$\Rightarrow h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + h_{f_{1 \rightarrow 3}}$$

De esta conocemos ecuación:

$$h_3 = 4 \text{ m} + 25 \text{ m} = 29 \text{ m}$$

Es la altura desde el nivel del reservorio (el nivel de referencia) hasta el nivel del tanque en la parte alta del proyecto.

Encontremos ahora la velocidad v_3 :

$$V_3 = Q / A; \text{ (Caudal / área)}$$

$$A = (\pi * D^2) / 4;$$

Área de la tubería de PVC El diámetro corresponde al diámetro interno. Este se obtiene de la tabla que hay en la siguiente gráfica. Para tubería PVC RDE 21 de diámetro nominal 1 ½ pulgadas el diámetro interno es de $D = 43,68 \text{ mm}$ o más bien $D = 0,04368\text{m}$

RDE 21 PVC

Presión de Trabajo a 23°C: 200 PSI

Diámetro Nominal		Referencia	Peso	Diámetro Exterior Promedio		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Promedio
mm	pulg.			mm	pulg.	mm	pulg.	
26	3/4	12592	189	26.67	1.050	1.52	0.060	23.63
33	1	12571	252	33.40	1.315	1.60	0.063	30.20
42	1.1/4	12577	395	42.16	1.660	2.01	0.079	38.14
48	1.1/2	12574	514	48.26	1.900	2.29	0.090	43.68
60	2	12582	811	60.32	2.375	2.87	0.113	54.58
73	2.1/2	12585	1185	73.03	2.875	3.48	0.137	66.07
88	3	12588	1761	88.90	3.500	4.24	0.167	80.42
114	4	12596	2904	114.30	4.500	5.44	0.214	103.42

Tabla extraída de:
Manual técnico Tubo sistemas construcción de PAVCO

Entonces el área está dada por:

$$A = (\pi * 0,04368^2) / 4 = 0,0015 \text{ m}^2$$

Y con esto la velocidad nos da entonces lo siguiente:

$$V_3 = Q / A; \text{ (Caudal / área)}$$

$$V_3 = ((0,0023 \text{ m}^3 / \text{s}) / 0,0015 \text{ m}^2); \text{ (Caudal / área)}$$

$$V_3 = 1,546 \text{ m/s}; \text{ (velocidad en la cota 3)}$$

Nos faltan las pérdidas por fricción desde el punto 1 hasta el punto 3.

$$h_{f_{1 \rightarrow 3}} \left\{ \begin{array}{l} \text{Estas pérdidas por fricción se componen de Pérdidas Primarias y Pérdidas Secundarias.} \\ \text{La ecuación que contempla ambas pérdidas es la siguiente: Es la ecuación de Darcy – Weisbach.} \end{array} \right.$$

$$h_{f_{1 \rightarrow 3}} = \underbrace{F \frac{L * v_3^2}{D * 2 * g}}_{\text{PERDIDAS PRIMARIAS}} + \underbrace{\sum \left[k_c \frac{v_3^2}{2 * g} + k_v \frac{v_3^2}{2 * g} \right]}_{\text{PERDIDAS SECUNDARIAS}}$$

PERDIDAS PRIMARIAS

PERDIDAS SECUNDARIAS

Datos		VALOR
F :	Coefficiente de Fricción	POR ENCONTRAR
L :	Longitud de la tubería (m)= L descarga+ L succión= Ld + Ls	38,00
D :	Diametro inteno de la tubería (m)	0,04
g :	Gravedad (m / s ²)	9,80
v₃ :	Velocidad promedio en la sección transversal del tubo (m / s)	1,55
k_c :	Coefficiente de Fricción accesorios. Codos	POR ENCONTRAR
k_v :	Coefficiente de Fricción válvula .	POR ENCONTRAR
μ :	Viscosidad del agua. (pa * s)	0,001005
ρ :	Densidad del agua. (kg / m ³)	998,00

Encontremos el valor de F

F es el coeficiente de fricción y depende de la fórmula de Reynolds y de la rugosidad relativa.

$$F : \begin{cases} \rightarrow Re = \frac{v_3 * D * \rho}{\mu} \Rightarrow (\text{adimensional}) \\ \rightarrow \frac{\epsilon}{D} \end{cases}$$

Rugosidad relativa
⇒ (adimensional)

Tabla para encontrar la rugosidad absoluta del material de la tubería del proyecto: PVC.

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ϵ (mm)	Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Tabla extraída de:
Manual técnico Tubo sistemas construcción de PAVCO

Encontremos el valor de F

Entonces si reemplazamos, tenemos que Reynolds y la rugosidad relativa tienen el siguiente valor:

$$F : \begin{cases} \text{Re} = 67058,93 & \Rightarrow (\text{adimensional}) \\ \frac{\epsilon}{D} = 0,0000343 & \Rightarrow (\text{adimensional}) \end{cases}$$

Como nos dio un $\text{Re} = 67058,93$ mayor que 4000, tenemos entonces un flujo turbulento. El flujo a través de toda la línea del proyecto es un flujo turbulento. Con esto el valor de F se calcula de la fórmula de COOLEBROOK

$$F = \frac{1,325}{\left[-\text{Ln} \left[\frac{\epsilon}{3,7 * D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right] \right]^2}$$

Reemplazando los valores en la fórmula nos da lo siguiente:

	$Re^{0,9}$	Parte de la fórmula para F	22070,44
①	$5,74 / (Re^{0,9})$	Parte de la fórmula para F	0,00026
②	$(\epsilon/D) / 3,7 =$	Parte de la fórmula para F	9,28126E-06
③	$① + ② =$	Parte de la fórmula para F	0,000269
④	$\ln(③) =$	Parte de la fórmula para F	-8,22
⑤	$④^2 =$	Parte de la fórmula para F	67,56
	$1,325 / ⑤ =$	Valor de F	0,0196

El valor de F es entonces:

$$F = 0,0196$$

Este valor es para todo el sistema en general ya que se supuso que tanto la tubería de succión como la tubería de descarga tienen el mismo diámetro.

En caso de tener diámetros diferentes en la descarga y en la succión, hubiese sido encontrar un valor de F para la succión y otro para la descarga ya que la rugosidad relativa y Reynolds cambian.

El valor de F también es posible encontrarlo utilizando el Diagrama de MOODY Partimos del dato de la Rugosidad Relativa que tenemos para nuestro ejemplo

$$\frac{\epsilon}{D} = 0,0000343 \Rightarrow (\text{adimensional})$$

Este valor lo buscamos en el Diagrama de MOODY en el lado de la derecha. Ver figura 1.5.

Diagrama de MOODY para encontrar gráficamente el valor del coeficiente de fricción F

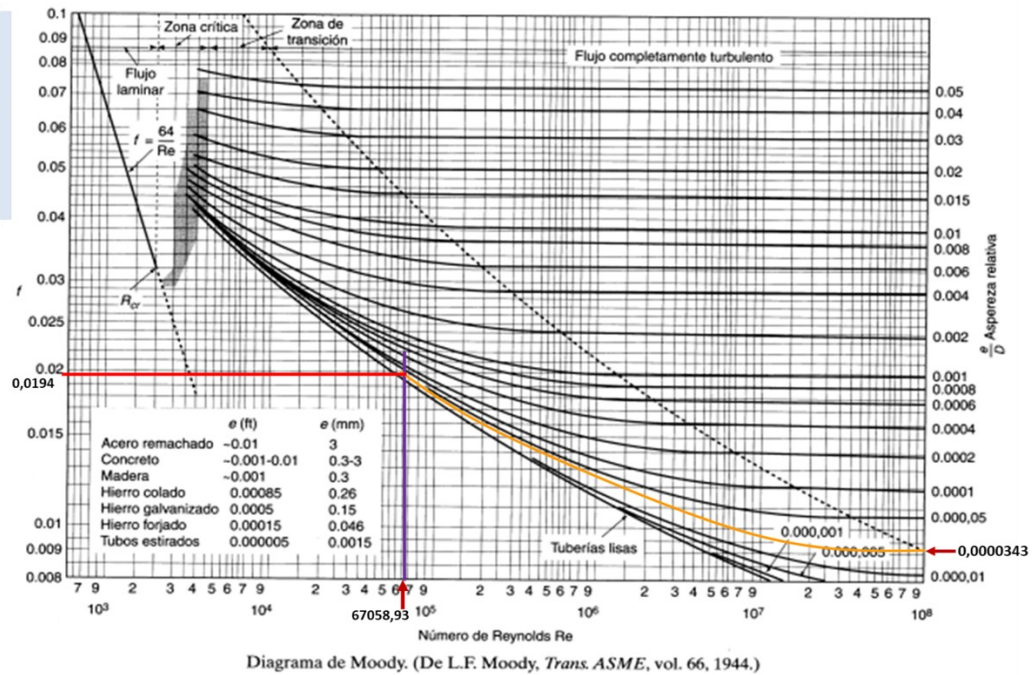


Figura 1.5. Uso del diagrama de MOODY en el desarrollo del ejercicio.

El valor que leemos para F en el Diagrama de MOODY nos muestra:
 $F = 0,0194$; Valor muy similar al encontrado en la fórmula.
 Encontraremos ahora los coeficientes K de accesorios y válvula.
 En el proyecto se diseñaron dos codos del mismo diámetro y material de la tubería y una válvula de globo.
 Los codos tienen la constante K_c y se obtienen de la siguiente tabla:
 $K_c = 0,90$
 La válvula de globo tiene la constante K_v y se obtiene también en la misma tabla:
 $K_v = 10$

Valores de los coeficientes Kc de los codos y Kv de la válvula de globo.

Pieza, conexión o dispositivo	K _v
Rejilla de entrada	0.80
Válvula de pie	3.00
Entrada cuadrada	0.50
Entrada abocinada	0.10
Entrada de borda o reentrada	1.00
Ampliación gradual	0.30
Ampliación brusca	0.20
Reducción gradual	0.25
Reducción brusca	0.35
Codo corto de 90°	0.90
Codo corto de 45°	0.40
Codo largo de 90°	0.40
Codo largo de 45°	0.20
Codo largo de 22° 30'	0.10
Tee con flujo en línea recta	0.10
Tee con flujo en ángulo	1.50
Tee con salida bilateral	1.80
Válvula de compuerta abierta	5.00
Válvula de ángulo abierta	5.00
Válvula de globo abierta	10.0
Válvula alfallera	2.00
Válvula de retención	2.50
Boquillas	2.75
Controlador de gasto	2.50
Medidor Venturi	2.50
Confluencia	0.40
Bifurcación	0.10
Pequeña derivación	0.03
Válvula de mariposa abierta	0.24

El listado de las pérdidas primarias y las pérdidas secundarias es entonces el siguiente:

Pérdidas primarias (m)	
$(v_3)^2 / (2 * g) =$	0,12
F =	0,02
L =	38,00
D =	0,04368
Total Pérdidas Primarias =	2,08

Pérdidas secundarias (m)	
$(v_3)^2 / (2 * g) =$	0,12
Codo 1 =	0,11
Codo 2 =	0,11
Válvula de Globo =	1,22
Total Pérdidas secundarias =	1,44

La cabeza de presión desde el punto ① hasta el punto ③ es : 3,52 m

Pérdidas Totales hf _{1 → 3} (m)	
Total Pérdidas Primarias =	2,08
Total Pérdidas secundarias =	1,44
hf _{1 → 3} =	3,52

Volviendo a la ecuación de Bernoulli, la cual es la ecuación principal para hallar la cabeza neta de la bomba, tenemos:

$$\Rightarrow h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + h_{f_{1 \rightarrow 3}}$$

Cabeza neta de la bomba h_b (m)	
$h_3 =$	29,00
$(v_3)^2 / (2 * g) =$	0,12
$h_{f_{1 \Rightarrow 3}} =$	3,52
Cabeza neta de la bomba h_b (m) =	32,64

$\Rightarrow h_B = 32,64 \text{ m}$ Esta es la cabeza debe superar la bomba incluyendo alturas, perdidas, succión, descarga, flujo turbulento, etc.

Y finalmente volvemos a la ecuación principal en donde estamos buscando la potencia de la bomba que es capaz de llevar el agua desde el punto ① hasta el punto ③:

$$\text{Pot bomba (hp)} = \frac{Q * \rho * g * h_b}{746 * \text{Eff}_b}$$

Pot bomba (hp)		
$Q =$	0,002317	m^3 / seg
$\rho =$	998,00	kg / m^3
$g =$	9,80	m / s^2
$h_b =$	32,64	m
$\text{Eff}_b =$	75%	%
Pot bomba (hp) =	1,32	hp

$\Rightarrow \text{Pot bomba (hp)} = 1,32 \text{ hp}$ Este es el dato que se requiere de la potencia de la bomba para llevar el agua desde el reservorio hasta el tanque en la planta superior.

Y con este dato de la potencia encontrada para la bomba centrífuga para llevar agua desde el punto ① hasta el punto ③ podemos seleccionar una bomba adecuada a las condiciones buscando cumplir todos los requerimientos fuera del de la potencia.

Hoy en día el tipo bomba centrífuga más común y a la mano es la que llamamos Bomba Eléctrica, la cual está impulsada por un motor eléctrico, el cual por lo general es un motor de los del tipo Asíncrono.

Estos motores asíncronos pueden ser monofásicos o trifásicos. Estudiaremos acá el motor asíncrono más general, el trifásico.

Para efectos del ejercicio procederemos a seleccionar la bomba centrífuga con motor eléctrico asíncrono trifásico de un proveedor del mercado local:

Datos requeridos:

- Q
- hb
- Frecuencia de la red trifásica
- Tensión de la red trifásica
- Potencia bomba.
- Utilización.

Caudal =	139	litros / min
	2,31667	litros / s
	0,00232	m ³ / s
	0,13900	m ³ / min
	8,34	m ³ / hora
	36,72	gl / min
hb =	32,64	m
Frecuencia de la red trifásica =	60,00	Hz
Tensión de la red trifásica	220 / 440	VAC
Potencia bomba =	1,32	HP
Utilización.	Industrial	

Seleccionamos la siguiente Marca: PEDROLLO.

Selección de una bomba. Ver figuras 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9.

Cruzando las líneas nos da una bomba referencia:

Frecuencia eléctrica: 60 HZ

Velocidad angular en el eje del equipo (RPM): 3450



Bombas Pedrollo

Figura 1.6. Bomba hidráulica centrífuga.

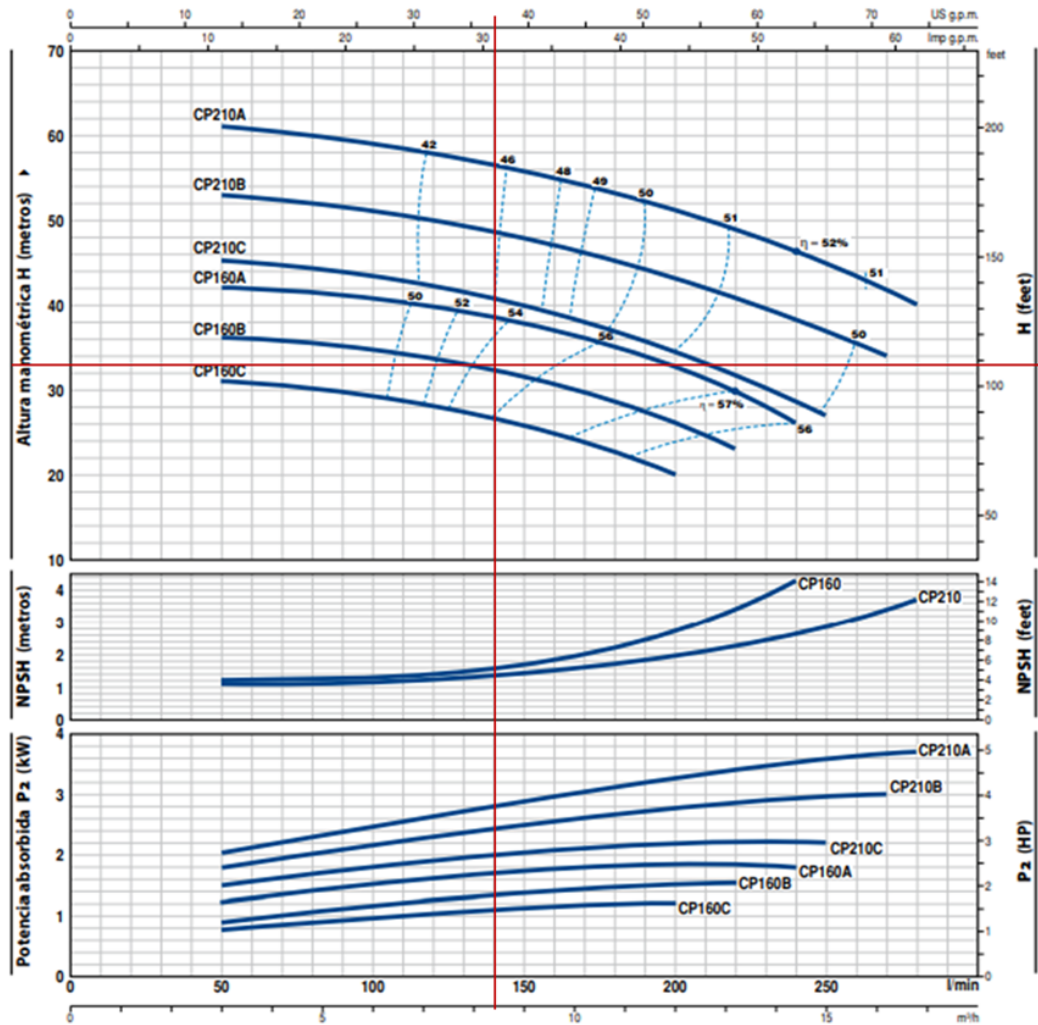


Figura 1.7. Curvas hidráulicas de una gama de bombas centrífugas para selección de la bomba específica del ejercicio.

Marca : PEDROLLO
60 HZ
RPM : 3450

3 HP (2,2KW)
TRIFÁSICA
EFICIENCIA IE3

- Agua limpia
- Utilizo civil
- Utilizo agrícola
- Utilizo industrial

MODELO		POTENCIA (P ₂)		IE	Q	Q															
Monofásica	Trifásica	kW	HP			0	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.2	14.4	15	16.2	16.8			
					l/min	0	50	75	100	125	150	175	200	220	240	250	270	280			
CPm 160C	CP 160C	1.1	1.5	IE2		32	31	30.5	29.5	28	26	23	20								
CPm 160B	CP 160B	1.5	2			37	36	35.5	34.5	33.5	31.5	29	26.5	23							
-	CP 160A	2.2	3			43	42	41.5	40.5	39.5	38	35.5	33	30	26						
CPm 210C	CP 210C	2.2	3	IE3		46	45.5	44.5	43.5	42	40	37.5	34.5	32	28.5	27					
-	CP 210B	3	4			54	53	52	51	49.5	48	45.5	43	40	38.5	37	34				
-	CP 210A	4	5.5			61	61	60	59	57.5	56	53.5	51	49	46.5	45	42	40			

Figura 1.8. Selección de la bomba específica sacada de la gama de bombas de los modelos Pedrollo.

Corrientes y niveles de tensión				
MODELO	TENSION			
Trifásica	220 V	380 V	220 V	440 V
CP 160C	6.1 A	3.5 A	5.5 A	3.0 A
CP 160B	6.9 A	4.0 A	6.9 A	3.7 A
CP 160A	9.5 A	5.5 A	9.2 A	4.9 A
CP 210C	9.0 A	5.1 A	8.6 A	4.8 A
CP 210B	13.0 A	7.5 A	11.5 A	6.0 A
CP 210A	18.2 A	10.5 A	16.0 A	9.0 A

Figura 1.9. Datos eléctricos de la bomba seleccionada.

Con este ejercicio anterior observamos que el motor eléctrico seleccionado es un motor de *inducción* trifásico, o también llamado un motor asíncrono trifásico. El término *inducción* se refiere a que el trabajo de este equipo basa su funcionamiento en la forma de intercambio de energía entre el estator y el rotor, el cual se hace mediante el fenómeno de la inducción electromagnética. El voltaje en el rotor, *se induce* en los devanados del rotor en lugar de estar físicamente conectados por cables. El motor de inducción tiene cierta similitud con un transformador, el cual produce voltaje en su devanado secundario al recibir voltaje en su devanado primario. Cuando el estator se conecta a una fuente de potencia, el *campo* magnético rotatorio induce un voltaje secundario en el rotor, produciendo a su vez un campo magnético secundario. Ambos campos interactúan y el rotor gira, pero en este caso hay una ligera diferencia entre la velocidad del campo y la velocidad real del rotor. Por esto también el nombre de Asíncrono. Esta máquina asíncrona es un elemento muy utilizado a nivel global para entregar movimiento rotatorio a cargas estándar como lo puede ser una bomba de trasiego de agua, o una banda transportadora. Estudiaremos entonces la máquina asíncrona en su forma trifásica, observando su comportamiento como motor y como generador. Ver figura 1.10.

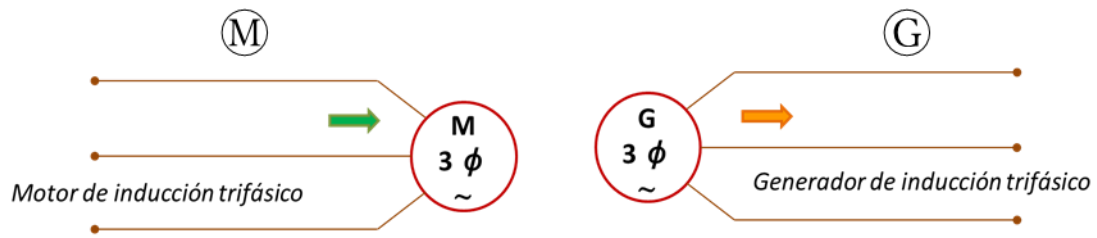


Figura 1.10. Esquemas de la maquina asíncrona como motor, o como generador.

Por el lado motor, la maquina asíncrona trifásica (y también la monofásica) constituye la fuente de fuerza motriz para muchos tipos de carga, dentro de los cuales podemos incluir a los sistemas de bombeo de agua en donde se cuentan las bombas centrífugas. Y antes de comenzar el estudio de la maquina asíncrona, me parece importante mencionar la instalación eléctrica del motor, la cual posee dos componentes básicas: la parte de potencia y la parte de maniobra y control.

De estas dos componentes de la instalación hablaremos en este trabajo en un capítulo más adelante.

Solo cabe mencionar acá que la instalación eléctrica es una componente básica para garantizar el trabajo confiable, oportuno y seguro de los motores y generadores que forman parte de cualquier tipo de instalación hidráulica en general.

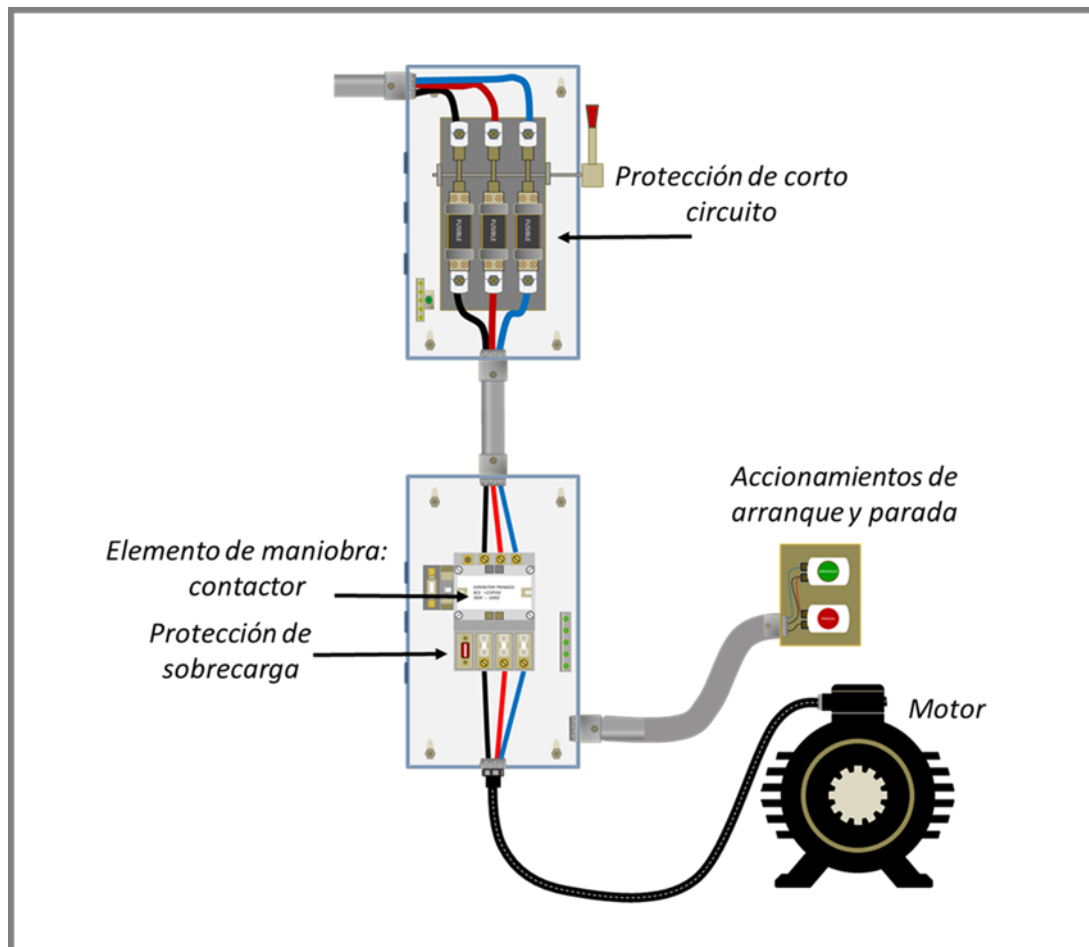


Figura 1.11. Instalación eléctrica del motor

Esta posee una componente de potencia por donde circula la corriente principal que va al motor. Y también posee una componente de control, de baja corriente, por donde se comanda la acción de arranque y parada del motor. (Ver figura 1.11)

Algunas bases teóricas sobre las maquinas asíncronas

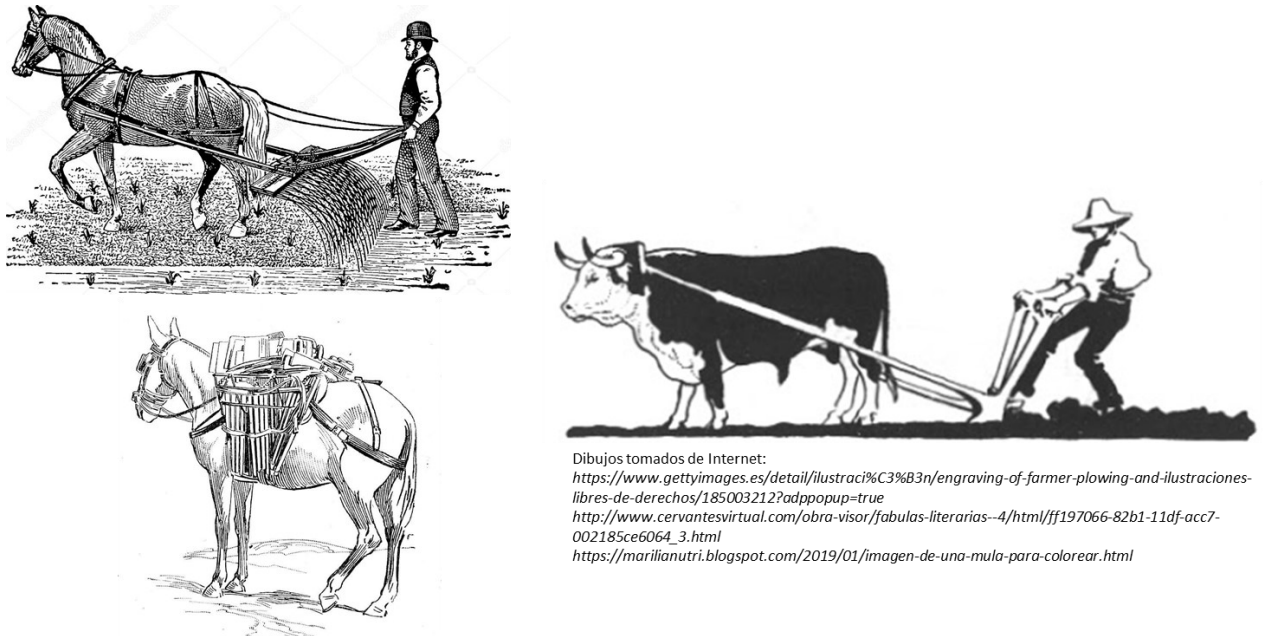


Figura 1.12. Uso de los animales en las tareas que implican consumo de energía.

En la historia del desarrollo de la humanidad se han buscado muchas fuentes de energía para tareas tales como:

- Desplazarse
- Construir vías, viviendas y edificaciones,
- Arar,
- Segar,
- Procesar los alimentos,
- Iluminar,
- Comunicarse,
- Estudiar, etc.

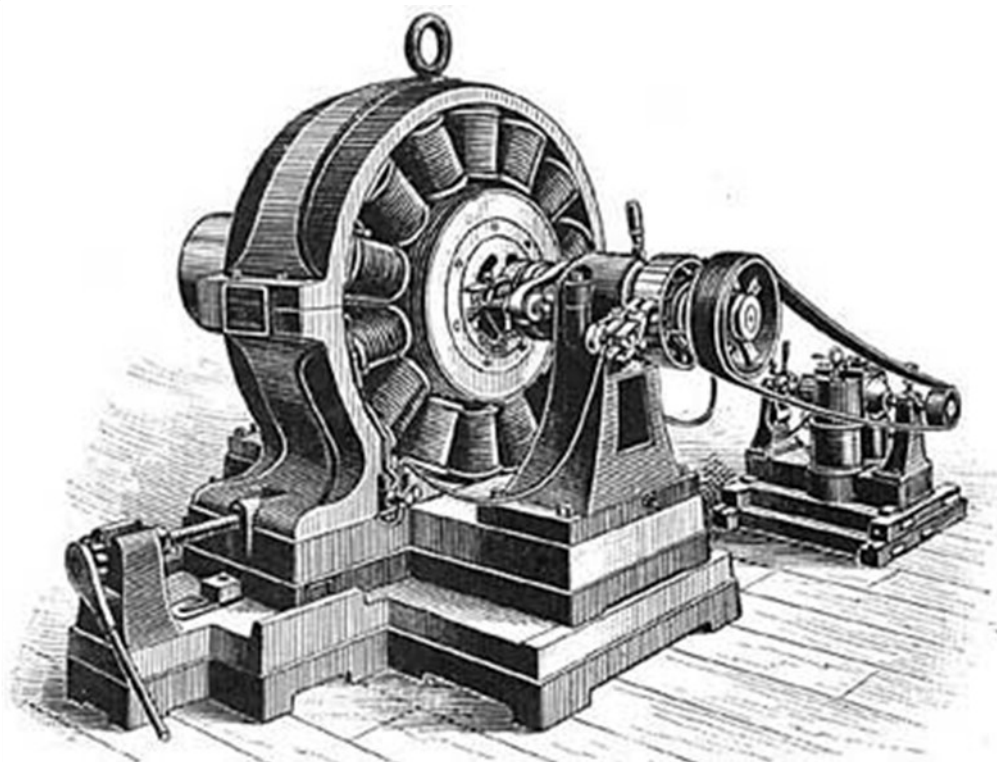
Hombres y animales (ver figura 1.12) fueron las primeras fuentes de energía, incluso la esclavitud fue ampliamente justificada durante milenios con esta finalidad. La leña y el carbón desempeñaron un papel protagónico durante la revolución industrial, con la invención de la máquina de vapor. El desarrollo de la electricidad a finales del siglo

XIX permitió el desarrollo de la industria moderna y requirió la conversión de diversas fuentes de energía en energía eléctrica y viceversa. En la actualidad el desarrollo de la electrónica y en especial de la electrónica de potencia, permite el control efectivo y eficiente de los procesos de conversión de energía eléctrica.

Primer concepto a tener en cuenta: *La energía*. Este es uno de los conceptos más importantes en el estudio de las máquinas eléctricas.

La energía es la capacidad de realizar un trabajo.

La energía se presenta en la naturaleza en diferentes formas. El objetivo de las máquinas eléctricas consiste en convertir la energía de una forma en otra. Ver figura 1.13.



Dibujo tomado de Internet

<http://www.xtec.cat/~cgarci38/ceta/tecnologia/corrialterna09.jpg>

Figura 1.13. Motor experimental de corriente alterna trifásica, construido por Michael Von Dolivo Dobrowolsky (1889).

La conversión electromecánica de energía permite transmitir, consumir, modificar o transformar la energía electromagnética de una forma en otra, pero no es posible almacenarla en grandes cantidades.

La conversión de energía electromecánica es el paso que se da entre energía eléctrica y mecánica o viceversa, el cual ocurre a través de los campos eléctrico y magnético, creado por un dispositivo de conversión.

Podemos tener un motor o un generador según se realice la conversión de energía: (ver figura 1.14)

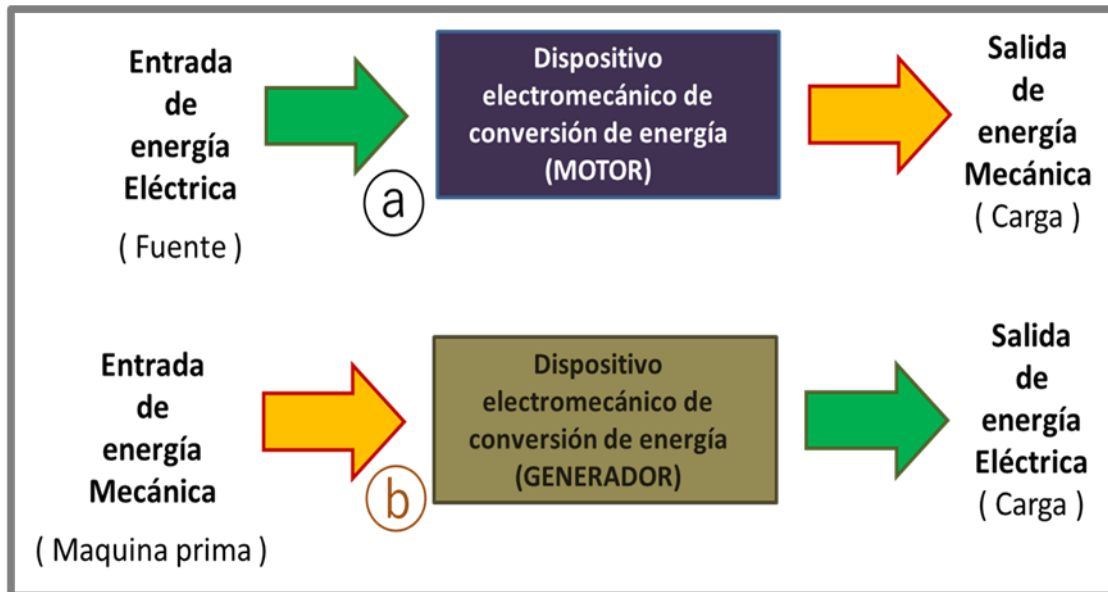


Figura 1.14. Motor o generador según el tipo de conversión de energía.

Un segundo concepto físico importante en los fenómenos de conversión de energía es *La fuerza*.

La fuerza se manifiesta en un sistema físico mediante la presencia de interacciones entre la materia.

Aun cuando parece que las fuerzas pueden ser de muy diferentes formas y tipos, se conocen en la actualidad sólo cuatro fuerzas:

1. Interacciones gravitacionales entre masas (gravitones)
2. Interacciones eléctricas entre las cargas (electrón-protón-fotón)
3. Interacciones nucleares débiles (bosones intermedios)
4. Interacciones nucleares fuertes (protón-neutrón-pion)

Nota: *Pion* hace referencia a la fuerza que mantiene unidos a los protones y a los neutrones en el núcleo del átomo. Se debe a partículas subatómicas tales como quarks y antiquarks.

Es decir, la fuerza que mantiene unidos los nucleones (protones y neutrones) en el interior del núcleo atómico se debe, al intercambio de piones, cuyo efecto es una fuerza atractiva entre nucleones

Si se asocia a las fuerzas nucleares fuertes de cohesión protón-protón por intercambio de piones entre protones y neutrones el valor unitario, las interacciones nucleares débiles de las partículas nucleares con rareza se encuentran en el orden de 10^{-14} . Las fuerzas gravitacionales se encuentran, en la misma base de comparación, en el orden de 10^{-37} . Las fuerzas de atracción y repulsión de cargas eléctricas por intercambio de fotones están en el rango de 10^{-2} .

Y un tercer concepto básico en este estudio es el de *campo*.

La palabra *campo* posee la interpretación geométrica de extensión, superficie o espacio.

Sin embargo, en física el concepto de campo consiste en la descripción del espacio donde se produce algún tipo de fuerza.

El campo gravitatorio es la zona del espacio donde una masa ejerce su influencia atrayendo a otras masas. Ver figura 1.15.

El campo eléctrico se define exactamente igual, pero considerando las interacciones entre las cargas eléctricas. Ver figura 1.16.

El campo magnético se define a través de las fuerzas entre dipolos magnéticos. Ver figura 1.17.

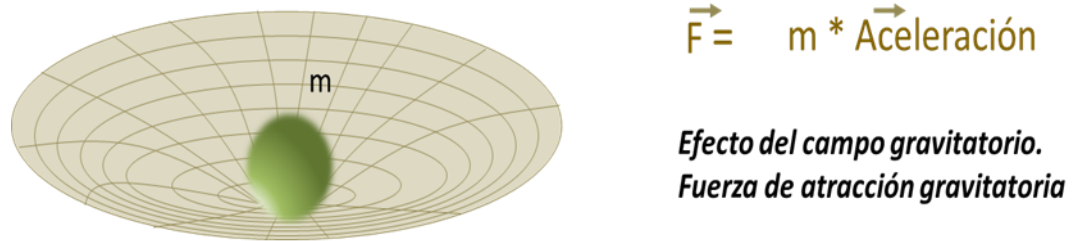


Figura 1.15. Efecto del campo gravitatorio

El campo gravitatorio es el cociente entre la fuerza y la masa. En otras palabras, la aceleración de gravedad en cada punto determina el valor de la intensidad del campo gravitatorio.

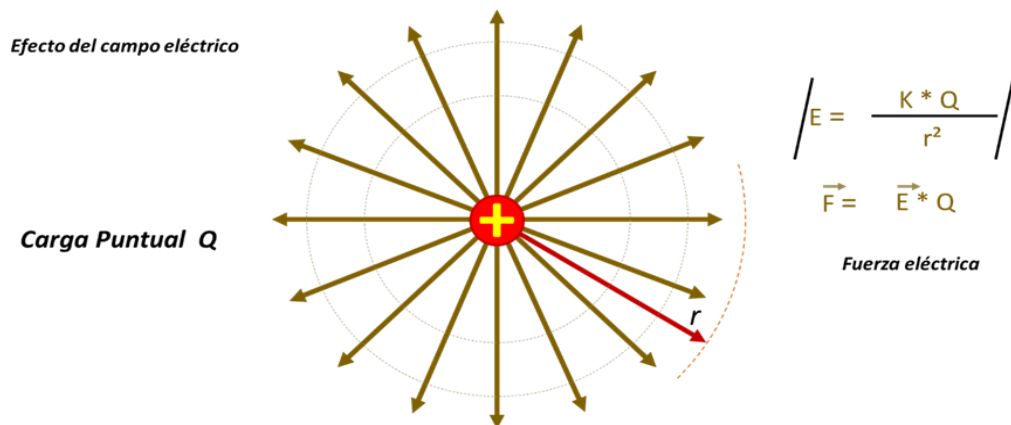


Figura 1.16. Efecto del campo eléctrico

El campo eléctrico es el cociente entre la fuerza eléctrica sobre una partícula cargada, y el valor de la carga de esa partícula $E = F / q$.

El campo eléctrico está dirigido radialmente hacia fuera de una carga puntual en todas las direcciones. Los círculos representan superficies equipotenciales esféricas.

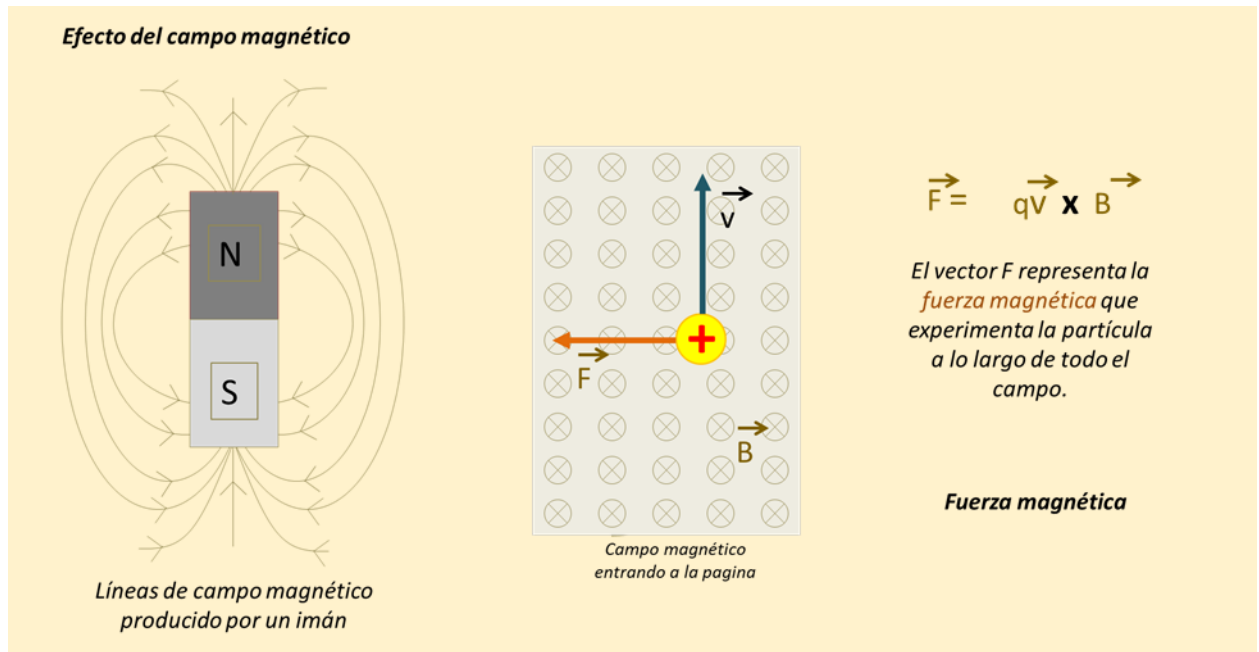


Figura 1.17. Efecto del campo magnético

Para nuestro caso hay un equilibrio de fuerzas, claramente planteado, entre los campos magnético y eléctrico, y lo observamos en la siguiente relación matemática.

La medición de un campo se realiza colocando en un punto del espacio una partícula de prueba (masa, carga o dipolo magnético) y se mide la fuerza ejercida sobre ella.

$$\vec{F} = q (\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}))$$

Donde:

\vec{F} es el vector de la fuerza resultante sobre la partícula cargada

q es la carga eléctrica de la partícula

\vec{E} es el vector intensidad del campo eléctrico

\vec{v} es el vector velocidad

\vec{B} es el vector densidad de campo magnético

En la ecuación anterior todas las cantidades vectoriales deben estar referidas a un sistema de referencia único.

Además, el campo eléctrico E y el campo magnético B deben ser producidos externamente a la carga q .

Para que ocurra una interacción electromagnética sobre la carga q es necesaria la existencia de otras cargas. La siguiente figura 1.18 ilustra esta idea.

En el punto que ocupa la carga q , el campo eléctrico E_1 se debe a las otras cargas presentes en el sistema y no a sí misma. En estas condiciones existe una interacción

eléctrica entre la carga puntual q y el campo eléctrico E_1 producido por las cargas distribuidas en las dos placas.

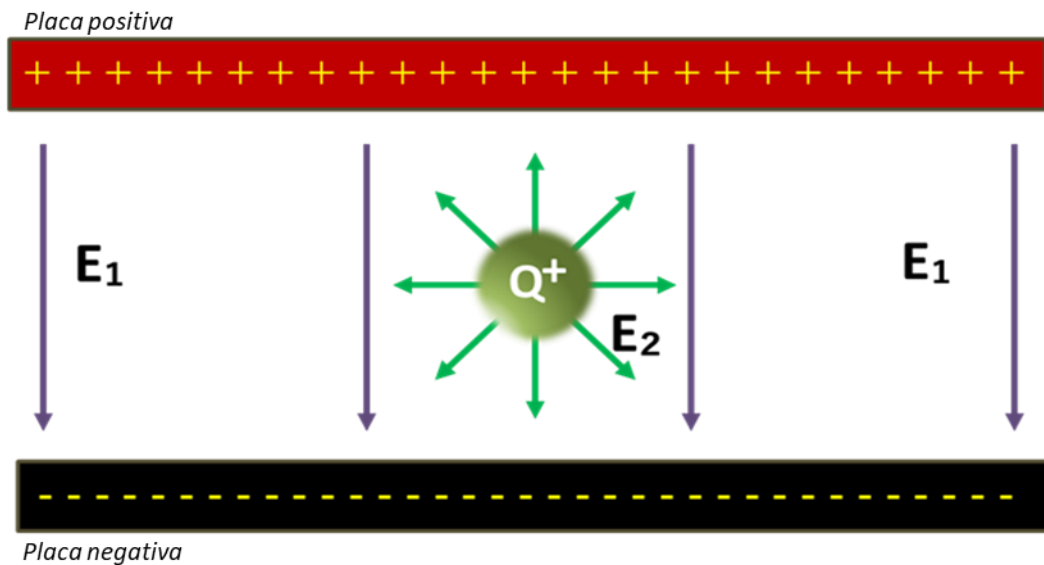


Figura 1.18. La carga eléctrica en un campo eléctrico.

En un convertidor electromagnético de energía es necesario analizar el mecanismo de creación de los campos eléctrico (\mathbf{E}) y magnético (\mathbf{B}). Para esto se observarán las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de contorno impuestas por el equipo. Para determinar la solución del campo electromagnético, se parte de los siguientes enunciados:

1. Las partículas eléctricas q se desplazan en campos eléctricos \mathbf{E} y magnéticos \mathbf{B} .
2. Estos campos son producidos externamente a las cargas, por otras partículas cargadas. Con estos enunciados, las leyes de Maxwell, expresadas en su forma diferencial para un punto cualquiera del espacio, son:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

El rotacional del campo eléctrico es la derivada de la inducción magnética con respecto al tiempo.

Lo anterior se interpreta como sigue:

Si existe una variación de campo magnético \mathbf{B} , entonces este campo provoca un campo eléctrico \mathbf{E} o bien la existencia de un campo magnético no estacionario en el espacio libre provoca circulaciones del vector \mathbf{E} a lo largo de líneas cerradas.

En presencia de cargas libres, como los electrones, el campo \mathbf{E} puede desplazar las cargas y producir una corriente eléctrica.

La ecuación anterior relaciona los campos eléctrico y magnético, y tiene aplicaciones de gran utilidad tales como los motores eléctricos y los generadores eléctricos y explica adecuadamente su funcionamiento.

Más precisamente, la ecuación demuestra que un voltaje puede ser generado variando el flujo magnético que atraviesa una superficie dada.

Ley circuital de Ampere

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Esta ley aplica para medios materiales.

Donde:

\vec{H} es el vector Intensidad de Campo Magnético.

\vec{D} es el vector campo de desplazamiento del campo eléctrico

\vec{J} es el vector densidad de corriente eléctrica.

La ley Ampere explica que la circulación de la intensidad del campo magnético en un conjunto cerrado es proporcional a la corriente que recorre ese contorno.

El campo magnético es un campo angular con forma circular, cuyas líneas encierran la corriente. La dirección del campo en un punto es tangencial al círculo que encierra la corriente.

Ley de Gauss para el campo Eléctrico

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Donde:

\vec{E} es el vector Intensidad de Campo Magnético.

ρ es la densidad de carga en el medio interior a la superficie cerrada

ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el vacío.

Esta es la forma diferencial de la ley de Gauss. La Divergencia del campo eléctrico es proporcional a la densidad de carga eléctrica.

Esto significa que el campo E diverge o sale desde una carga ρ / ϵ_0 , lo que se representa gráficamente como vectores que salen de la fuente que las genera en todas direcciones.

Por convención si el valor de la expresión es positivo, entonces los vectores salen \odot , si es negativo estos entran a la carga \otimes .

Y las relaciones constitutivas debidas al material son las siguientes:

$$/ B / = \mu * / H /$$

Donde:

μ es la permeabilidad magnética del material.

En Física se le denomina *permeabilidad magnética* a la capacidad que tienen los materiales, medios o sustancias que afectan y son afectadas por los campos magnéticos, así como la capacidad de convertirse en fuentes de estos, es decir la capacidad para créalos sin la necesidad de corrientes externas.

La permeabilidad magnética μ es un parámetro constante que depende del medio. La permeabilidad del medio puede definirse como la medida de la capacidad de éste para establecer líneas de flujo magnético, es decir, cuanto más grande sea la permeabilidad del medio, mayor será el número de líneas de flujo por unidad de área. Ver figura 1.19.

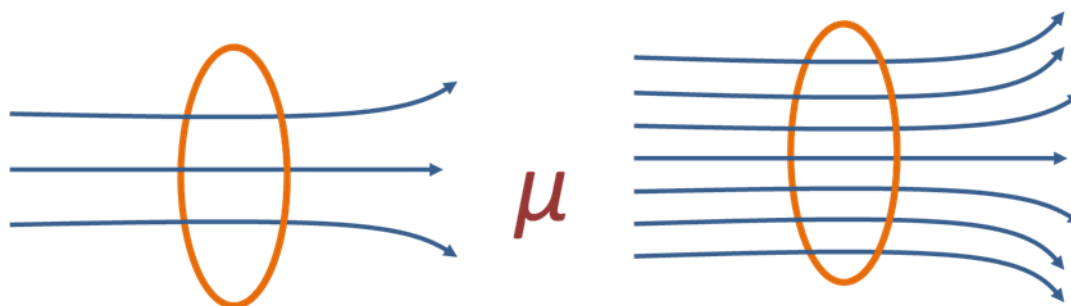


Figura 1.19. Permeabilidad magnética del material. Habilidad de este para establecer líneas de flujo magnético

La permeabilidad magnética para el aire o el vacío la denotamos como μ_0 , y su valor en el Sistema Internacional de unidades es el siguiente:

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ (Tesla * m / amperio)}$$

Dependiendo de cómo reacciona el material ante una excitación externa H , los materiales se clasifican en diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos. Ver figura 1.20.

Todos los materiales están formados por átomos que tienen propiedades diferentes y, por lo tanto, reaccionan de manera diferente a un campo magnético externo.

En principio, existen dos posibilidades: los imanes elementales del material se pueden alinear en paralelo al campo exterior o en dirección opuesta.

Los materiales denominados *diamagnéticos* se caracterizan por ser repelidos por los imanes (es lo opuesto a los materiales ferromagnéticos, que son atraídos por los imanes).

El fenómeno del diamagnetismo fue descubierto en septiembre de 1845 por el físico y químico Michael Faraday cuando observó que un trozo de bismuto era repelido por un imán, cualquiera que fuese el polo. Esa experiencia indicaba que el campo externo generado por el imán inducía en el bismuto un dipolo magnético de sentido opuesto. Al aplicarle un campo magnético externo B_0 , los momentos de las moléculas o átomos de los materiales diamagnéticos se orientan originando un campo B_m que se opone a dicho campo externo.

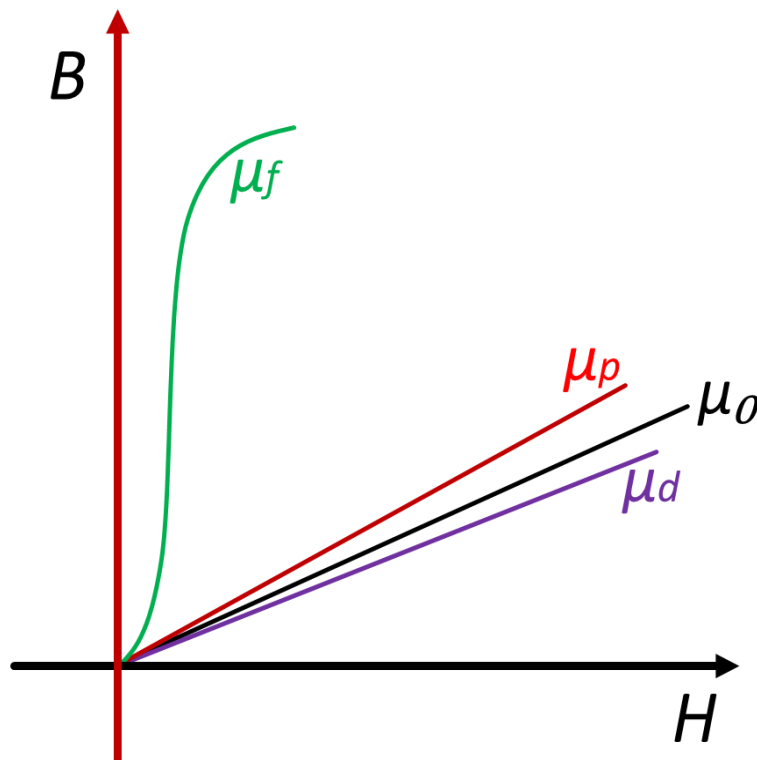


Figura 1.20. Grafica comparativa entre las diferentes permeabilidades magnéticas relativas

Esta oposición de campos hace que en el interior del material el campo resultante B sea un campo menor al campo B_m que se origina en el interior del material por la orientación de los momentos de sus moléculas.

Al ser estos campos opuestos, ambos se repelen, tal como se muestra en la siguiente figura 1.21.

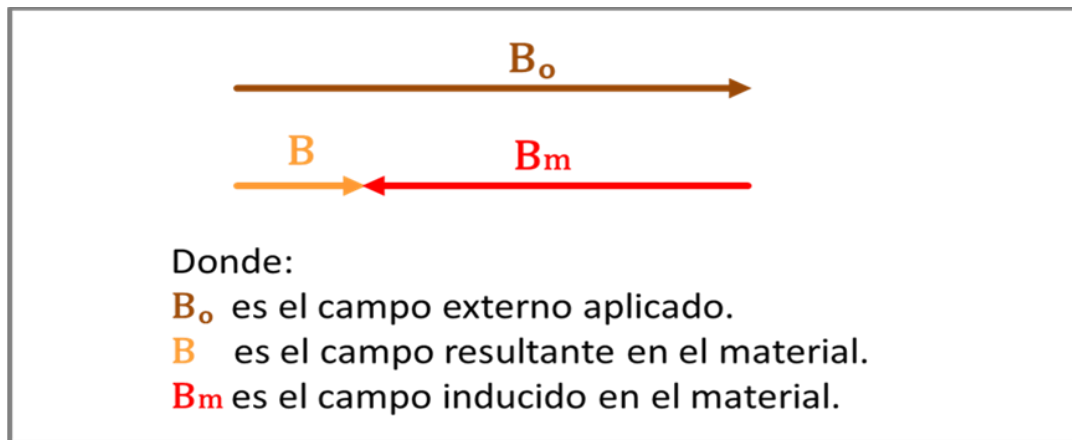


Figura 1.21 Materiales diamagnéticos - Respuesta al campo magnético aplicado.

Otra característica de estos materiales es que todos los polos magnéticos se repelen, dado que si cambiamos la orientación del campo B_o de la Figura 1.21, el campo inducido en el material B_m también cambiará a una nueva orientación de forma que se oponga al campo B_o .

Uno de los fenómenos más curiosos que presentan los materiales diamagnéticos es la levitación diamagnética.

Como se aprecia en la siguiente figura, un pedazo de *grafito pirolítico*, que tiene un diamagnetismo especialmente alto, levita sobre un gran imán de neodimio permanente.

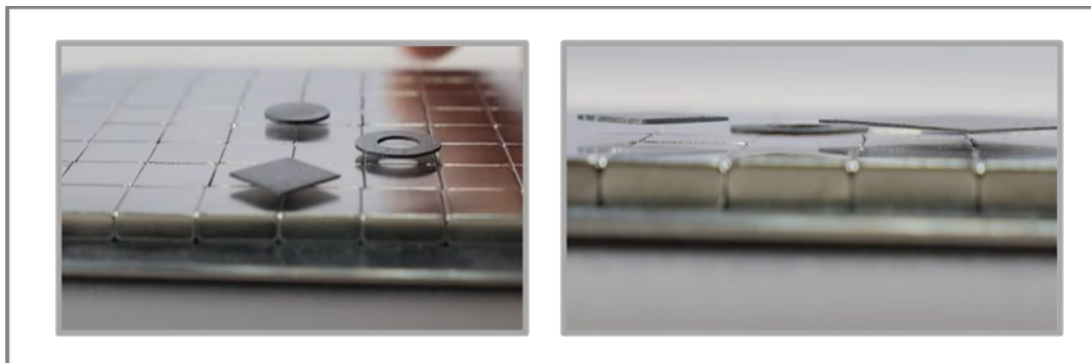


Gráfico tomado de internet <https://www.youtube.com/watch?v=vXAQivex6nM>

Figura 1.22 Materiales diamagnéticos – Grafito pirolítico.

Los materiales paramagnéticos son aquellos cuya suma neta de los momentos magnéticos permanentes de sus átomos o moléculas es nula (Ver figura 1.23). Estos materiales tienen un comportamiento magnético muy débil.

Si se aplica un campo magnético exterior lo suficientemente elevado, los momentos magnéticos de los materiales paramagnéticos se tienden a ordenar de forma paralela al mismo (Ver figura 1.24).

Por lo tanto, los dipolos se orientan en la misma dirección y sentido que el campo aplicado, por lo que la susceptibilidad magnética, aunque débil, es positiva, y la permeabilidad relativa es ligeramente mayor que la unidad.

Otra característica que la diferencia de los materiales ferromagnéticos es el hecho de que cuando se elimina el campo externo aplicado el efecto del paramagnetismo desaparece.

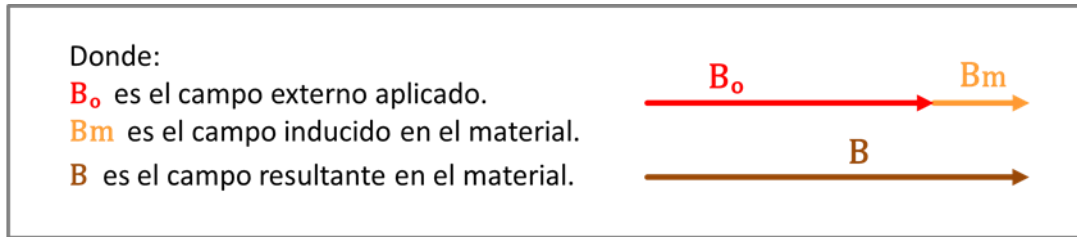


Figura 1.23 Materiales paramagnéticos - Respuesta al campo magnético aplicado.

En la práctica, cuando se realizan cálculos en los que intervienen materiales paramagnéticos, debido a su escasa respuesta, se suelen considerar como si se tratase del vacío, es decir, $\mu = \mu_o$.

Especialmente paramagnéticos son los metales de transición (excluyendo los ferromagnéticos Fe, Ni y Co) y las tierras raras con átomos que tienen electrones desapareados.

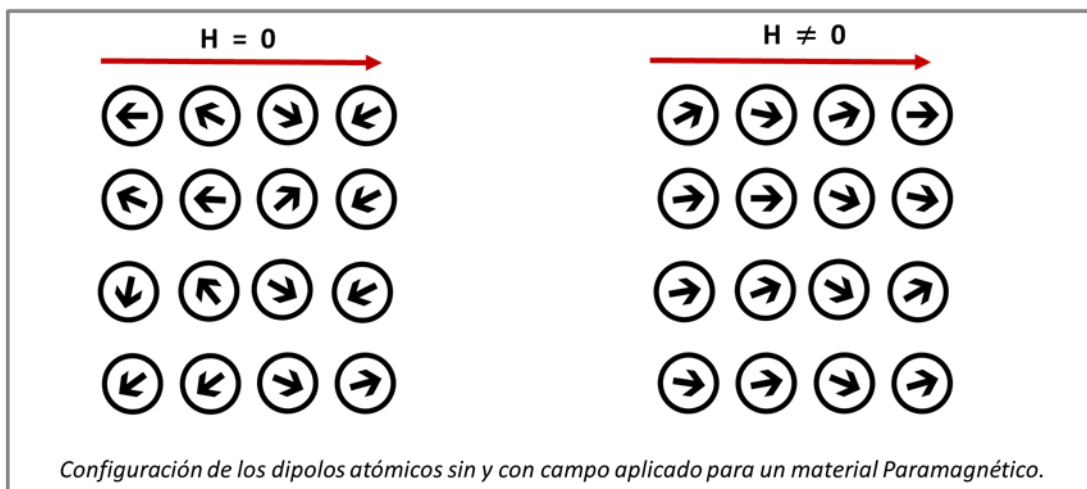


Figura 1.24 Materiales paramagnéticos – Orientación de los dipolos.

Los materiales ferromagnéticos, compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes y se utilizan para el diseño y constitución de núcleos de los transformadores y máquinas eléctricas.

En un transformador se usan para maximizar el acoplamiento entre los devanados, así como para disminuir la corriente de excitación necesaria para la operación del transformador.

En las máquinas eléctricas se usan los materiales ferromagnéticos para dar forma a los campos, de modo que se logren hacer máximas las características de producción de par. Estos materiales han evolucionado mucho con el paso del tiempo lo que implica más eficiencia, reducción de volúmenes y costo, en el diseño de transformadores y máquinas eléctricas.

Propiedades de los materiales *ferromagnéticos*.

- Aparece una gran inducción magnética al aplicarle un campo magnético.
- Permiten concentrar con facilidad líneas de campo magnético, acumulando densidad de flujo magnético elevado.
- Se utilizan para delimitar y dirigir a los campos magnéticos en trayectorias bien definidas.
- Permite que las maquinas eléctricas tengan volúmenes razonables y costos menos excesivos.

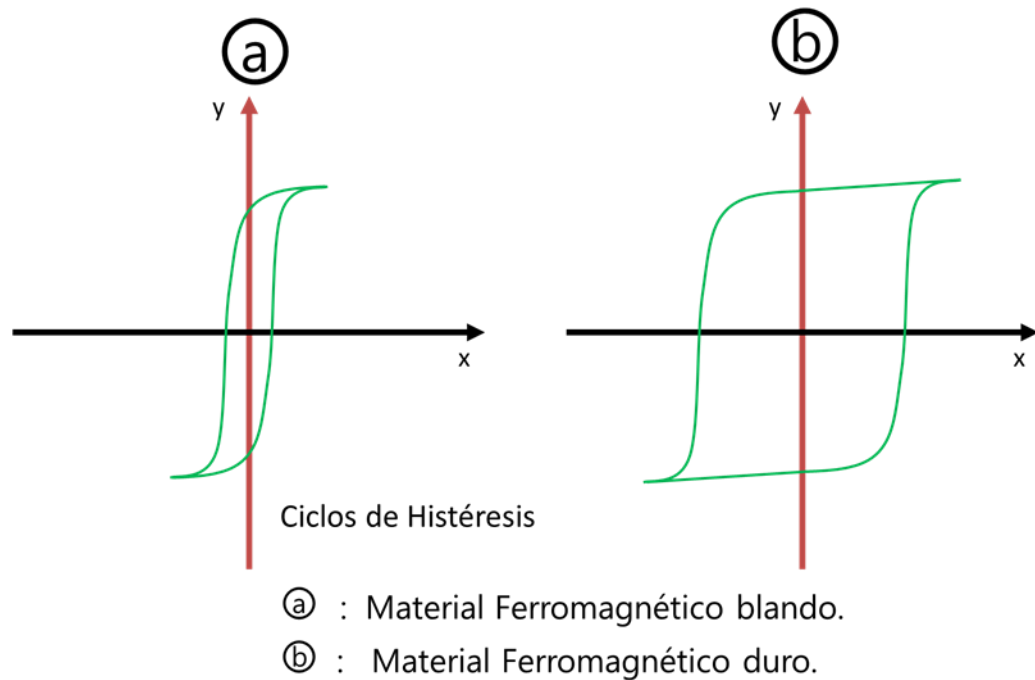


Figura 1.25 Materiales ferromagnéticos – Ciclos de histéresis para materiales blandos y duros.

$$\vec{D} = \epsilon * \vec{E}$$

Donde:

\vec{E} es el vector Intensidad de Campo Magnético.

\vec{D} es el vector campo de desplazamiento eléctrico.

ϵ es la permitividad eléctrica del material.

El campo de desplazamiento eléctrico es un vector $D(r, t)$ función de la posición r en el espacio y del tiempo t . O también $D(r, \omega)$ función de la posición r en el espacio y de la frecuencia ω que aparece en las ecuaciones de Maxwell.

Puede considerarse como una generalización del campo eléctrico en presencia de un dieléctrico.

En cada punto de un campo eléctrico de valor E existe un vector desplazamiento D cuyo valor es el del campo eléctrico multiplicado por la constante dieléctrica o permitividad del medio ϵ , de modo análogo a como en un campo magnético de excitación H existe un vector B cuyo valor es el de H multiplicado por la permeabilidad μ .

En la gran mayoría de los materiales la magnitud D puede ser calculado como:

$$D = \epsilon * E$$

Siendo:

ϵ es la permitividad eléctrica del material, que en un medio lineal, no isótropo, es un tensor de segundo orden (es una matriz)

En el vacío $\epsilon = \epsilon_0$

$$\vec{D}(r, \omega) = \vec{\epsilon}(r, \omega) * \vec{E}(r, \omega)$$

En la gran mayoría de los materiales la magnitud D puede ser calculado como:

La Permitividad Relativa

Entendido como constante dieléctrica, es el término usado para expresar la permitividad relativa y corresponde a la medida del efecto que un material dieléctrico tiene sobre la capacitancia entre dos conductores embebidos o rodeados por él, comparado con el vacío (Ver figura 1.26).

La constante dieléctrica o permitividad representa la cantidad de energía electrostática que puede ser almacenada por unidad de volumen y por unidad de gradiente de potencial. Tomando como referencia ϵ_0 para la permitividad del vacío y ϵ como la permitividad del dieléctrico, matemáticamente podemos expresar la constante dieléctrica como la siguiente relación:

$$Dk = \epsilon / \epsilon_0$$

o también, si tomamos C como la capacitancia entre dos placas en el vacío y C' como la capacitancia con el dieléctrico, entonces también es igual a

$$Dk = C' / C$$

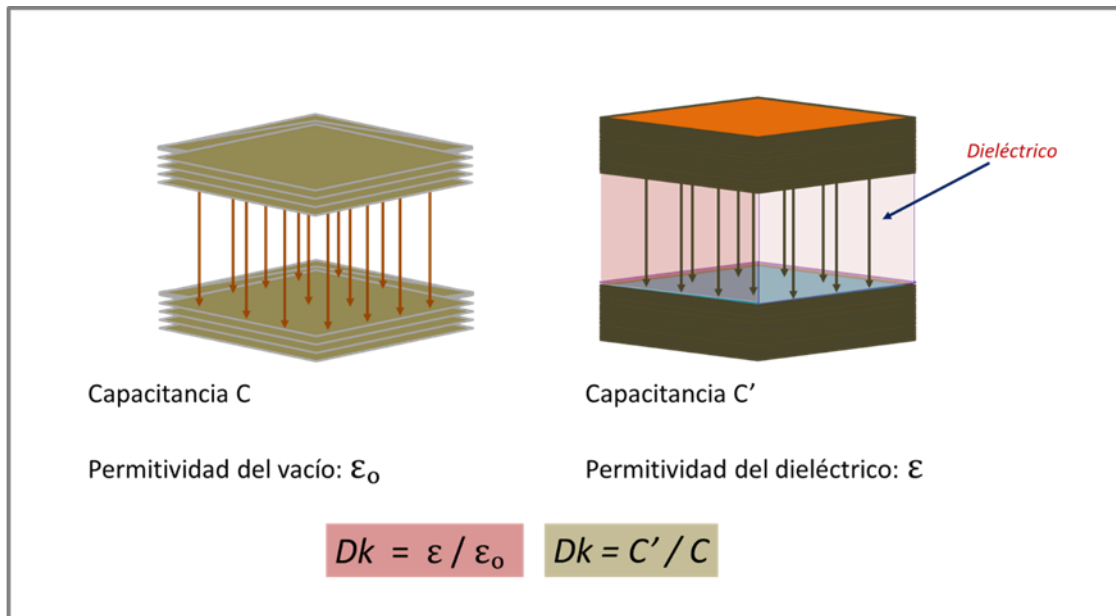


Figura 1.26 Permitividad eléctrica: En el vacío y con un material dieléctrico.

En electromagnetismo, la permitividad absoluta es la medida de la resistencia que es encontrada cuando se forma un campo eléctrico en un medio.

En otras palabras, la permitividad es una medida de cómo un campo eléctrico afecta, y es afectado por, un medio dieléctrico.

La permitividad de un medio describe que tanto campo eléctrico (más correctamente, flujo) es generado por carga unitaria en ese medio (Ver la siguiente figura 1.27).

Entonces tenemos que más flujo eléctrico existe en un medio cuando que tiene una permitividad baja (por unidad de carga) debido a los efectos de polarización.

La permitividad está directamente relacionada a la susceptibilidad eléctrica, la cual es una medida de qué tan fácil un dieléctrico se polariza en respuesta a un campo eléctrico.

De esta manera, la permitividad se relaciona a la habilidad de un material para resistir a un campo eléctrico.

Como ya mencionamos *la permitividad relativa* de un material dieléctrico es su permitividad dieléctrica expresada como una razón relativa a la permitividad del vacío:

$$\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m.}$$

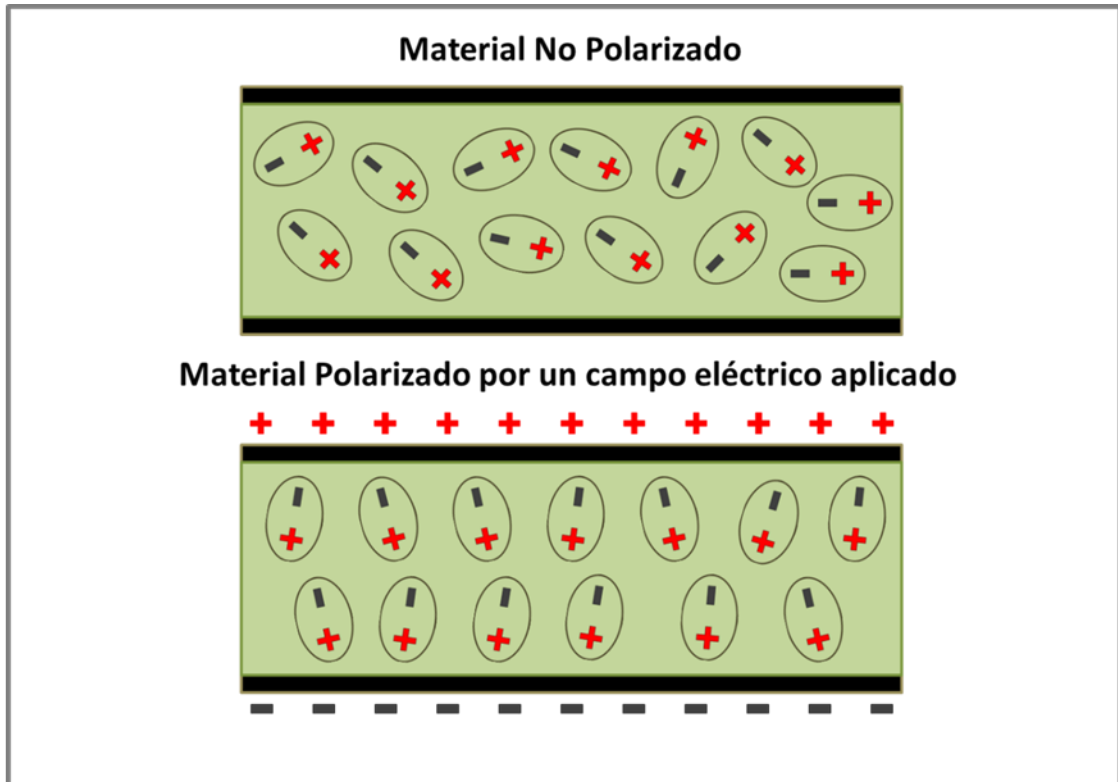


Figura 1.27. Concepto de Permitividad dieléctrica de un material.

Trabajemos ahora con la expresión generalizada de la ley de OHM.

La ley de OHM es una ley básica de los circuitos eléctricos. Esta ley establece que la diferencia de potencial V que aplicamos entre los extremos de un conductor determinado, es proporcional a la intensidad de la corriente I que circula por el citado conductor.

OHM completó la ley introduciendo el término de *Resistencia eléctrica*; que es el factor de proporcionalidad que aparece en la relación de V e I . (Ver foto de Georg Simon Ohm en figura 1.28).

$V = R * I$ Esta es la fórmula central de la ley de OHM.

En Física, el término Ley de OHM se usa para referirse a varias generalizaciones de la ley originalmente formulada por OHM.

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E}$$

Donde:

\vec{E} es el vector Intensidad de Campo Magnético en la localización.

\vec{J} es el vector densidad de corriente. Es una localización en el material resistivo.

σ es la conductividad del material. Parámetro que depende del material.



Georg Simon Ohm

Erlangen, Baviera; 16 de marzo de 1789-Múnich, 6 de julio de 1854. Físico y matemático alemán que aportó a la teoría de la electricidad la ley de Ohm. Conocido principalmente por su investigación sobre las corrientes eléctricas, estudió la relación que existe entre la intensidad de una corriente eléctrica, su fuerza electromotriz y la resistencia, formulando en 1827 la ley que lleva su nombre que establece que

$$I = V/R.$$

Tomado de Internet.
https://es.wikipedia.org/wiki/Georg_Simon_Ohm

Figura 1.28. Georg Simon Ohm.

La conductividad eléctrica (símbolo σ) es la medida de la capacidad de un material o sustancia para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él.

La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material.

Los metales son buenos conductores porque tienen una estructura con muchos electrones con vínculos débiles, y esto permite su movimiento.

La conductividad también depende de otros factores físicos del propio material, y de la temperatura. Ver figura 1.29.

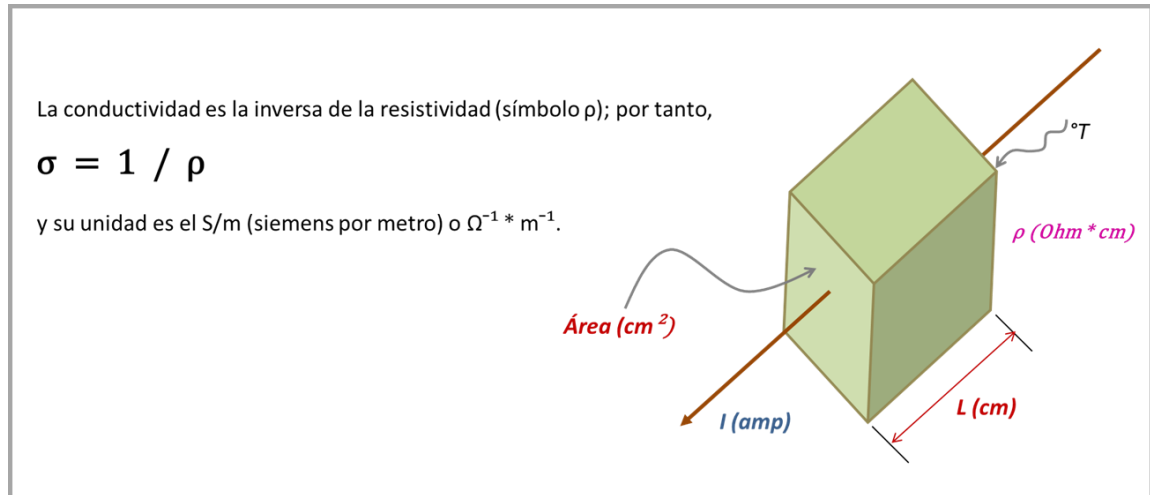


Figura 1.29. Dependencia de la Conductividad de factores físicos propios del material y de la temperatura.

Entonces tenemos que:

μ, ϵ, σ

Son tensores que dependen del tipo de material y de la orientación.

Para los casos más simples, tales como las aplicaciones de las maquinas asíncronas, estos tensores se pueden considerar como cantidades escalares.

Para resolver las ecuaciones de Maxwell, en un sistema concreto, se definen las corrientes como las variables independientes.

A partir de ellas se calcula el campo magnético B con las ecuaciones:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Y el campo Eléctrico E, lo obtenemos con la ecuación:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Las fuerzas electromotrices las obtenemos por integración lineal del campo eléctrico en las trayectorias de interés.

Ahora, en la siguiente figura 1.30 se ilustran un par de conductores idénticos. El Primero se desplaza a una velocidad v diferente de cero en la presencia de campos E_1 y B_1 .

En el segundo conductor el observador se mueve a la misma velocidad v y considera por esta razón que el conductor se encuentra en reposo.

En esta condición el observador detecta el campo eléctrico E_2 .

Ahora, si se introduce una partícula en cada uno de los conductores anteriores con una carga q , vemos que para el primer sistema la fuerza sobre la partícula, de acuerdo con la ecuación de Lorentz (principio de superposición de fuerzas) es:

$$\vec{F}_1 = q_1 * (\vec{E}_1 + (\vec{v} \times \vec{B}_1))$$

Si la velocidad es constante, la fuerza F_1 es nula. Entonces la ecuación anterior queda como sigue:

$$0 = (\cancel{q_1} * \vec{E}_1) + (\cancel{q_1} * (\vec{v} \times \vec{B}_1))$$

$$\vec{E}_1 = - (\vec{v} \times \vec{B}_1)$$

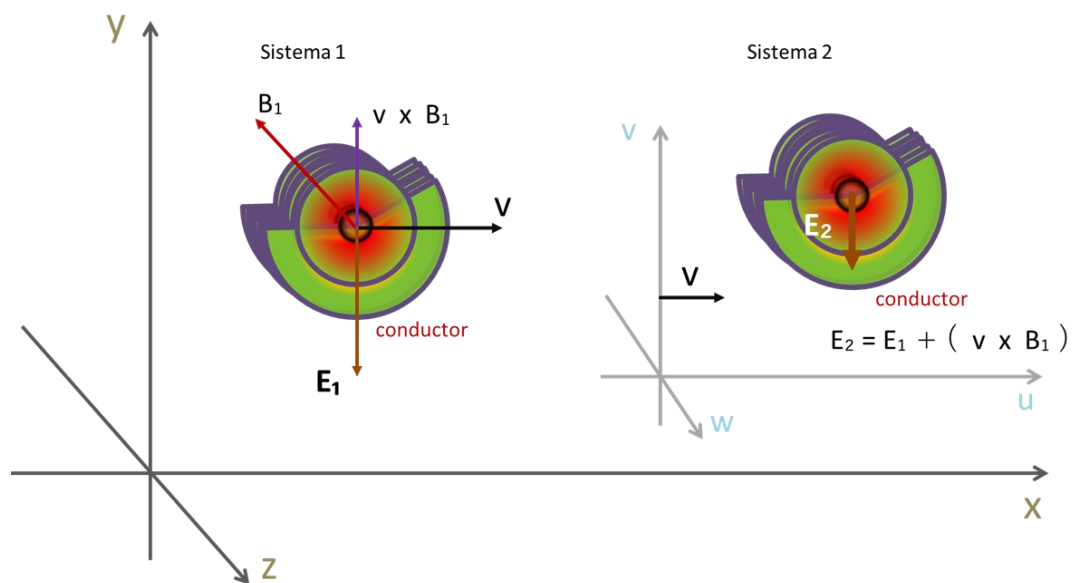


Figura 1.30. Efecto del cambio del sistema de referencia sobre el campo eléctrico

En el sistema 2, como la velocidad relativa es cero, el observador sólo puede atribuir la fuerza actuante sobre la partícula q_1 al campo eléctrico E_2 .

$$\vec{F}_2 = q_1 * \vec{E}_2$$

Como los conductores son idénticos en los dos sistemas, a excepción de su sistema de referencia, se puede establecer la transformación de Lorentz con las expresiones anteriores de F_1 y F_2 . Y además como $F_1 = F_2$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_1 + (\vec{v} \times \vec{B}_1)$$

Con esto tenemos la siguiente conclusión:

Es posible calcular el campo eléctrico equivalente de un sistema de referencia solidario a los conductores del convertidor electromecánico de energía, conociendo vectorialmente el campo eléctrico y el campo magnético del sistema fijo y externo al conductor.

Nota:

Dispositivo Selector de velocidades.

Este es un dispositivo basado en la ley de Lorentz que permite la entrada de partículas cargadas, el cual deja pasar únicamente aquellas que poseen una determinada velocidad.

Ver figura 1.31.

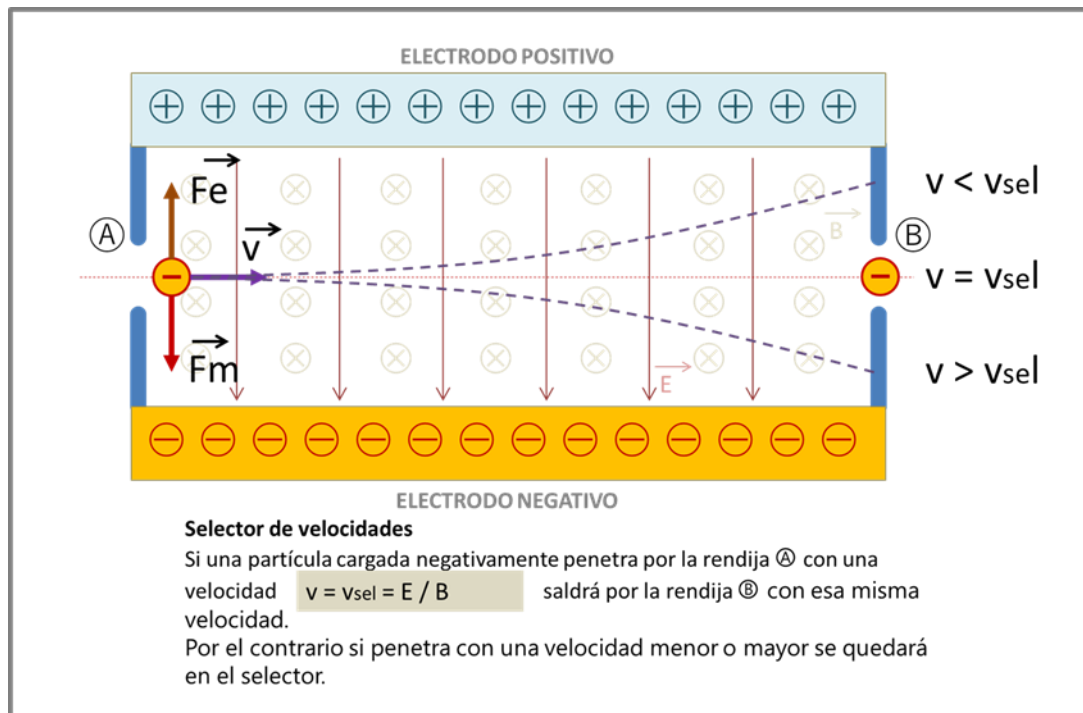


Figura 1.31. Dispositivo selector de velocidades

En la siguiente figura 1.32 se ha esquematizado un segmento conductor al cual se le aplica entre sus extremos el campo eléctrico E .

El circuito se encuentra inmerso en un campo magnético Uniforme B .

La densidad de corriente \vec{J} que circula por el conductor depende de la superposición de los campos eléctricos aplicados sobre él y de la conductividad del material, según la relación:

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} \quad \text{Ley de OHM}$$

Y además:

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} = \sigma * (\vec{E}_{\text{aplicado}} - \vec{E}_{\text{inducido}})$$

El campo producido por el movimiento del conductor a la velocidad v en un campo magnético B se calcula a partir de la ecuación:

$$\vec{E}_1 = -(\vec{v} \times \vec{B}_1)$$

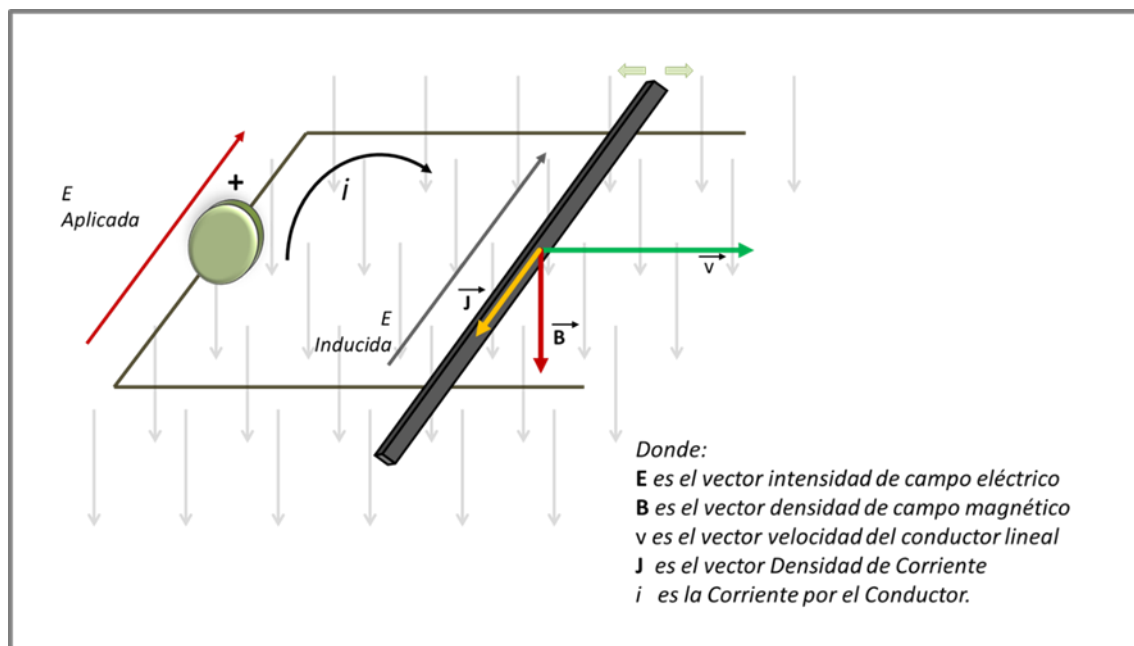


Figura 1.32. Conductor en movimiento en presencia de campos eléctricos y magnéticos.

Quedando todo así:

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} = \sigma * (\vec{E}_{\text{aplicado}} - (-\vec{v} \times \vec{B}))$$

La expresión anterior determina la densidad de corriente J por el conductor.

Una vez conocida la densidad de corriente se puede evaluar el campo eléctrico o el campo magnético en cualquier punto del espacio, utilizando las ecuaciones de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Conocidos los campos se pueden evaluar las fuerzas sobre cualquier partícula eléctrica cargada o sobre cualquier dipolo magnético.

Convertidor Electromecánico Elemental

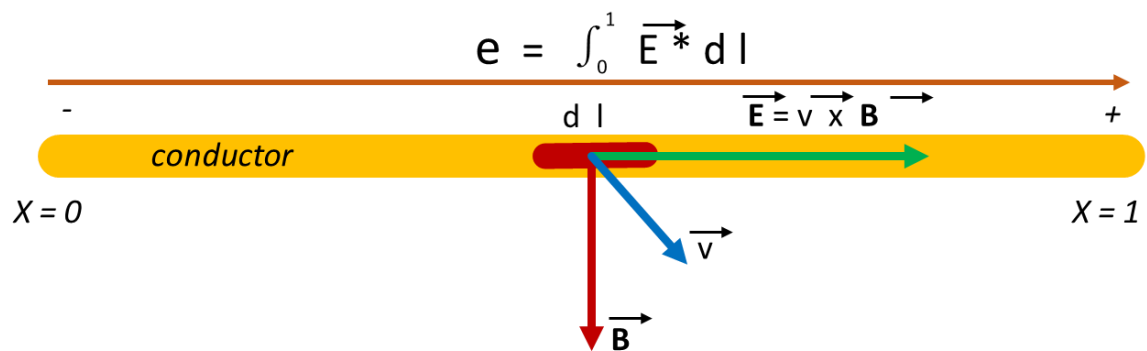
En general las maquinas eléctricas tienen por finalidad transformar la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa.

Energía mecánica en energía eléctrica: GENERADOR. (G)

Energía eléctrica en energía mecánica: MOTOR. (M)

La máquina eléctrica más simple.

En la siguiente figura 1.33 se muestra el esquema de una maquina eléctrica básica. El convertidor electromagnético elemental.



Donde:

E es el vector intensidad de campo eléctrico
e es la fuerza electromotriz

B es el vector densidad de campo magnético

v es el vector velocidad del conductor lineal

Figura 1.33. Dibujo del convertidor electromagnético elemental

El convertidor electromecánico elemental está constituido por un conductor rectilíneo moviéndose ortogonalmente a una velocidad v en un campo magnético B uniforme, en estas condiciones aparece en cada punto del conductor un campo eléctrico constante de valor.

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$$

Nota: Cuando este conductor se conecta a un circuito eléctrico externo, se obtiene una máquina eléctrica que es capaz de comportarse como motor, generador o freno.

Observamos que las variables anteriores E (el vector intensidad de campo eléctrico), e (la fuerza electromotriz), B (el vector densidad de campo magnético) y v (el vector velocidad del conductor lineal), se relacionan en la ecuación:

$$\vec{F}_1 = q_1 * (\vec{E}_1 + (\vec{v} \times \vec{B}_1))$$

Y considerando que no hay campo eléctrico externo (es decir no hay campo eléctrico aplicado sino solamente un campo eléctrico inducido), tenemos o siguiente

$$\vec{E}_1 = (\vec{v} \times \vec{B}_1) \quad \longrightarrow \quad \vec{E} = (\vec{v} \times \vec{B})$$

Y como tenemos un campo magnético uniforme en todos los puntos del conductor y además la velocidad v es constante, entonces la fuerza electromotriz e de todo el conductor es:

$$e = \int_0^1 E * dL$$

Y si ahora al conductor anterior se le conecta una resistencia entre sus extremos, circularán cargas por el conductor y se producirá una corriente de valor:

$$i = (e / R)$$

En el conductor de la siguiente figura 1.34, se produce una fuerza F_e , que se opone al movimiento.

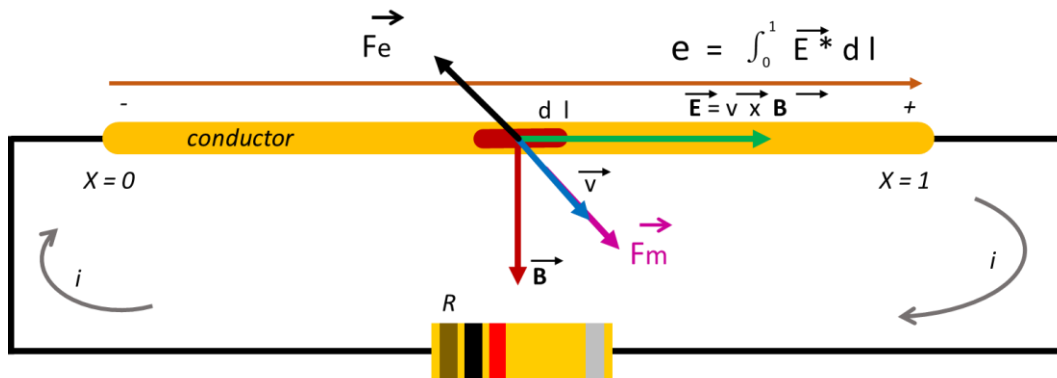


Figura 1.34. Corriente circulando por un conductor

Esta fuerza puede calcularse a partir de la relación de Lorentz:

$$\vec{F} = q * (\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B}))$$

La cual cuando se expresa como función de la corriente i que va por el conductor, queda de la siguiente manera:

$$\vec{F} = l * (\vec{i} \times \vec{B})$$

Nota:

En nuestra parte de estudio aún no tenemos un campo eléctrico aplicado. Entonces la expresión primaria se convierte en:

$$\vec{F} = q * (\vec{v} \times \vec{B})$$

Desarrollando el producto para obtener la magnitud de la Fuerza eléctrica, llegamos a: (Ver figura 1.35).

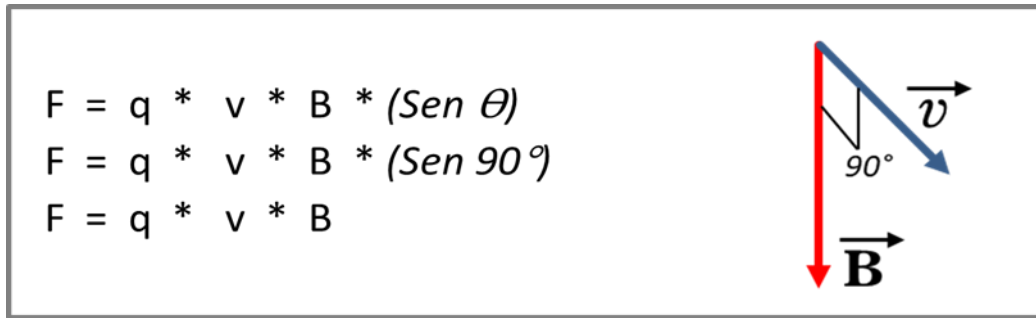


Figura 1.35. Magnitud de la fuerza eléctrica F.

Para nuestro caso:

$v = v_d =$ Velocidad de arrastre del electrón.

Esta velocidad de arrastre tiene la siguiente expresión en función de la densidad de corriente:

$$v_d = J / (n * e)$$

Donde:

- n** es la densidad electrónica relativa al material en # de electrones / m³
- e** es la carga fundamental del electrón (1,603 ^ -19 Coulomb)
- J** es el vector densidad de corriente eléctrica.

Nota:

Por ejemplo, para el aluminio $\rho_{\text{aluminio}} = 2,7 \wedge -3$ (kg / m³)

Un mol de aluminio tiene 26,98g

Un mol de aluminio tiene 6,022^{^23} átomos de aluminio.

Un electrón de conducción por cada átomo de aluminio.

Ver figura 1.36.

$$v_d = J / (n * e)$$

Debemos encontrar **n** :

$$n = \frac{1 \text{ electrón} * 6,022^{23} \text{ átomos de Al} * 2,7^{3} \text{ kg}}{\text{átomos de Al} * 26,98^{-3} \text{ kg} * \text{m}^3}$$

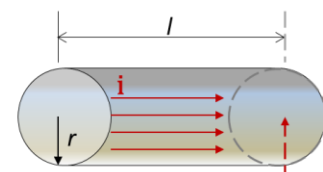
$$n = 6,024 \wedge 28 \text{ electrones / m}^3$$

Entonces:

$$F = q * v * B$$

$$F = q * (J / (n * e)) * B$$

Pero para nuestro caso $e = q$ la carga del electrón.



$$A = \text{Área} = \pi * r^2$$

Figura 1.36. Conductor de aluminio de radio r y longitud l

$$F = q * (J / (n * q)) * B$$

$$F = (J / n) * B, \text{ Pero } i = J * A$$

$$F = (i * B) / (A * n),$$

$$\text{Pero } n = \text{electrones} / (A * l)$$

Entonces:

$$F = (\mathbf{i} * \mathbf{B}) / (A * (1 / (A * l))),$$

$F = \mathbf{i} * l * B$, Expresión para la fuerza eléctrica total sobre los electrones libres en el conductor, teniendo en cuenta que para cada material hay un valor de n específico. Ver el ejemplo anterior.

Esta ecuación es válida solamente si el conductor se encuentra perpendicular al campo magnético B .

Ahora bien, a forma más general de la anterior ecuación es la siguiente:

$$\vec{F} = l * (\vec{i} \times \vec{B})$$

La fuerza eléctrica calculada en la expresión anterior muestra que el sistema se opone a la extracción de energía. Para obtener la energía, es necesario forzar el movimiento del conductor. Si no actúa ninguna otra fuerza que mantenga el movimiento, y si la velocidad es diferente de cero, el sistema tendrá un movimiento retardado de aceleración negativa. El conductor convertirá la energía que estaba inicialmente almacenada en su masa, en pérdidas en la resistencia R del circuito externo.

En estas condiciones, la velocidad decae exponencialmente a cero.

Para mantener una velocidad constante en el conductor de la figura 1.33 se hace necesario aplicar una fuerza externa al conductor de tal forma que esta se oponga a la fuerza F_e . Esta fuerza es de origen mecánico y se denomina F_m . En la figura 1.34 se observa el equilibrio de estas fuerzas el cual es el necesario para mantener constante la velocidad v del conductor.

El sistema mecánico entrega potencia al sistema eléctrico para mantener la velocidad v .

La potencia mecánica entregada por el sistema se calcula mediante la siguiente relación:

$$P_m = \vec{F}_m * \vec{v}$$

Y la potencia eléctrica instantánea en el conductor es:

$$P_e = e * i$$

Si se realiza un balance de potencia, considerando que las cantidades vectoriales son siempre ortogonales entre sí, se obtiene el siguiente resultado:

$$P_m = \vec{F}_m * \vec{v}$$

$$F_m = F_e$$

→

Para que se de el equilibrio con el que garantiza que se mantenga constante la velocidad.

Con lo anterior obtenemos lo siguiente:

$$P_m = \vec{F}_m * \vec{v}$$

Pero:

$$\vec{F}_e = I (\vec{i} \times \vec{B})$$

Y para vectores que son ortogonales esta expresi3n se convierte en:

$$F_e = I * i * B$$

Y con esto llegamos a que:

$$P_m = I * i * B * v$$

Pero, adem3s, la intensidad de campo el3ctrico viene dada por:

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$$

Y para vectores que son ortogonales esta expresi3n se convierte en:

$$E = v * B$$

→

Esta expresi3n es v3lida solo con campo el3ctrico Inducido. No hay campo el3ctrico aplicado.

Con lo anterior obtenemos lo siguiente:

$$P_m = i * E * l$$

Pero además la expresión para la caída de potencial resultante nos lleva a la integral entre $x = 0$ y $x = 1$ del campo Eléctrico.

$$e = \int_0^1 E * dl = E * l$$

Y así llegamos al siguiente resultado.

$$P_m = i * e$$

Este resultado muestra que la conversión de energía mecánica en energía eléctrica ha sido completa. En el proceso no hay pérdidas debido a que la potencia disipada en la resistencia del circuito es externa a la máquina.

Ahora, si le añadimos una fuente de tensión al conductor anterior, con este conductor inicialmente en reposo, tal como se observa en la figura 1.37, la fuente de tensión V hace circular una corriente i por el circuito.

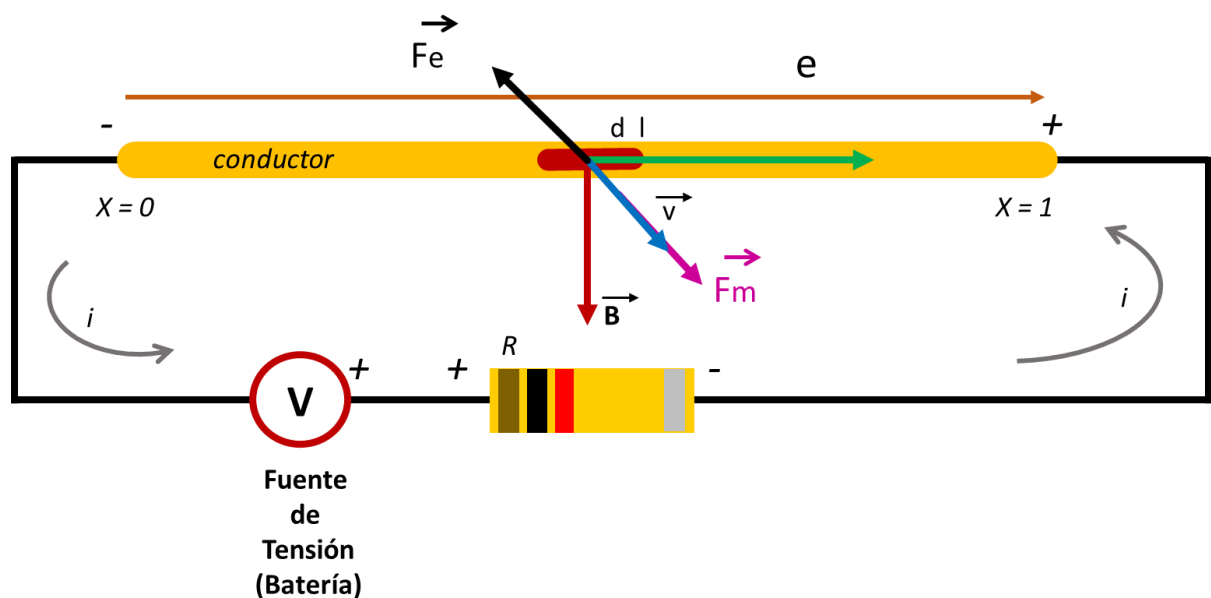


Figura 1.37. Conductor alimentado por una fuente de tensión V

Esta corriente produce una fuerza eléctrica F_e :

$$\vec{F}_e = l (\vec{i} \times \vec{B})$$

Si no actúa ninguna otra fuerza sobre el conductor, este comienza a moverse con aceleración.

Cuando el conductor se mueve en un campo magnético, se origina a su vez un campo eléctrico E , tal como se aprecia en la figura 3X. La fuente de tensión produce una corriente que se opone al campo eléctrico E inducido por el movimiento.

La corriente se puede calcular como:

$$i = \frac{V - e}{R}$$

Ley de OHM en el Circuito

De esta forma, en la medida que aumenta la fuerza electromotriz e inducida por el movimiento del conductor, disminuye la corriente en el circuito.

Al decrecer la corriente, se reduce la fuerza eléctrica sobre el conductor.

El proceso continúa hasta que la fuerza eléctrica F_e se hace cero. En esta condición la tensión aplicada por la batería V es igual a la fuerza electromotriz e , inducida por el movimiento del conductor en el campo magnético y la corriente i se anula.

La velocidad del conductor en que la fuerza eléctrica es cero, debido al equilibrio entre la tensión aplicada y la fuerza electromotriz inducida por el movimiento, se define como velocidad sincrónica del conductor.

Acá:

$$e = V = l * v_{\text{sinc}} * B$$

Donde:

e es la fuerza electromotriz

B es la densidad de campo magnético

v_{sinc} es la velocidad sincrónica

Entonces la expresión de la velocidad sincrónica es la siguiente:

$$v_{\text{sinc}} = \frac{V}{l * B}$$

Una vez que el conductor alcanza la velocidad sincrónica ($V = e$; $i = 0$), si se aplica una fuerza resistente al conductor, el sistema comienza a retardarse y la fuerza electromotriz inducida e disminuye, aumentando la corriente en el conductor debido a que la tensión V de la batería supera a la fuerza electromotriz e .

La aceleración o retardo del sistema se puede calcular aplicando adecuadamente la siguiente *ley de Newton*. La aceleración es igual a la derivada en el tiempo de la velocidad y a su vez es igual a la sumatoria de fuerzas aplicadas sobre la masa del conductor.

$$\vec{a} = \frac{d \vec{v}}{d t} = \frac{1}{M} \sum \vec{F} = \frac{\vec{F}_e + \vec{F}_m}{M}$$

Donde:

ΣF es la sumatoria de fuerzas aplicadas.

F_e es la fuerza eléctrica sobre el conductor.

F_m es la fuerza mecánica resistente.

M es la masa del conductor.

a es el vector aceleración o retardo del sistema.

Cuando la fuerza mecánica F_m equilibra a la fuerza eléctrica F_e , la aceleración es cero y en ese instante se cumple lo siguiente:

$$F_m = F_e = l * i * B$$

$$i = \frac{V - e}{R}$$

$$\implies F_m = F_e = l * B * (V - e) / R$$

$$e = l * v_{\text{sinc}} * B; \quad v_{\text{sincronica}} = v_{\text{operación}}$$

$$\implies F_m = l * B * ((V - (l * v_{\text{oper}} * B)) / R)$$

Despejando $v_{\text{operación}}$:

$$v_{\text{oper}} = \frac{(l * B * V) - (R * F_m)}{l^2 * B^2}$$

Esta es la expresión de la velocidad de operación en función de la fuerza mecánica aplicada.

Voper corresponde a la operación de la maquina cuando las fuerzas eléctricas y mecánicas sobre el conductor están en equilibrio.
 Si en este momento se elimina la fuerza resistente F_m , el conductor se acelera en la dirección de la fuerza eléctrica F_e hasta alcanzar nuevamente la velocidad sincrónica.
 El tema estudiado permite resumir en seis ecuaciones los principios que rigen la conversión electromecánica de energía:

Resumen de las seis ecuaciones de los principios que rigen la conversión electromecánica de energía:

$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$	Ecuación de equilibrio de la relación de Lorentz cuando No hay campo eléctrico externo aplicado
$\vec{f}_e = I \vec{i} \times \vec{B}$	Fuerza eléctrica sobre el conductor. Esta ecuación anterior es válida solamente si el conductor es perpendicular al campo B.
$e = \int_0^1 \vec{E}^* \cdot d\vec{l} = \vec{E}^* \cdot \vec{l} = v^* B^* l$	Esta ecuación calcula una variable eléctrica (e) en función de una variable mecánica (v) y el campo (B).
$F = \int_0^1 \vec{f}^* \cdot d\vec{l} = \vec{f}^* \cdot \vec{l} = i^* B^* l$	Esta ecuación determina una variable mecánica (F) en función de una variable eléctrica (i) y el campo (B).
$i = \frac{V - e}{R}$	Estas expresiones dependen del conductor y del campo, se llaman las ecuaciones internas del convertidor electromecánico.
$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} \vec{F}_{aplicada} = \frac{\vec{F}_m + \vec{F}_e}{M}$	Esta ecuación determina una variable mecánica (F) en función de una variable eléctrica (i) y el campo (B).
	Estas ecuaciones representan las relaciones entre el conductor – máquina eléctrica – y el resto del universo. Estas ecuaciones se denominan ecuaciones de ligazón, ecuaciones de borde, ecuaciones de contorno o ecuaciones de frontera.

Este estudio anterior nos ha facilitado entender de una forma muy básica que el tema de las maquinas eléctricas posee un fundamento matemático ya muy estudiado desde comienzos de los años 1800 hasta hoy.

Veremos a continuación el comportamiento, también básico, de la maquina eléctrica mediante gráficos simples, los cuales utilizaremos a lo largo de todo este trabajo.
 Notaremos cuando estamos del lado motor, cuando del lado freno y cuando del lado motor en la maquina más sencilla de movimiento con bases eléctricas. Cumple también parta maquinas más elaboradas tales como las asíncronas. Ver figura 1.38

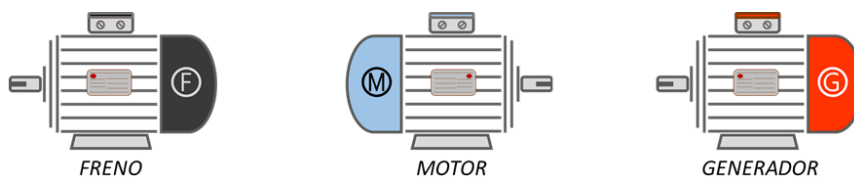


Figura 1.38. Diferentes condiciones de funcionamiento de la maquina asíncrona

Curvas Características

Para representar las curvas características de la fuerza eléctrica sobre el conductor en función de la velocidad, partiremos de la siguiente ecuación:

$$F_e = I * i * B$$

Pero:
$$i = \frac{V - e}{R}$$

Entonces:
$$F_e = ((V - e) / R) * I * B$$

Pero:
$$e = I * V_{oper} * B$$

Entonces:
$$F_e = ((V * B * I) / R) + (((B * I)^2 / R) * V_{oper})$$

La ecuación anterior representa la fuerza eléctrica F_e como una recta en función de la velocidad de operación del conductor.

Cuando el conductor se encuentra en **reposo** $V_{oper} = 0$, la fuerza eléctrica es igual al término independiente de la velocidad en la ecuación.

$$F_e = ((V * B * I) / R); \text{ con } V_{oper} = 0$$

Ahora, si la fuerza eléctrica es cero, la velocidad corresponde a la velocidad sincrónica de la máquina.

$$V_{oper} = (V / (B * I)) = V_{sincrónica}$$

Si se opone una fuerza constante de valor conocido, tal como se observa en la siguiente figura, se determina un punto de equilibrio V_0 el cual corresponde a la velocidad en la cual la fuerza eléctrica F_e equilibra a la fuerza mecánica F_m y constituye un punto de operación estable debido a que cualquier perturbación en la velocidad mecánica del sistema *tenderá* a ser restituida las condiciones previas por las fuerzas actuantes sobre el conductor. Esta intersección es un punto de operación de *régimen permanente* para la máquina.

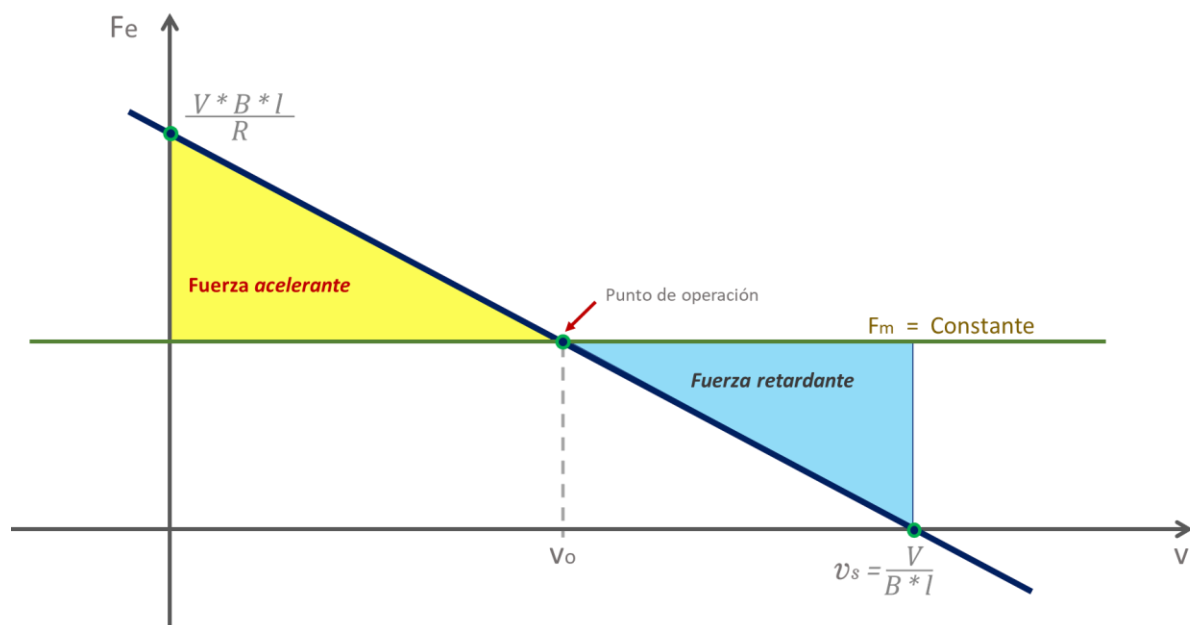


Figura 1.39. Curva característica de la máquina

En la anterior figura 1.39 se muestran dos zonas coloreadas (una zona amarilla) y (una zona azul claro).

En la zona amarilla, si la máquina arranca en contra de una fuerza mecánica resistente constante, se acelera hasta alcanzar el punto de operación permanente o punto de equilibrio V_0 (lugar de intersección de las características). Esto ocurre debido a que esta zona de operación, la fuerza eléctrica F_e , siempre es superior a la fuerza mecánica F_m .

Si el sistema se encuentra originalmente en vacío, es decir, operando a velocidad sincrónica, sin carga mecánica y repentinamente se añade una fuerza mecánica resistente, la fuerza eléctrica es inferior a la mecánica y ocurre un proceso de retardo en la zona color azul claro de la figura 1.39.

La velocidad disminuye desde la sincrónica hasta la velocidad de operación V_0 en el punto de equilibrio.

La fuerza mecánica F_m depende en general, para un accionamiento físico, de la velocidad del conductor.

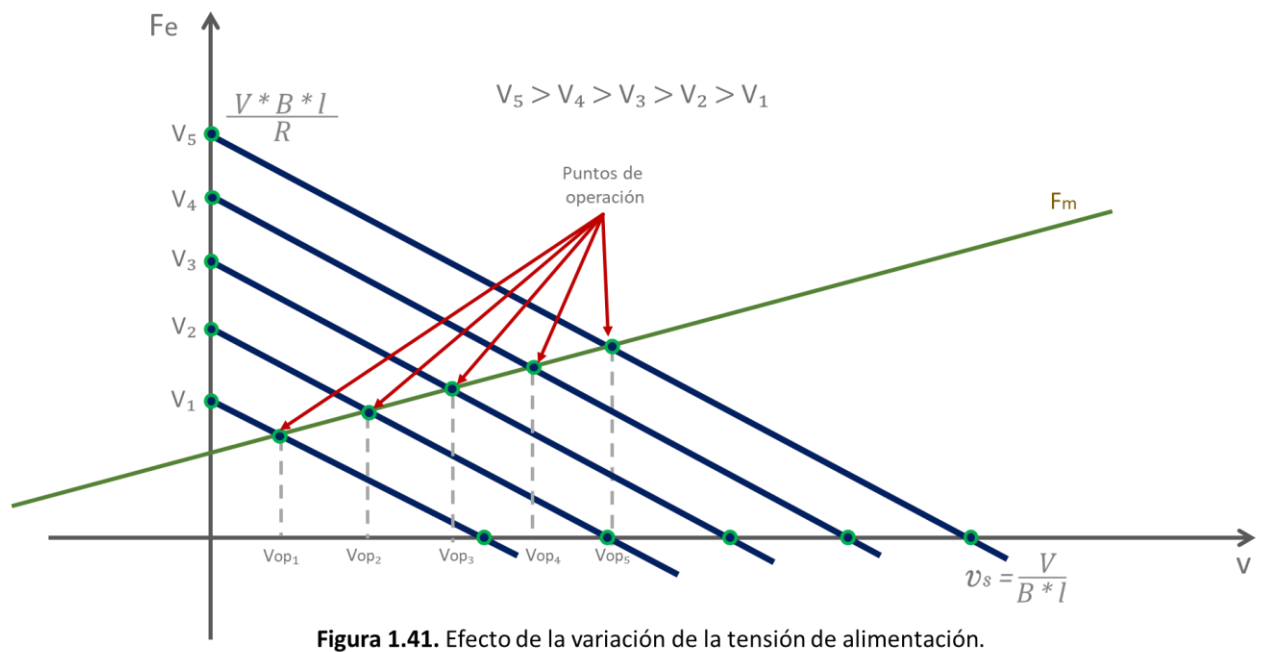
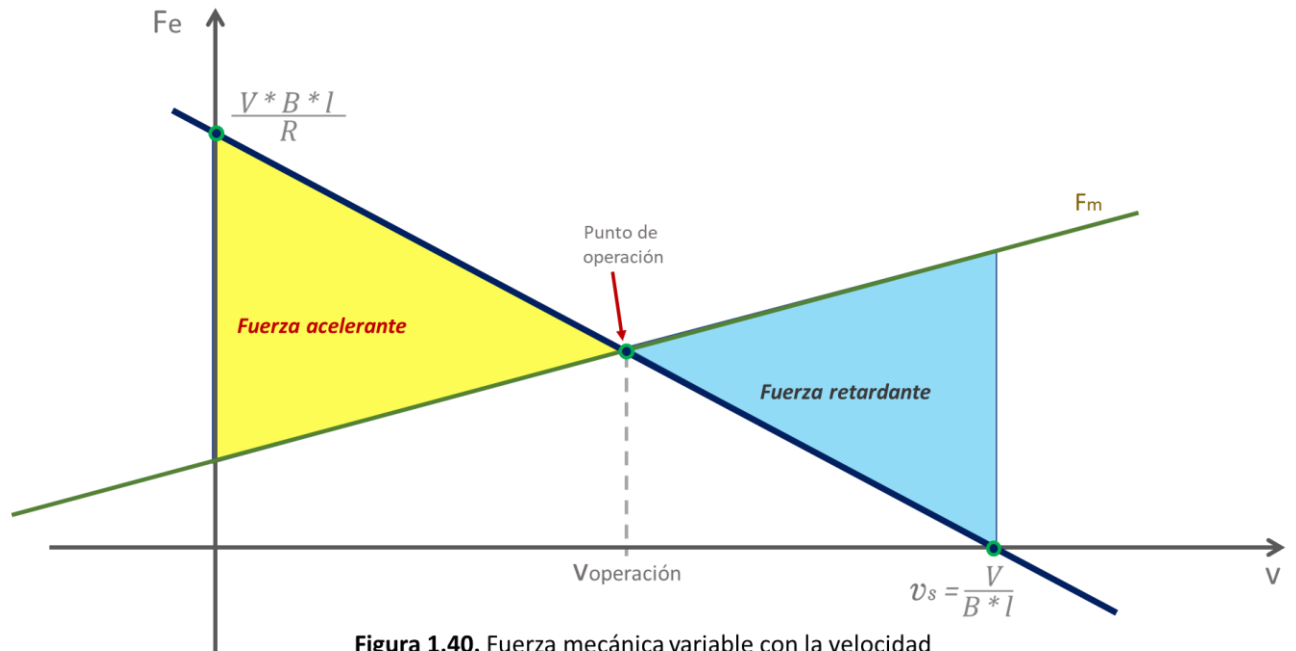
En la figura 1.40 (siguiente figura) se muestra la curva característica de la máquina eléctrica anterior, pero sometida a una fuerza mecánica dependiente de la velocidad.

En este caso, al igual que en el anterior, V_0 es un punto de equilibrio estable ya que, si se aumenta un diferencial la velocidad del conductor por encima de V_0 , se origina una fuerza retardadora que hace regresar el conductor a la anterior condición de operación.

Por el contrario, si la velocidad del conductor disminuye en un diferencial, se produce una fuerza acelerante que incrementa la velocidad del conductor hasta alcanzar el punto de equilibrio en V_0 .

Al producirse un cambio en la tensión de la batería que alimenta al convertidor, la velocidad sincrónica de la máquina también varía, debido a que esta velocidad se determina cuando existe equilibrio entre la tensión de la batería y la fuerza electromotriz inducida en el conductor.

En la figura 1.40 es posible definir una familia de curvas de acuerdo a como se varíe la tensión de la fuente. Mediante el cambio de la tensión de la batería se puede controlar la velocidad de operación de la máquina. Ver figura 1.41.



También se puede controlar la máquina elemental variando la densidad de flujo magnético B.

La variación del campo produce un cambio en la pendiente de la curva característica de la máquina, como se observa en la siguiente ecuación:

$$F_e = ((V * B * l) / R) + (((B * l)^2 / R) * V_{oper})$$

Esta es la ecuación que representa la fuerza eléctrica F_e como una recta en función de la *velocidad de operación* del conductor.

Observamos que la variación de B altera la pendiente de la característica de *forma cuadrática* y el punto de corte en el eje de la fuerza ($V_{oper} = 0$), de *forma lineal*.

En la figura 1.42 se ilustra esta situación y cómo es posible cambiar el punto de operación de la máquina mediante variaciones del campo magnético B .

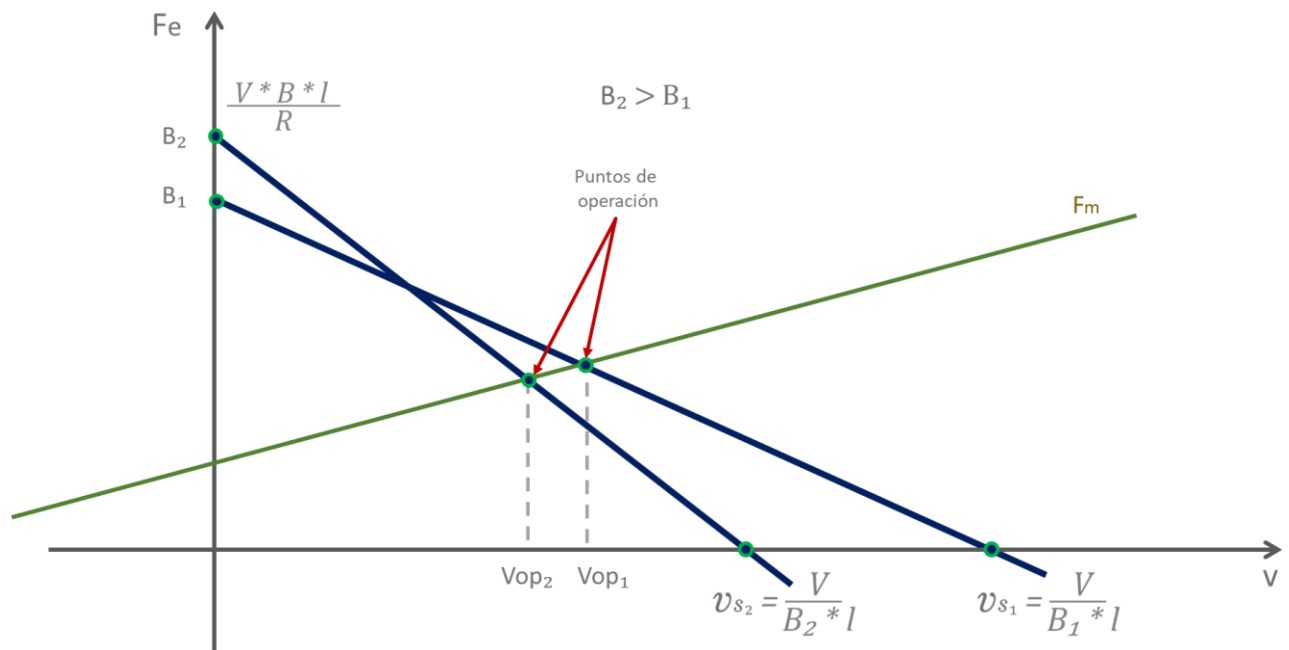


Figura 1.42. Efecto de la variación del campo B del convertidor.

De los dos métodos analizados para controlar el punto de operación de la máquina, la variación del campo magnético presenta un inconveniente.

Cuando el campo B se reduce demasiado, la velocidad sincrónica aumenta considerablemente y se puede producir un fenómeno denominado embalamiento.

NOTA:

El embalamiento es una aceleración súbita debida a la pérdida del campo en una máquina eléctrica sin carga. Si la velocidad sube a niveles peligrosos, puede ocurrir deterioro de la máquina por fallas eléctricas y mecánicas. Esto es notable mayormente en máquinas con voltaje de alimentación de corriente directa y sobre todo de configuración serie.

En las máquinas de corriente alterna y sobre todo las de Inducción o asíncronas se observa buen comportamiento de estas frente al embalamiento. El comportamiento de las máquinas de inducción en lo referente a la velocidad es bastante estable cuando se aumenta o disminuye la carga. Y cuando la carga se disminuye en un porcentaje alto es cierto que la velocidad se incrementa un poco.

En el caso de motores de AC de inducción trifásicos de 4 polos la variación observada en pruebas oscila alrededor de las 50 RPM.

Ver el Aparte de un ensayo para observar acciones de sobre velocidad realizado a un motor trifásico de inducción de (1/3) de HP en la figura 1.43.

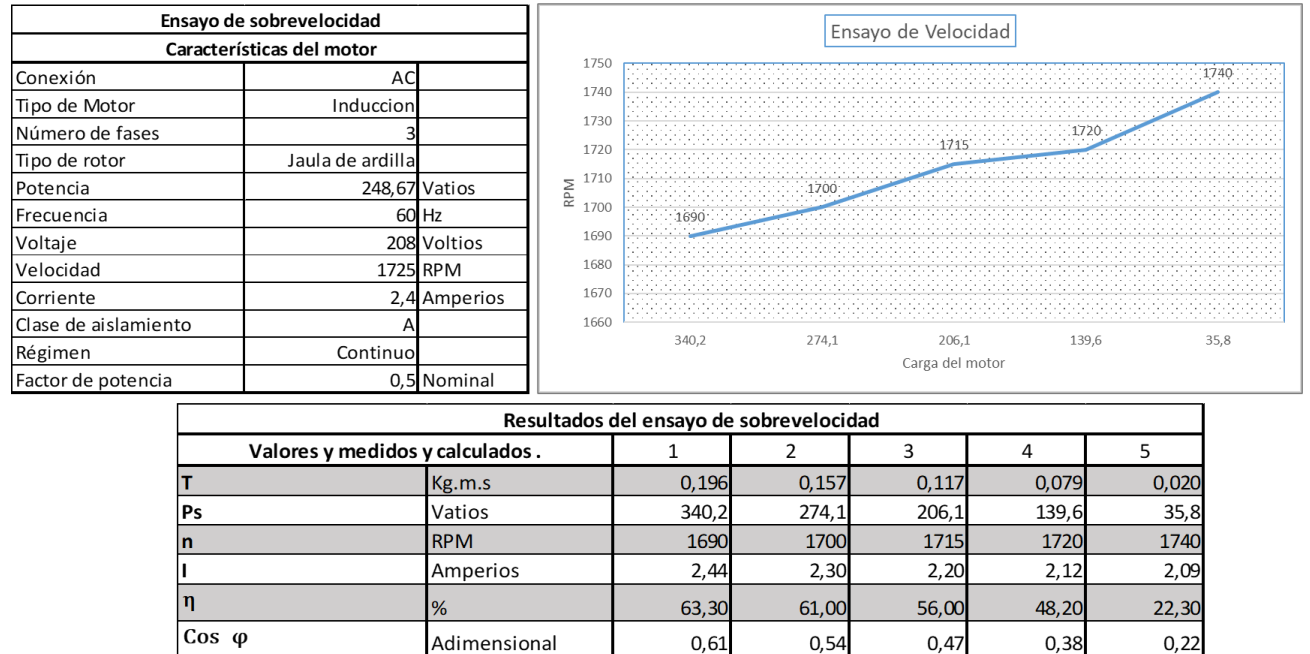


Figura 1.43. Aparte de un ensayo para observar acciones de sobre velocidad realizado a un motor trifásico de inducción de (1/3) de HP.

En el balance de potencias desarrollado en la ecuación se llegó a la conclusión de que todo el proceso es conservativo sobre la base de que la potencia eléctrica desarrollada por la máquina es igual a la potencia mecánica entregada por el sistema externo.

$$P_m = F_m * v$$

En general, todas las máquinas eléctricas son reversibles y su funcionamiento depende del sentido en que se transmite la potencia. Ver figura 1.44.

Si la energía fluye del sistema eléctrico al mecánico, la máquina funciona como **motor** Ⓜ.

Si el flujo de energía es del sistema mecánico al eléctrico, el convertidor es un **generador** ⓐ.

Cuando el sistema eléctrico y mecánico inyectan energía a la máquina, y esta energía se consume totalmente como pérdidas internas, esta condición se denomina **freno** ⓕ.

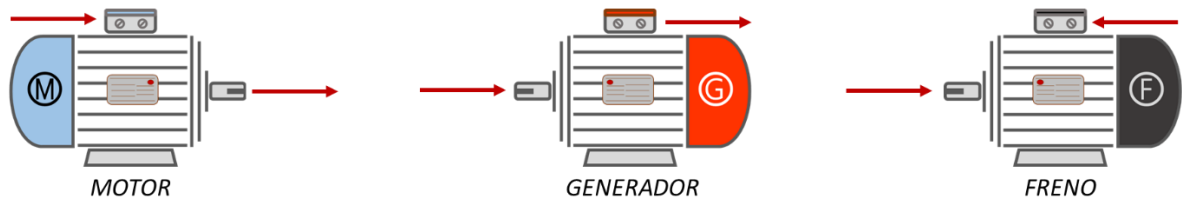


Figura 1.44. Flujo de energía básico en los diferentes modos de trabajo de la máquina asíncrona.

La máquina se puede alimentar indistintamente con energía eléctrica o con energía mecánica.

En la figura 1.45 se presenta un gráfico de la característica fuerza-velocidad de la máquina analizada anteriormente, con los diferentes modos de operación factibles para este convertidor.

En la zona azul, la velocidad del conductor es menor que la velocidad sincrónica, la fuerza electromotriz inducida es menor que la tensión aplicada externamente y la corriente tiene signo contrario a la fuerza electromotriz.

Bajo estas condiciones el conductor se desplaza en el mismo sentido de la fuerza eléctrica, es decir, esta fuerza realiza trabajo positivo y por lo tanto se está transformando energía eléctrica en mecánica.

La máquina está actuando como un **motor**. En esta zona se satisfacen las siguientes condiciones (Ver figura 1.46):

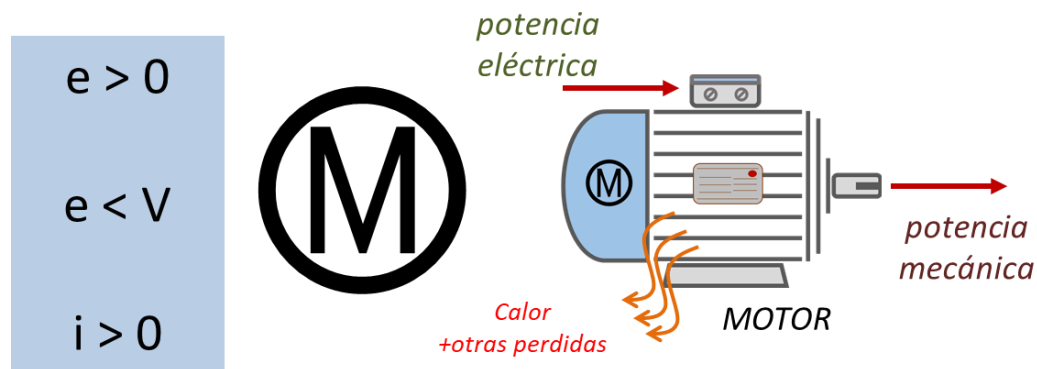


Figura 1.46. Modo Motor de la máquina asíncrona.

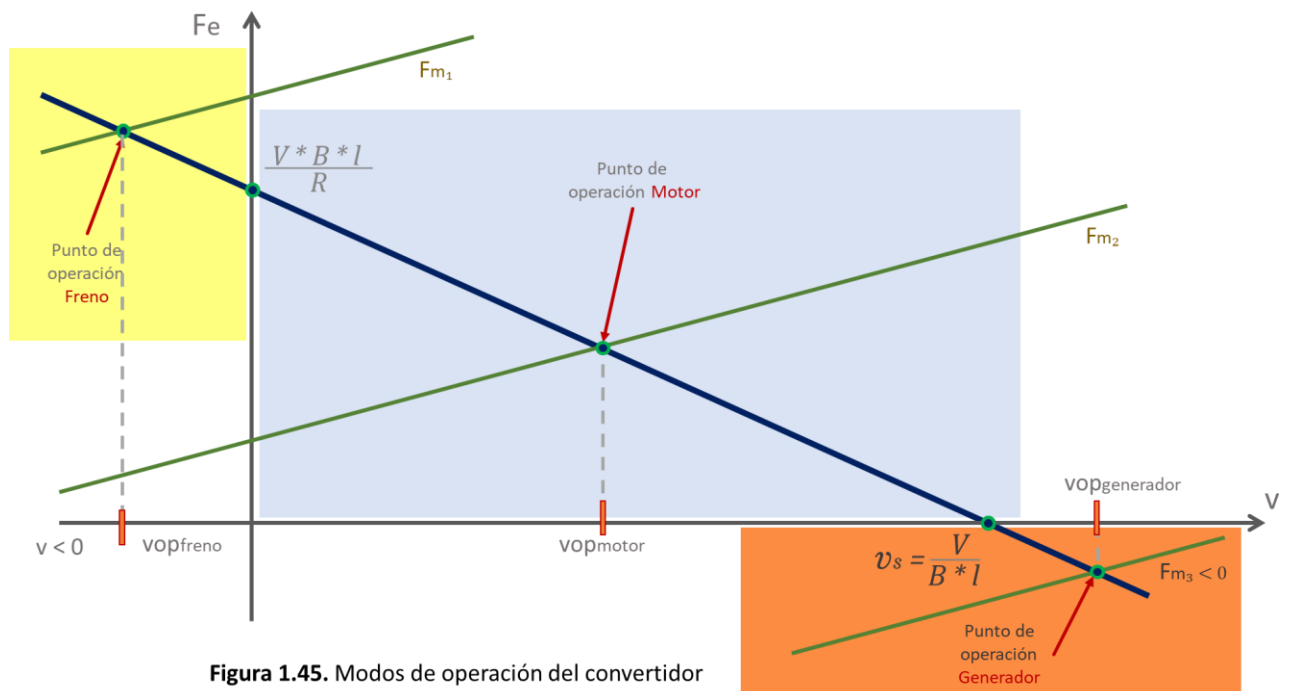


Figura 1.45. Modos de operación del convertidor

En la zona naranja, la velocidad del conductor es mayor que la velocidad sincrónica y la fuerza electromotriz es mayor que la tensión aplicada, por esta razón la corriente y la fuerza eléctrica invierten su sentido.

Para encontrar un punto de equilibrio la fuerza mecánica también debe invertir su sentido original.

La fuerza mecánica ahora está entregando energía y el sistema se comporta como un **generador**. Ver figura 1.47.

Las condiciones que imperan en esta zona de trabajo son:

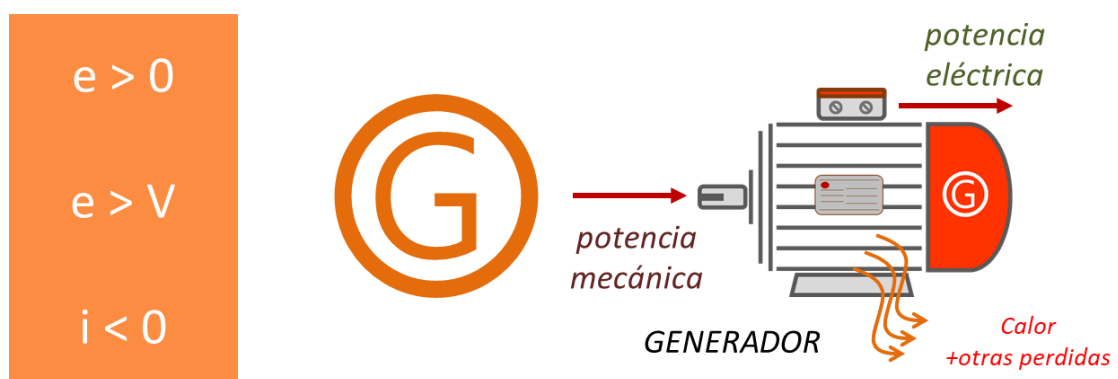


Figura 1.47. Modo Generador de la maquina asíncrona.

En la zona amarilla, tanto la velocidad, como la fuerza electromotriz son negativas. La fuerza mecánica está aplicada en el mismo sentido de la velocidad –negativa en este caso–, por lo tanto, el sistema mecánico entrega energía a la máquina.

Simultáneamente, la fuente de tensión entrega potencia eléctrica a la carga. En esta condición toda la potencia entregada por el sistema mecánico y por el sistema eléctrico *se consume en la resistencia interna del conductor y se produce un gran calentamiento de la máquina*. Este estado se conoce con el nombre de *frenado eléctrico* y se caracteriza por las siguientes condiciones de operación (ver figura 1.48):

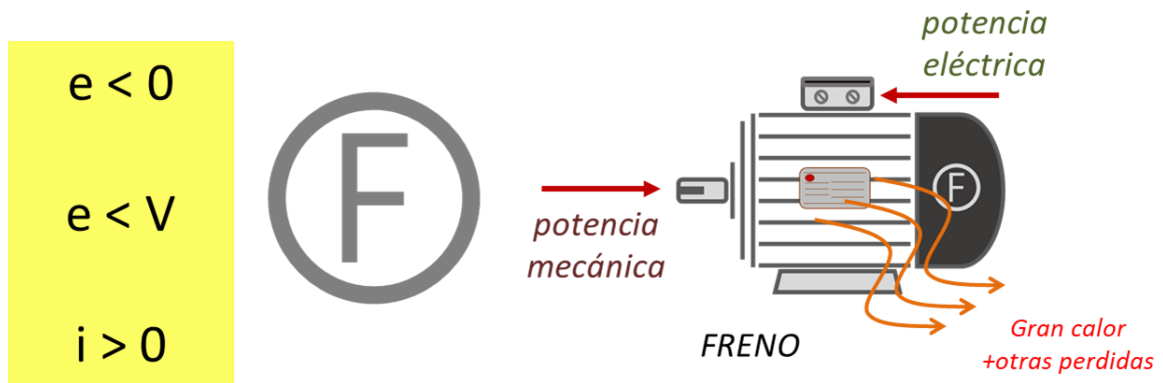


Figura 1.48. Modo Freno de la maquina asíncrona.

La máquina asíncrona es un ejemplo de una maquina más general que se llama convertidor electromecánico rotatorio.

Un convertidor electromecánico de energía es una máquina eléctrica. En general una máquina eléctrica posee varios ejes o puertos por los cuales fluye la energía. Estos ejes pueden ser de dos tipos: eléctricos o mecánicos. Esquemáticamente se representan en la siguiente figura 1.49.

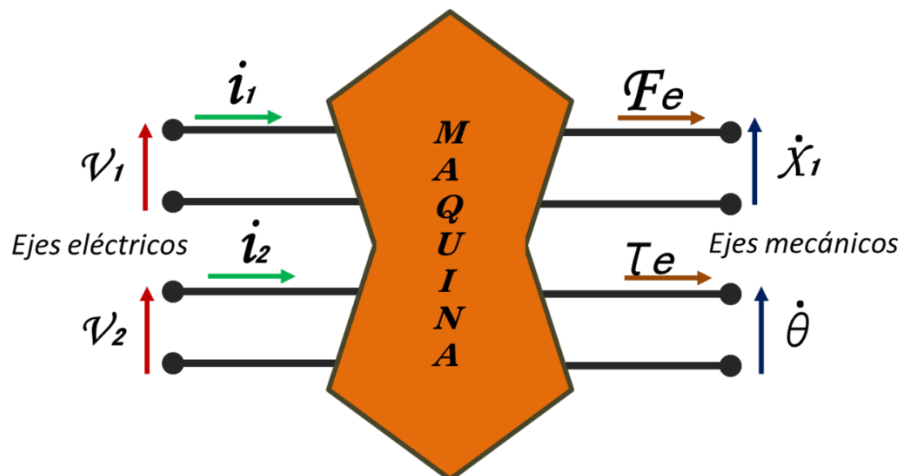


Figura 1.49. Maquina Eléctrica y Algunos de sus Posibles Ejes.

En los ejes eléctricos de la máquina, las interacciones se analizan conociendo las corrientes y tensiones. En los ejes mecánicos las variables que determinan la condición

de operación de la máquina son *las velocidades y fuerzas*, si el movimiento es lineal, o *el par y la velocidad angular*, si el movimiento es rotativo.

La máquina eléctrica más simple requeriría al menos un eje eléctrico y un eje mecánico (Ver figura 1.50). El esquema básico de esta máquina se ilustra en la siguiente figura:

- ΔW_e es el incremento de energía eléctrica que entra en el convertidor por el eje eléctrico,
- ΔW_m es la variación de energía mecánica que sale por el eje mecánico y
- ΔW_c es el aumento de energía que se almacena en los campos eléctrico y magnético de la máquina.

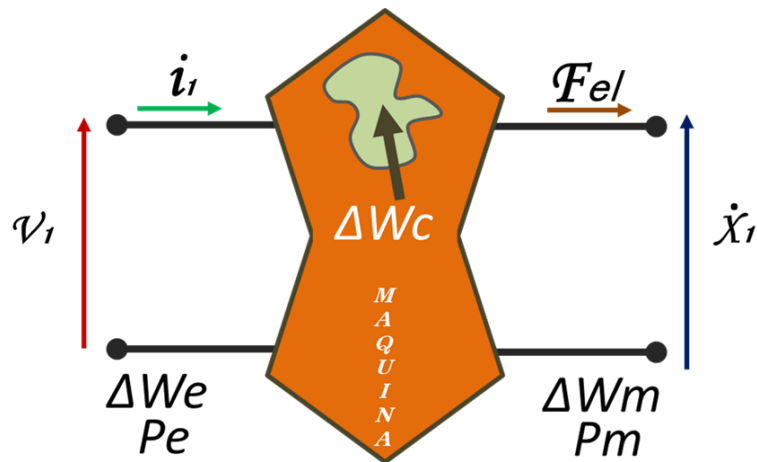


Figura 1.50. Máquina Eléctrica con un eje eléctrico y un eje mecánico.

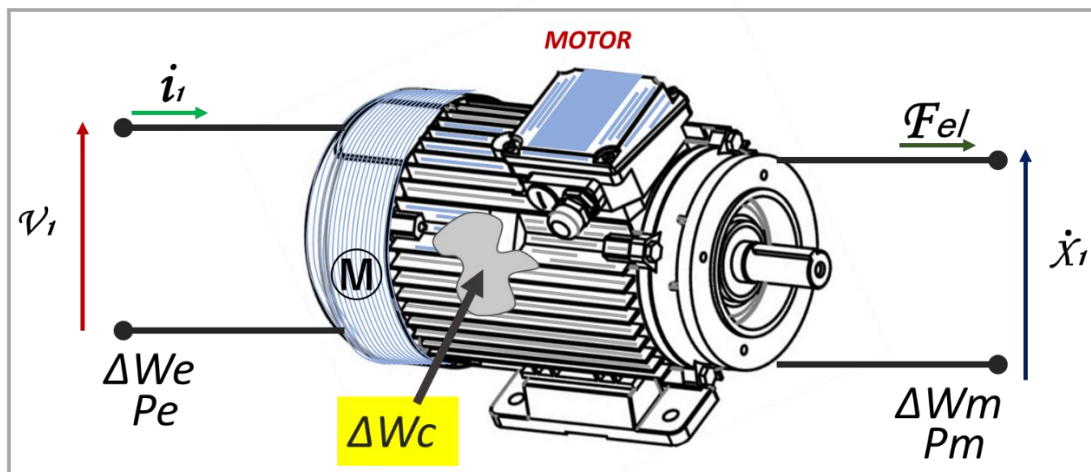


Figura 1.51. Motor Eléctrico \mathcal{M} --- Con un eje eléctrico y un eje mecánico.

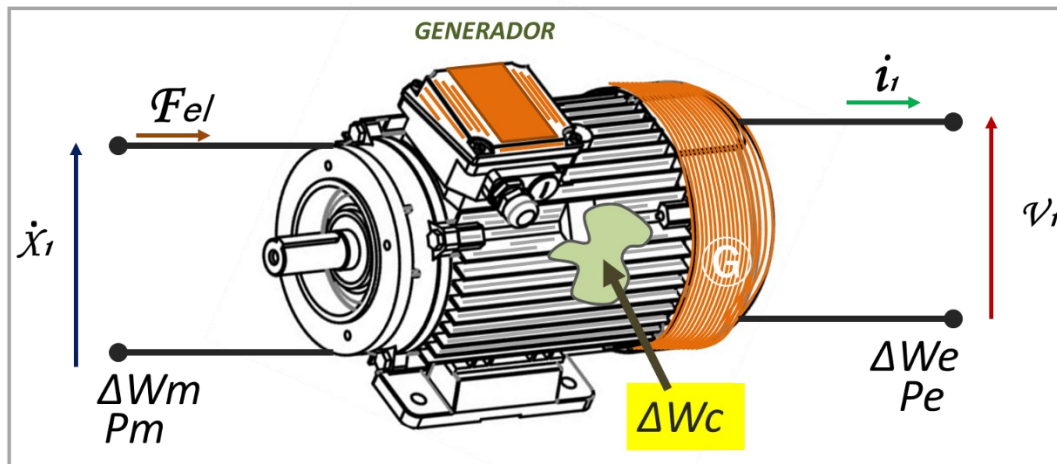


Figura 1.52. Generador Eléctrico © --- Con un eje eléctrico y un eje mecánico

Además, en las máquinas eléctricas, no toda la energía introducida en los ejes eléctricos se entrega en los ejes mecánicos o viceversa. Es necesario que parte de la energía eléctrica se almacene en los campos electromagnéticos del convertidor.

En un balance de la energía en la máquina eléctrica es necesario tener en cuenta la parte de la energía que fluye desde y hacia los campos eléctricos y magnéticos. En las figuras anteriores esto se muestra marcado como ΔW_c (ver figuras 1.50, 1.51 y 1.52). La energía acumulada en el campo no puede ser medida, pero es posible calcularla por la diferencia entre la energía eléctrica y la mecánica:

$$\Delta W_c = \Delta W_e - \Delta W_m$$

Como sabemos *La energía* es uno de los conceptos más importantes en el estudio de las máquinas eléctricas.

Ejemplo lo son los motores, los generadores, los transformadores, etc. Estas máquinas convierten un tipo de energía en otro tipo de energía.

En física se define a *La energía* como la capacidad de realizar un trabajo.

También se la define en el campo científico como:

O también:

Magnitud física que se presenta bajo diversas formas, está involucrada en los procesos de cambio de estado, se transforma y se transmite, depende del sistema de referencia y fijado éste, se conserva.

Propiedad o atributo de todo cuerpo o sistema material en virtud de la cual éste puede transformarse, modificando su situación o estado, así como actuar sobre otros originando en ellos procesos de transformación

O además también:

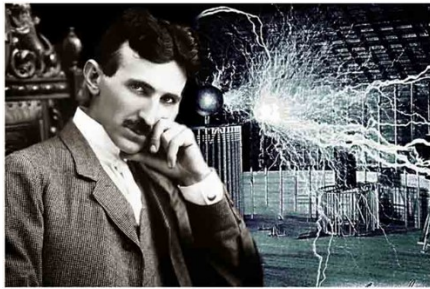
Una definición alternativa es la que se refiere a lo siguiente: La energía es la propiedad de todo cuerpo o sistema material o no material que puede transformarse modificando su situación o estado.

Estudiaremos a continuación varios de los aspectos de la maquina asíncrona trifásica la cual es el objeto de este trabajo.

La estudiaremos bajo la premisa de ser un elemento de transformación de un tipo de energía en otra y también bajo la premisa de que la maquina asíncrona acompaña muchos procesos hidráulicos tal como el proceso de bombeo de líquidos newtonianos y otros más.

Aparte sobre la maquinas eléctricas rotativas:

Las máquinas eléctricas se han desarrollado en un frenético proceso evolutivo que comienza a mediados del siglo XIX y que aún continúa en la actualidad. Innumerables patentes de conocidos inventores tales como Edison y Tesla (ver figura 1.53), entre muchos otros, los cuales realizaron contribuciones significativas que lograron eficacia y eficiencia en la conversión electromecánica de energía. Después de todo este proceso, las máquinas convencionales presentan características comunes que permiten generalizar la descripción matemática de su comportamiento mediante las herramientas discutidas en este estudio.



Nikola Tesla;

Smiljan, actual Croacia; 10 de julio de 1856
- Nueva York, 7 de enero de 1943

Thomas Alva Edison
Milan, Ohio;
11 de febrero de 1847
West Orange, Nueva Jersey;
18 de octubre de 1931



Figura 1.53. Nikola Tesla y Thomas Alva Edison.

Tomado de internet <https://tecreview.tec.mx/2018/08/30/ciencia/robo-a-thomas-edison-vs-nikola-tesla/>

Las máquinas eléctricas rotativas convencionales presentan generalmente las siguientes características comunes:

1. Poseen un eje mecánico a través del cual se realiza el intercambio de energía.
2. Tienen una pieza estática o inmóvil denominada estator.
3. Disponen de una pieza móvil denominada rotor en el caso particular de las máquinas cilíndricas.
4. Generalmente son cilíndricas.

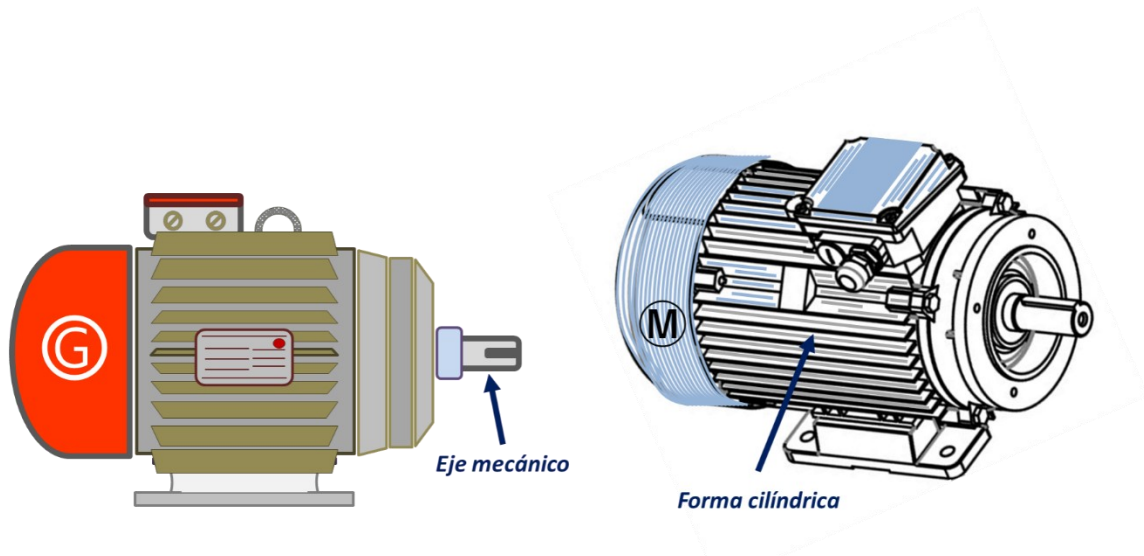


Figura 1.54. Forma cilíndrica y concéntrica de la maquina rotativa asíncrona de inducción.

La mayor parte de las máquinas eléctricas convencionales son cilíndricas porque en esta configuración geométrica se obtiene una disposición de todos los conductores en la cual la velocidad, el campo magnético y los conductores son perpendiculares entre sí. Ver figuras 1.54 y 1.55.

En la figura 1.56 se muestra un diagrama de este tipo de configuración. En la superficie de revolución o manto del cilindro, se encuentran los conductores dispuestos en forma axial y simétrica. La simetría evita vibraciones en la máquina, pero además es necesario que la corriente se distribuya uniformemente por todos los conductores.

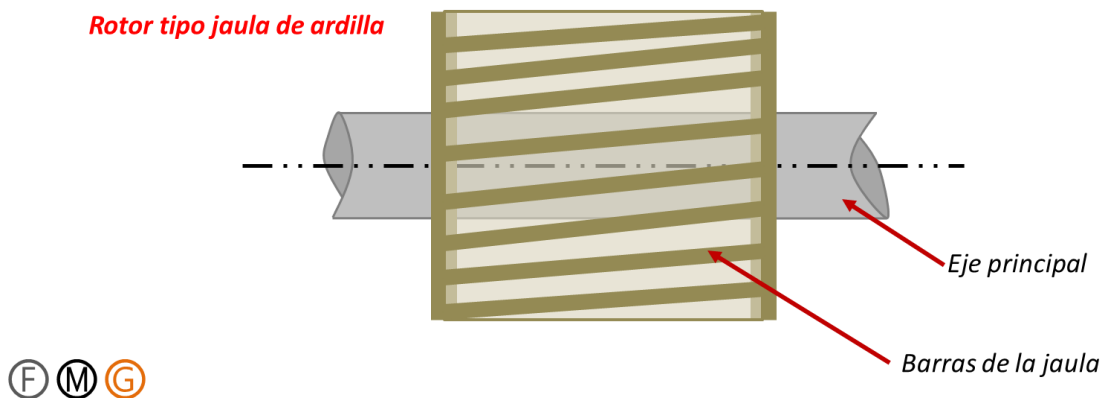


Figura 1.55. Forma cilíndrica del rotor, concéntrico al estator y simétrico en su estructura.

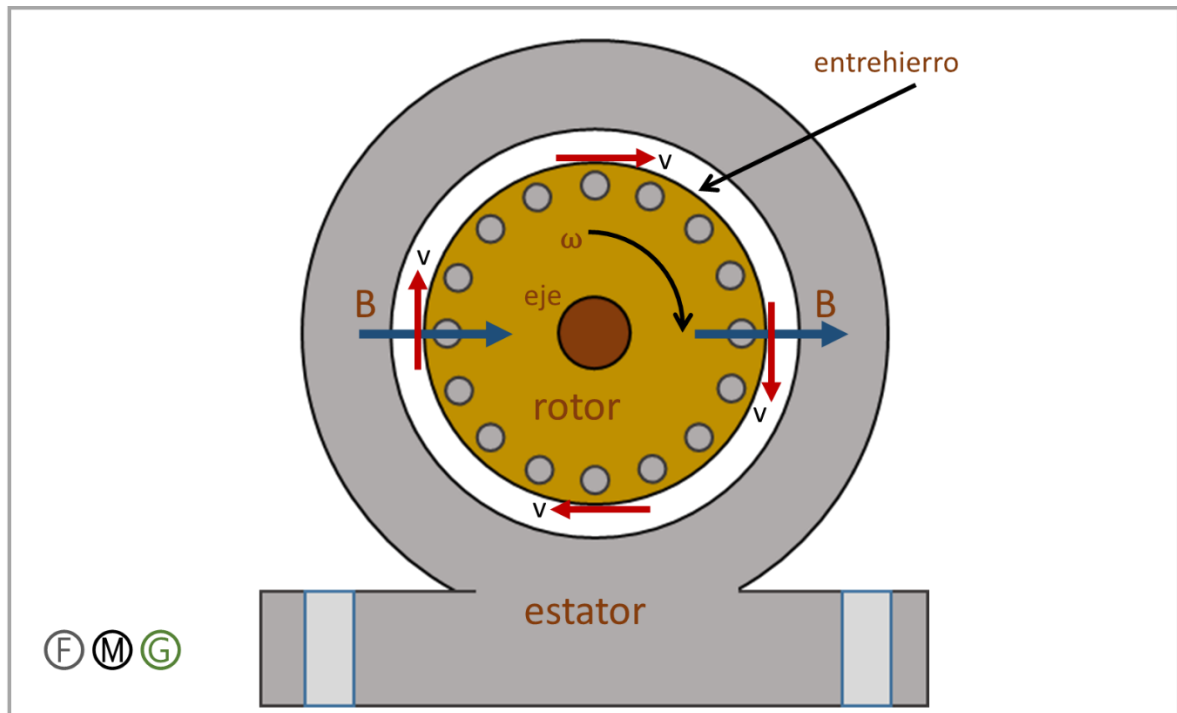


Figura 1.56. Configuración cilíndrica de los conductores en una máquina rotativa

Cuando observamos la distribución del flujo en la máquina eléctrica cilíndrica, se aprecia que en una zona de los 2π radianes (en una zona de la circunferencia), el campo es positivo (el flujo sale de la superficie) y en el resto del cilindro es negativo (el flujo penetra en la superficie del cilindro).

La zona del cilindro en el cual hay salida del flujo se ha definido como polo norte y la región por la cual penetra el flujo a la superficie se define como polo sur. En la figura 1.57 se ilustra el polo norte y sur de un cilindro elemental excitado por dos conductores.

Además, las máquinas eléctricas pueden ser diseñadas de tal manera que en el desarrollo de 2π radianes existan varios polos norte y varios polos sur.

En la figura 1.58 se muestra un ejemplo de un cilindro en el cual existen dos polos norte y dos polos sur alternados entre sí.

Esta situación es lo que se denomina una máquina con dos pares de polos, pero se puede repetir con cualquier cantidad de pares de polos.

Como en las máquinas eléctricas cada par de polos se repite exactamente igual, es suficiente analizar el primer par de polos y extender los resultados obtenidos a la totalidad de la máquina.

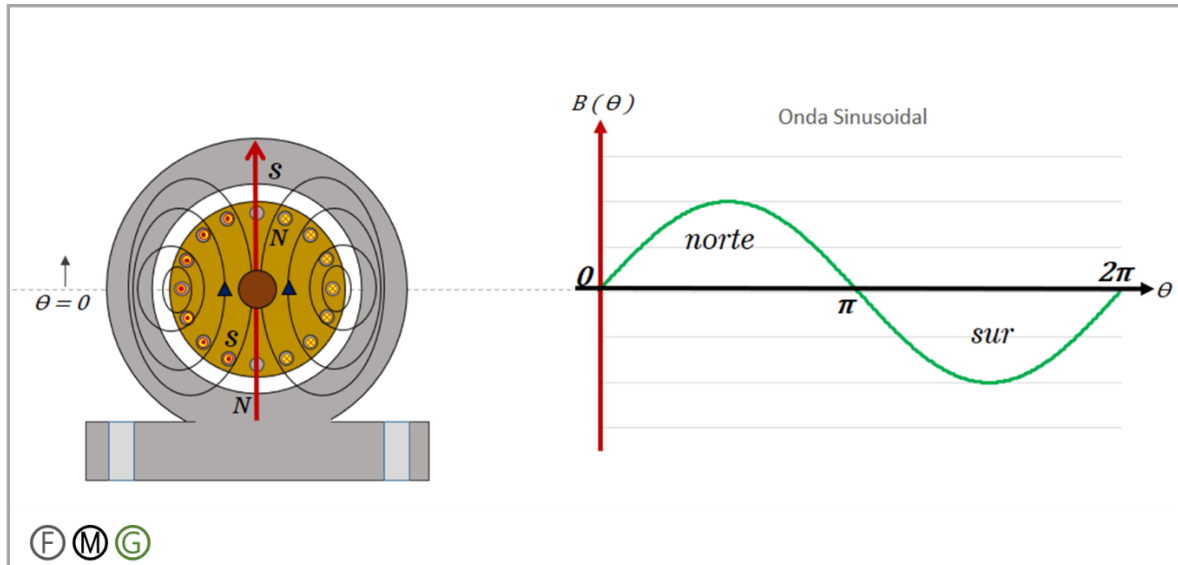


Figura 1.57. Polos norte y sur de un cilindro. Un par de polos.

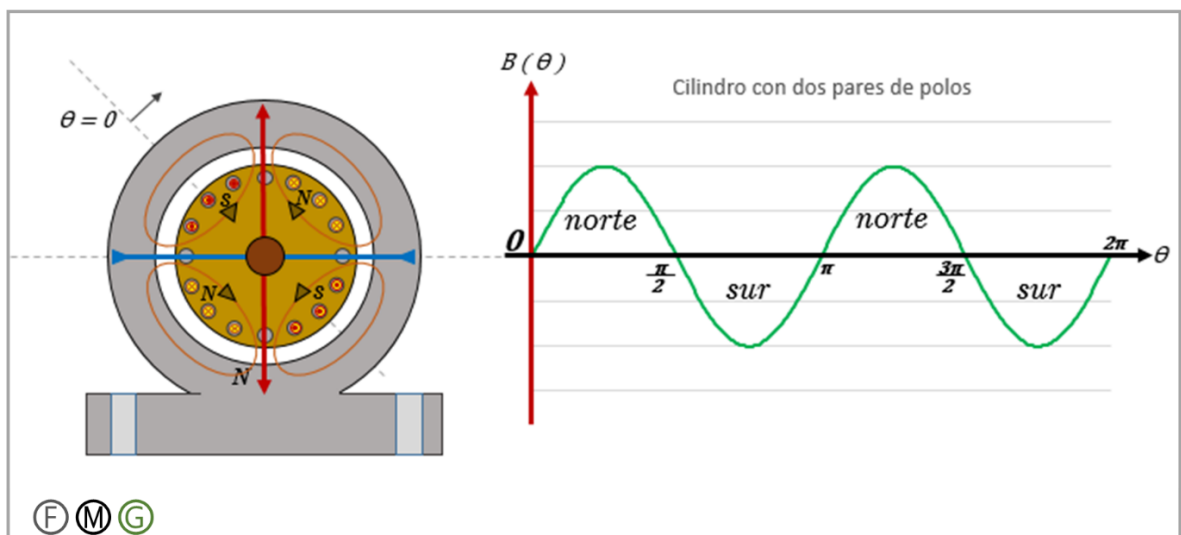


Figura 1.58. Cilindro con dos pares de polos

El rotor y el estator de una máquina deben tener siempre el mismo número de pares de polos, porque en caso contrario no es posible producir par promedio neto diferente de cero.

En la figura 1.59 se muestra un ejemplo de esta situación. En la máquina color verde los polos norte y sur intentan alinearse para reducir al mínimo posible la longitud de los enlaces de flujo y, por lo tanto, la energía almacenada en el campo. En la máquina color gris se producen pares iguales y opuestos, y por esta razón el par total sobre el eje es nulo.

En conclusión, sobre este último tema:

Las máquinas eléctricas rotativas poseen características comunes entre sí y en general se asemejan al modelo representado en la figura 1.60.

En algunas ocasiones el elemento interior de la máquina es fijo y el exterior, móvil. Incluso pueden ser móviles los dos elementos; pero lo más característico de las máquinas eléctricas rotativas es la existencia de dos superficies cilíndricas con movimiento relativo entre una y otra.

Cuando se combinan campos magnéticos ortogonales, desplazados en el espacio y producidos por corrientes balanceadas y sinusoidales desfasadas ($\pi/2$) en el tiempo, se obtienen campos magnéticos rotatorios. Estos campos permiten el giro de una distribución espacial del campo alrededor de la máquina a través del tiempo. Es posible obtener campos magnéticos rotatorios con dos, tres o más bobinas, siempre y cuando se mantengan las condiciones necesarias de simetría.

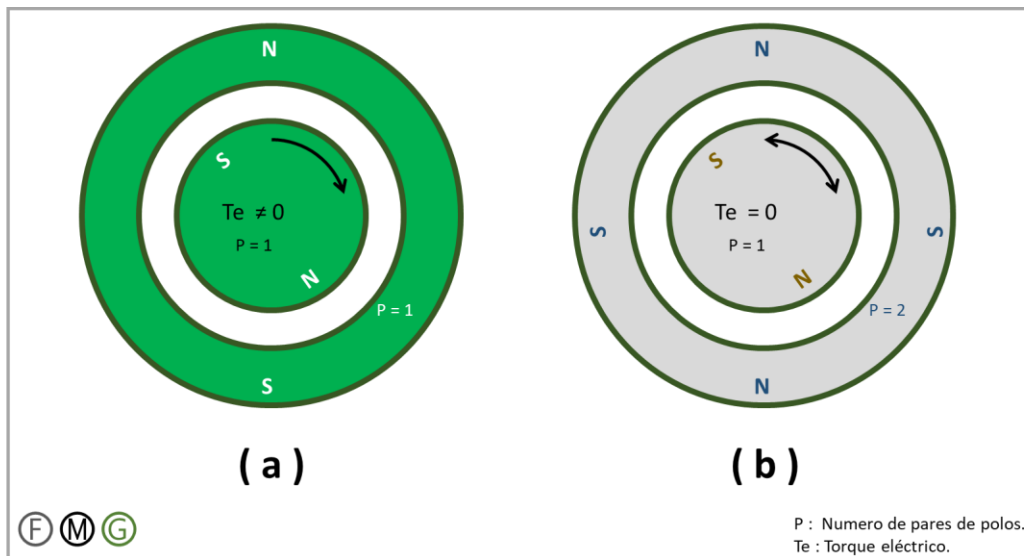


Figura 1.59. Máquina con iguales (a) y diferentes (b) números de pares de polos en el rotor y en el estator.

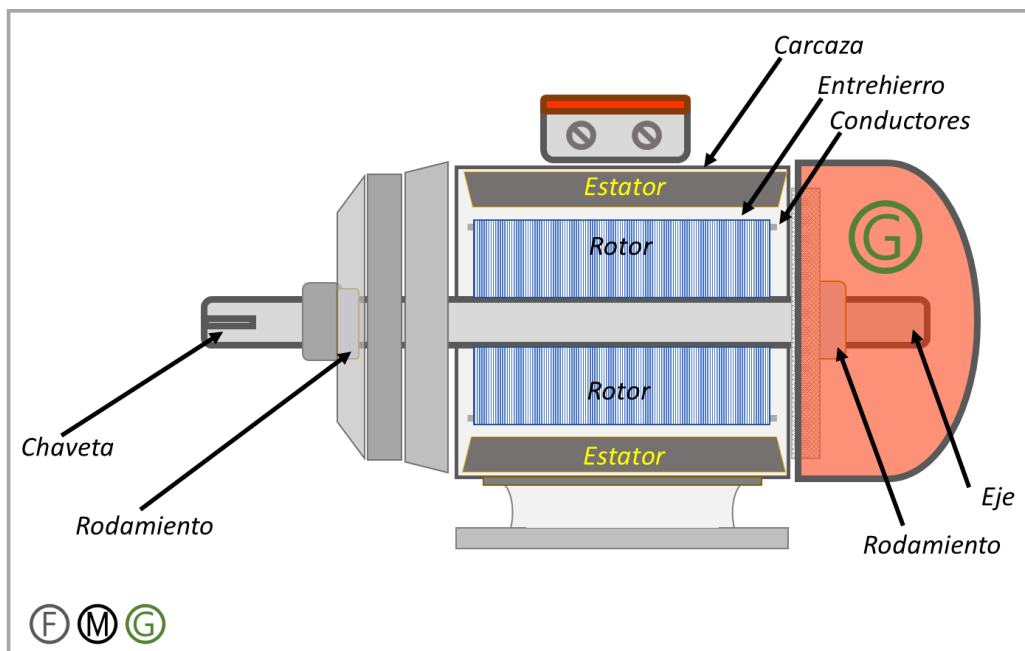


Figura 1.60. Partes de una máquina eléctrica rotativa

Nota sobre la velocidad de la maquina asíncrona:

En la máquina de inducción se fija la frecuencia de las corrientes en el estator ω_e , se produce un campo electromagnético en el entrehierro de la máquina que gira mecánicamente con la frecuencia angular de estas corrientes.

Como el rotor gira a la velocidad mecánica ω_m , los conductores del rotor cortan el campo magnético producido en el estator con una velocidad que corresponde a la diferencia entre ω_e y ω_m .

La diferencia porcentual entre estas dos velocidades se conoce como *deslizamiento de la máquina*:

$$S = \frac{\omega_e - \omega_m}{\omega_e} \times 100$$

Donde:

ω_e es conocida como la velocidad sincrónica de la maquina (velocidad angular).

ω_m es la velocidad mecánica de la máquina.

S es el deslizamiento de la máquina.

La máquina asíncrona trifásica dispone de tres devanados repartidos simétricamente en la periferia del cilindro. En la siguiente figura se representa la configuración esquemática de este tipo de máquinas, así como las tres corrientes que se han inyectado en las bobinas a, b, y c. Ver figura 1.61.

En el instante inicial las corrientes que circulan por las tres bobinas son:

$$I_a(0) = I_{max}$$

$$I_b(0) = -(1/2) I_{max}$$

$$I_c(0) = -(1/2) I_{max}$$

Y las expresiones generales de las corrientes son las siguientes:

$$I_a(t) = I * \cos(\omega t - \alpha)$$

$$I_b(t) = I * \cos(\omega t - \alpha - ((2 * \pi)/3))$$

$$I_c(t) = I * \cos(\omega t - \alpha - ((4 * \pi)/3))$$

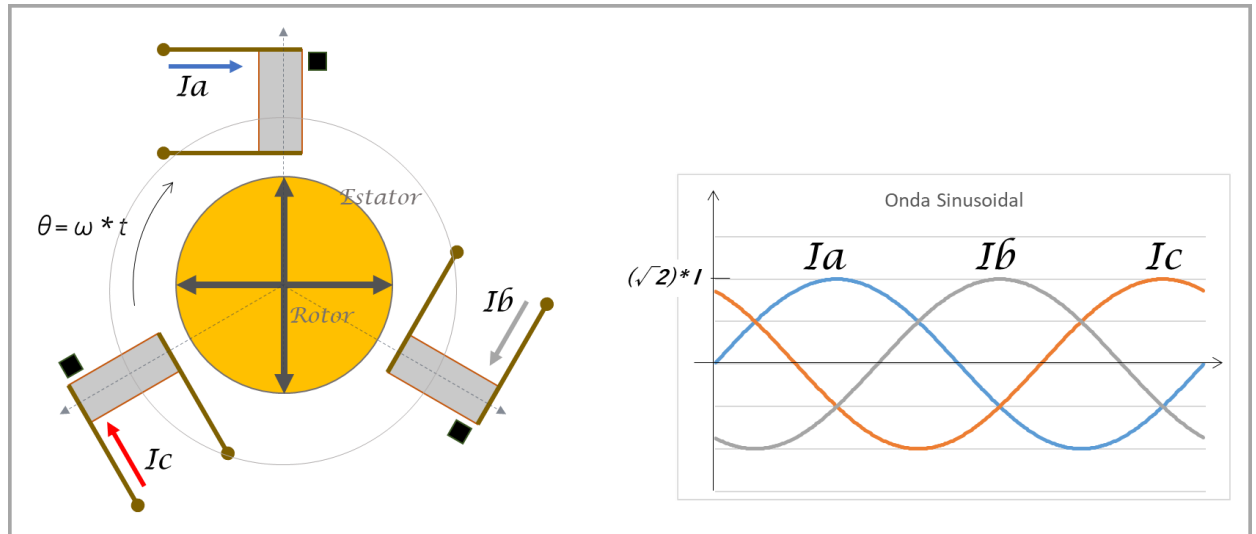


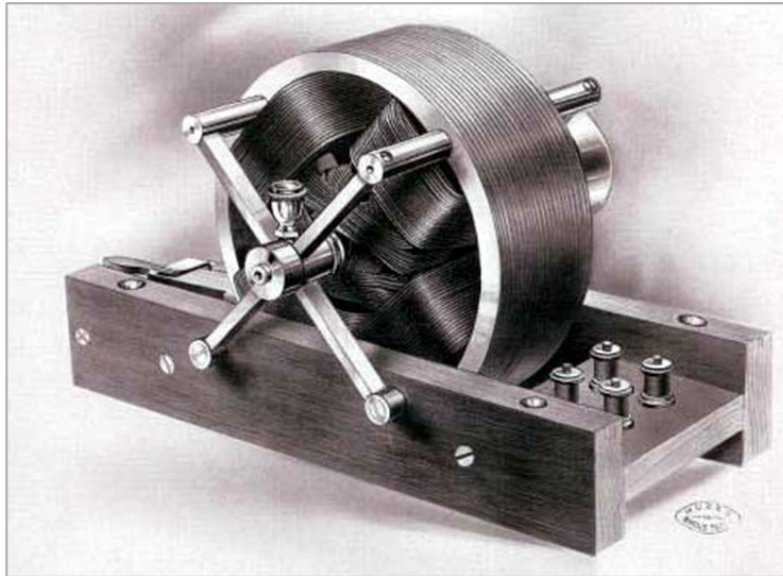
Figura 1.61. Campo Magnético Rotatorio y Corrientes de la máquina trifásica

La máquina asíncrona

La máquina de inducción es el convertidor electromecánico más utilizado en la industria. Su invención se le debe a Nikola Tesla, a finales del siglo XIX y nace como solución al problema de utilizar la corriente alterna. Ver figura 1.62

Nicola Tesla había sugerido la idea de las ventajas que poseía la corriente alterna sobre la corriente continua cuya dificultad de transmisión para la época ya comenzaban a ser evidente. La defensa de la corriente continua era realizada por Thomas Alva Edison, famoso inventor norteamericano que contaba con un inmenso prestigio.

Sin embargo, la visión comercial de *George Westinghouse, Jr.* impulsó las ideas de Nikola Tesla para la instalación de la primera gran central hidroeléctrica, que se realizó en las Cataratas del Niágara utilizando generadores de corriente alterna, que usan transformadores para elevar la tensión, transmiten mediante líneas en alta tensión y la reducen para alimentar a los *motores de inducción* que accionan la creciente carga industrial.



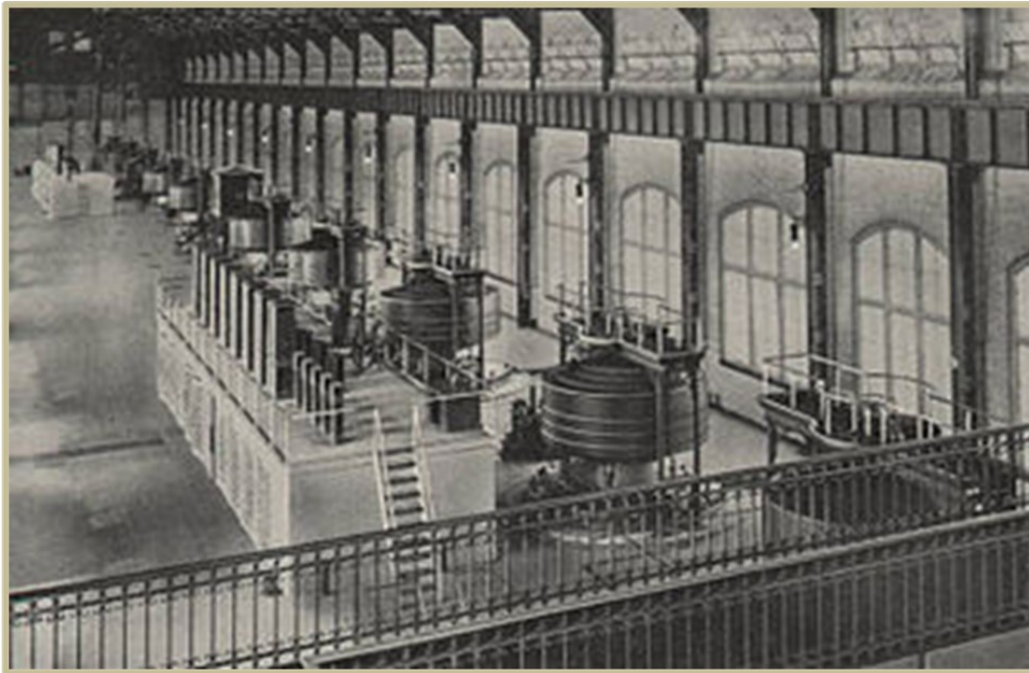
Este modelo histórico es uno de los dos que se presentaron ante el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos.

Tomado de internet
<https://forocheselectricos.com/wp-content/uploads/2014/03/tesla-ac-motor-induccion-1280x720.jpg>

Figura 1.62. *El primer motor de inducción de Nikola Tesla.*

La central hidroeléctrica es una planta generadora de energía eléctrica ubicada en Lewiston, Nueva York, cerca de las cataratas del Niágara. Pertenece y es operada por la Autoridad de Energía de Nueva York (NYPA). Ver figura 1.63.

La planta desvía el agua desde el río Niágara por encima de Niagara Falls y devuelve el agua en la parte inferior del río cerca del lago Ontario
Utiliza 13 generadores a una capacidad instalada de 2.675 MW de potencia.



Tomado de internet.

https://en.wikipedia.org/wiki/Adams_Power_Plant_Transformer_House

La central se encuentra ubicada en las cataratas del Niágara (EUA) aprovechando la gran caída de agua que hay en estas. Esta central fue la primera en construirse en todo el mundo.

Figura 1.63. La Central hidroeléctrica Robert Moses Niágara Power Plant



George Westinghouse

*Central Bridge, Schoharie, Nueva York,
6 de octubre de 1846
- Nueva York,
12 de marzo de 1914*



The Westinghouse Electric and Manufacturing Company

Figura 1.64. George Westinghouse y la planta de producción de motores de Westinghouse en el año 1905

Tomado de internet. https://www.gracesguide.co.uk/Westinghouse_Electric_and_Manufacturing_Co

Desde ese crucial momento y hasta la actualidad, la máquina de inducción ha ido copando la inmensa mayoría de aplicaciones en la industria, en el comercio y en el hogar. Ver la planta de producción Westinghouse en el año 1905 en la figura 1.64. Las razones fundamentales que justifican la aplicación masiva de la máquina de inducción hoy en día, residen en su sencillez constructiva y en la robustez que ofrecen estos convertidores durante la operación en regímenes de alta demanda.

Estos motores requieren un mantenimiento mínimo, pueden operar convenientemente en ambientes peligrosos y tienen una tasa de falla muy reducida.

También poseen algunas limitaciones tales como el ajuste de la *característica par-velocidad*, la *alta intensidad de las corrientes durante el arranque*, la *regulación de velocidad y el rendimiento*.

Estas limitaciones han sido resueltas o mejoradas con diseños ingeniosos o incorporando controladores electrónicos de potencia.

En las siguientes figuras 1.65 y 1.66 se muestra un despiece de la máquina de inducción, la cual es de las del tipo de rotor de jaula de ardilla, en donde se indican las principales partes constitutivas.

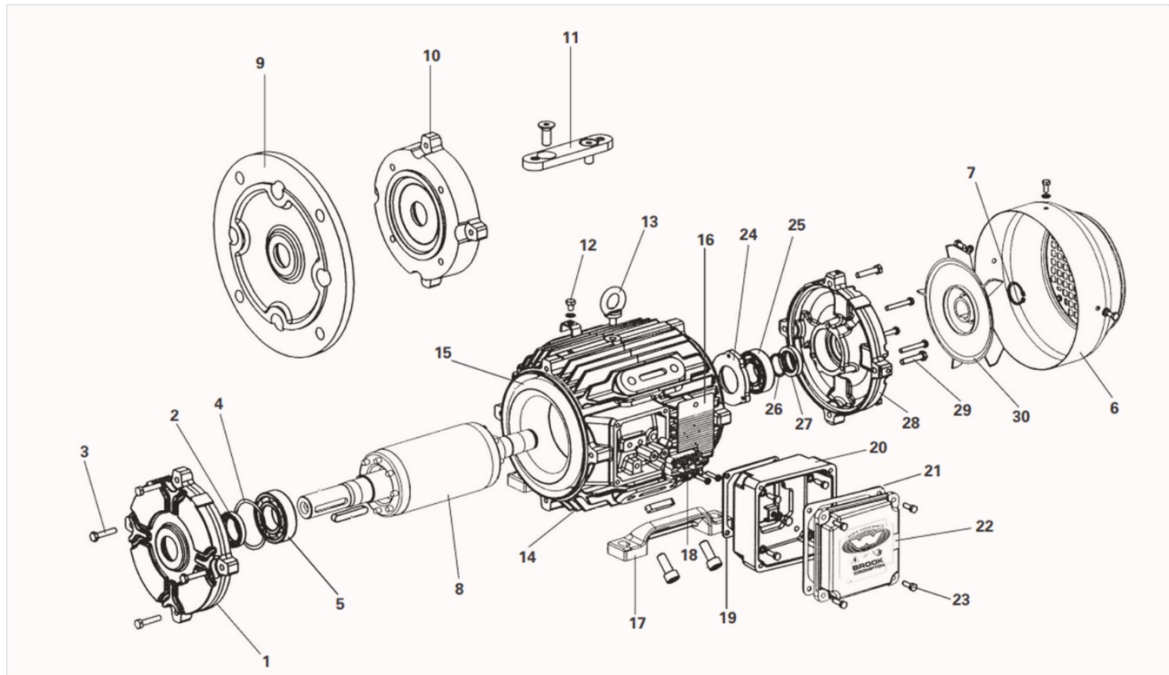


Figura 1.65. Hardware principal de la maquina asíncrona.

Tomado de internet. <https://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>

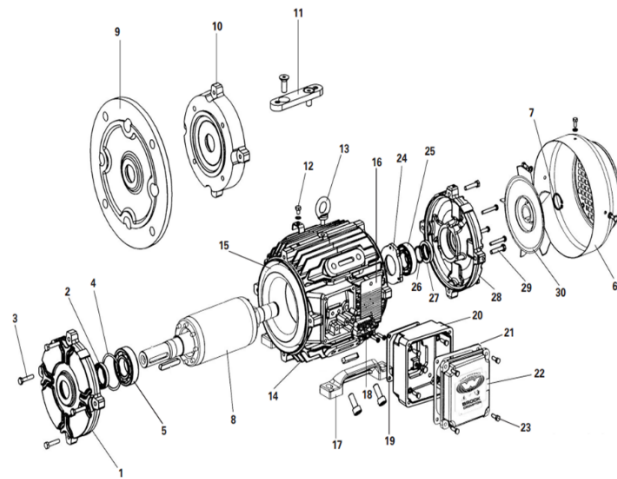


Figura 1.66. Hardware principal de la maquina asíncrona. Identificación del despiece.

Hardware Principal de la Maquina Sincrona	
ITEM	Nombre del elemento
1	Escudo frontal - Lado salida eje de transmisión.
2	Sello lubricado del extremo de trasmisión.
3	Tornillos de fijación del extremo del escudo frontal.
4	Arandela de precarga
5	Accionamiento y rodamiento.
6	Cubierta del ventilador.
7	Anillo de seguridad del ventilador.
8	Ensamble del Rotor.
9	Escudo final tipo brida
10	Escudo final tipo tapa plana
11	Perno y almohadilla
12	Terminal para tierra.
13	Cáncamo
14	Ensamble del estator con y sin soportes tipo pie.
15	Devanado del estator.
16	Placa de información
17	Pie tipo multmontaje
18	Bomera
19	Empaque para la caja de la bomera
20	Caja para la bomera
21	Empaque para la tapa de la caja de la bomera
22	Tapa para la caja de la bornera
23	Tornillos de fijación de la tapa de la bornera
24	Rodamiento interno del escudo de la cara del lado ventilador
25	Cojinite de extremo no motor
26	Anillo de seguridad
27	Sello del cojinete del lado no motor.
28	Escudo final del lado no motor.
29	Tornillos de fijación del escudo del lado no motor.
30	Helice ventilador

Tomado de internet. <https://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>

En una máquina asíncrona de inducción convencional toda la energía eléctrica fluye hacia o desde el estator.

Los flujos producidos por las corrientes del estator generan un campo magnético rotatorio que corta a los conductores del rotor y de esta forma se obtiene sobre ellos fuerza electromotriz inducida que es utilizada para forzar la circulación de corrientes en el rotor.

Al interactuar el campo magnético rotatorio del estator con el campo magnético rotatorio originado por las corrientes que circulan en el rotor, se produce el par eléctrico.

La máquina de inducción se alimenta con corriente alterna trifásica en el estator; de esta forma se produce el campo magnético rotatorio que posee una amplitud constante en el tiempo, pero varía en el espacio.

La velocidad de giro del campo magnético rotatorio está definida por la frecuencia de las corrientes inyectadas en el estator de la máquina.

Además, para que una máquina de inducción produzca par eléctrico medio diferente de cero, debe satisfacerse la siguiente condición (Ver siguiente figura 1.67):

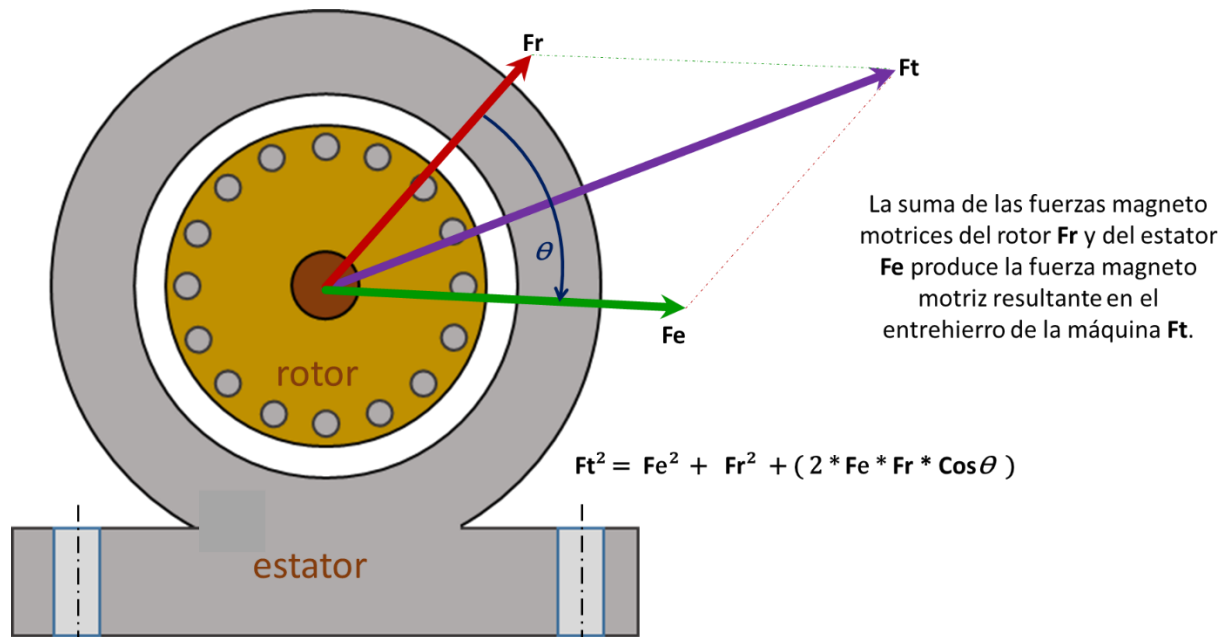


Figura 1.67. Fuerza magneto motriz resultante en el entrehierro de la máquina

$$F_t^2 = F_e^2 + F_r^2 + (2 * F_e * F_r * \cos \theta)$$

Donde:

Fe: Fuerza magneto motriz del estator

Fr: Fuerza magneto motriz del rotor

Ft: Fuerza magneto motriz resultante en el entrehierro de la máquina

Como ya hemos visto a lo largo de este estudio la máquina de inducción es un convertidor rotatorio electromecánico de energía que puede operar como:

- Motor.
- Generador.
- Freno.

Estas tres condiciones o zonas de operación se corresponden con rangos diferentes del deslizamiento (este concepto se verá más adelante).

En la operación como motor la máquina entrega par y potencia en el eje mecánico, consumiendo potencia en el eje eléctrico.

En la condición de generador ocurre la situación inversa: se absorbe potencia y par del eje mecánico y se entrega potencia por el eje eléctrico.

Y en la condición de frenado ambos ejes introducen potencia al convertidor, la cual es quemada en pérdidas.

A continuación, se amplía un poco más lo referente a estas tres zonas.

En la siguiente figura se presenta el esquema básico de las bobinas de una máquina de inducción cuyo rotor y estator son trifásicos.

En general el modelo se puede establecer para un número general de fases en el estator y otro en el rotor.

Pero como la mayoría de los motores de inducción de uso industrial son trifásicos en el estator, vamos a tocar el tema donde el rotor y el estator son trifásicos. Normalmente las bobinas rotóricas se encuentran en cortocircuito y en el estator se aplica un sistema trifásico y balanceado de tensiones sinusoidales. En los modelos convencionales de la máquina de inducción se desprecian los efectos que produce el ranurado, la distribución de los devanados, las excentricidades estáticas y dinámicas y en ciertos casos las pérdidas en el hierro y las pérdidas mecánicas. *La máquina de inducción trifásica.*

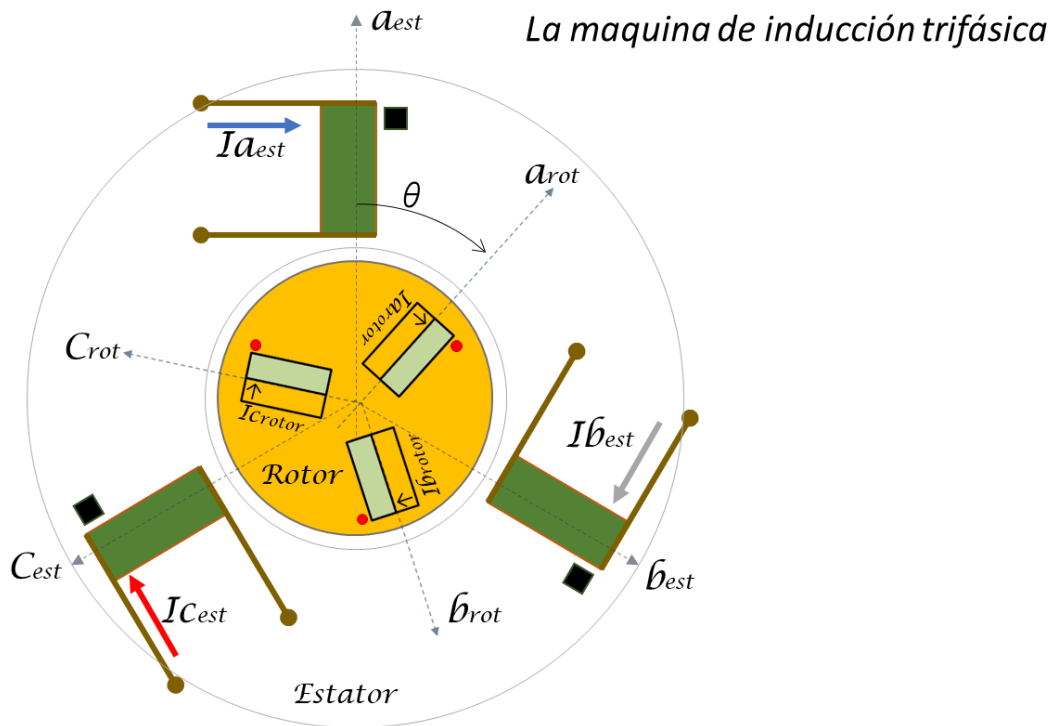


Figura 1.68. Diagrama esquemático de las bobinas de una máquina de inducción trifásica en el rotor y estator.

En el funcionamiento del motor, el bobinado del estator se suministra con un voltaje trifásico. Las corrientes fluirán por cada fase del bobinado.

Estas corrientes están desplazadas entre sí por 120° .

Considere además diagrama simplificado de tres bobinas de la figura 1.68, en donde se muestra una bobina para cada fase del estator y con solo dos polos de trabajo.

La corriente que fluye a través de cada fase creará un campo magnético con una polaridad en la dirección de su eje magnético (la regla del electromagnetismo de la mano derecha) el cual se dé la bobina a 90° .

Debido a la forma de onda alterna de la corriente aplicada, la fuerza magnetomotriz de cada fase también oscila entre un máximo positivo y negativo.

En las gráficas vemos que, aunque cada uno de los tres vectores de la fuerza magnetomotriz es estacionario, el campo magnético resultante parece girar.

Durante los siete instantes del tiempo mostrado, la fuerza magneto motriz resultante es constante y gira una vuelta. El número de polos corrobora esto para el recorrido de un ciclo de la primera onda color azul. Ver figura 1.69. Ver detalle de cada tiempo en las figuras 1.70, 1.71, 1.72, 1.73, 1.74, 1.75, 1.76 y en el esquema consolidado en la figura 1.77.

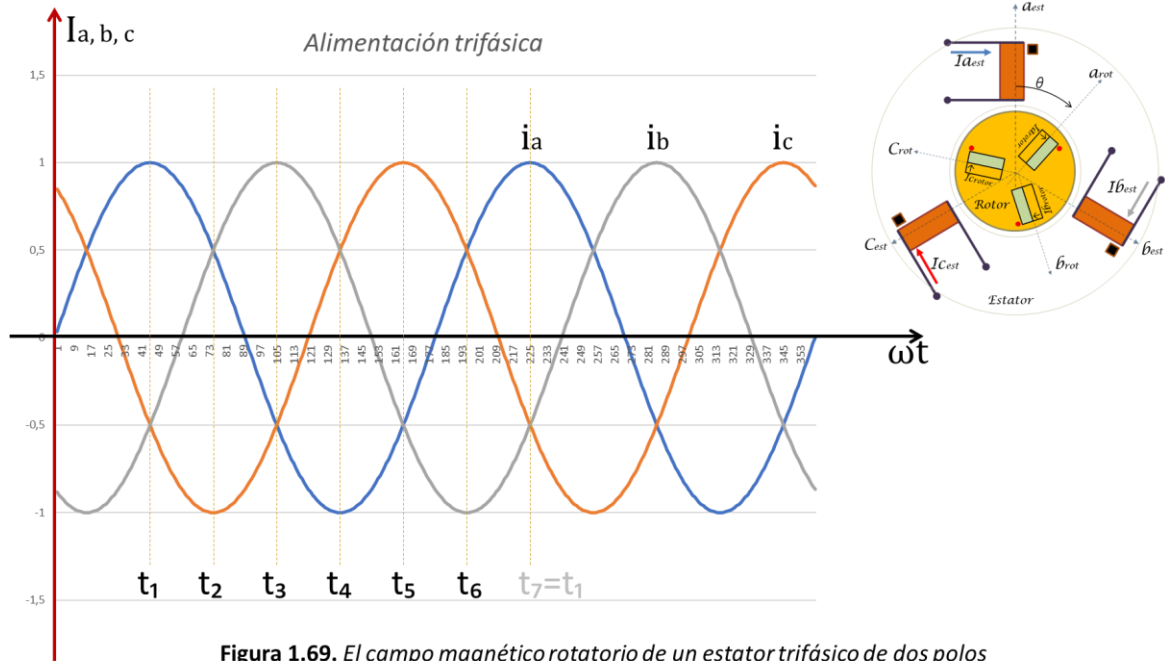


Figura 1.69. El campo magnético rotatorio de un estator trifásico de dos polos

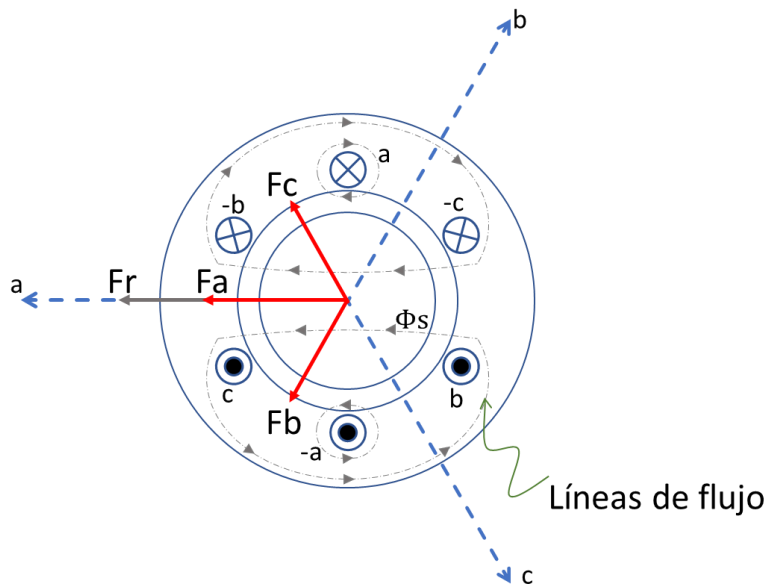


Figura 1.70. Análisis del tiempo t_1

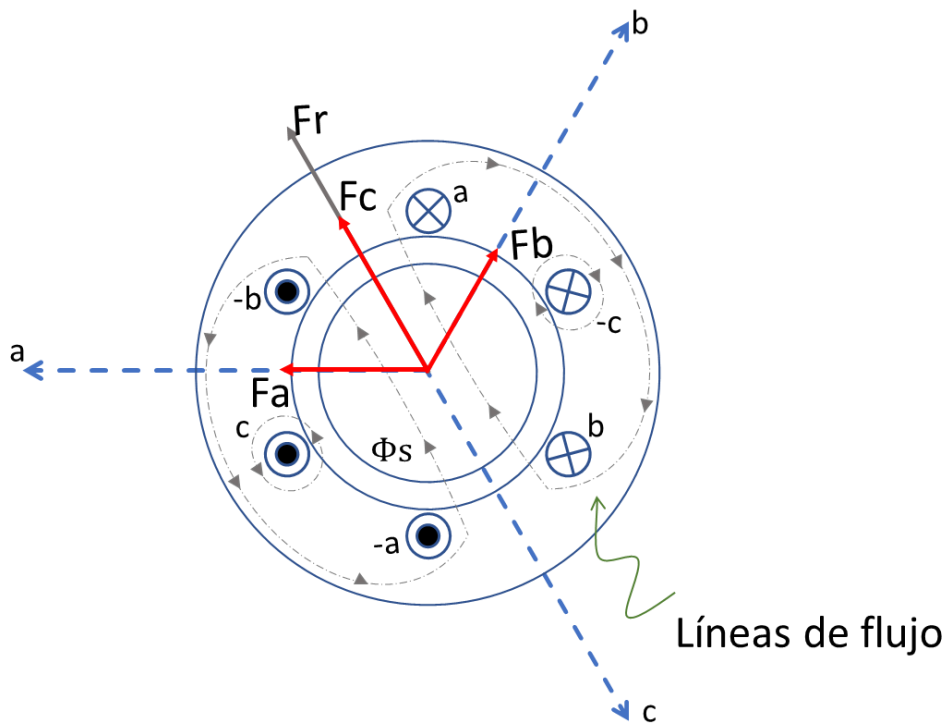


Figura 1.71. Análisis del tiempo t_2

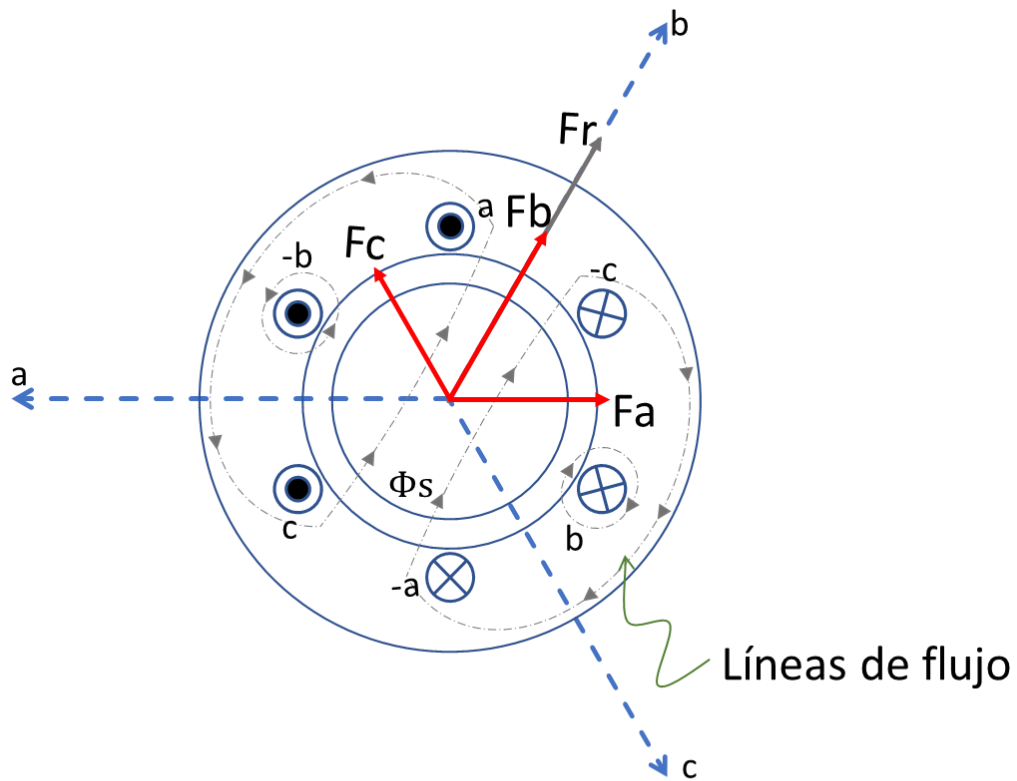


Figura 1.72. Análisis del tiempo t_3

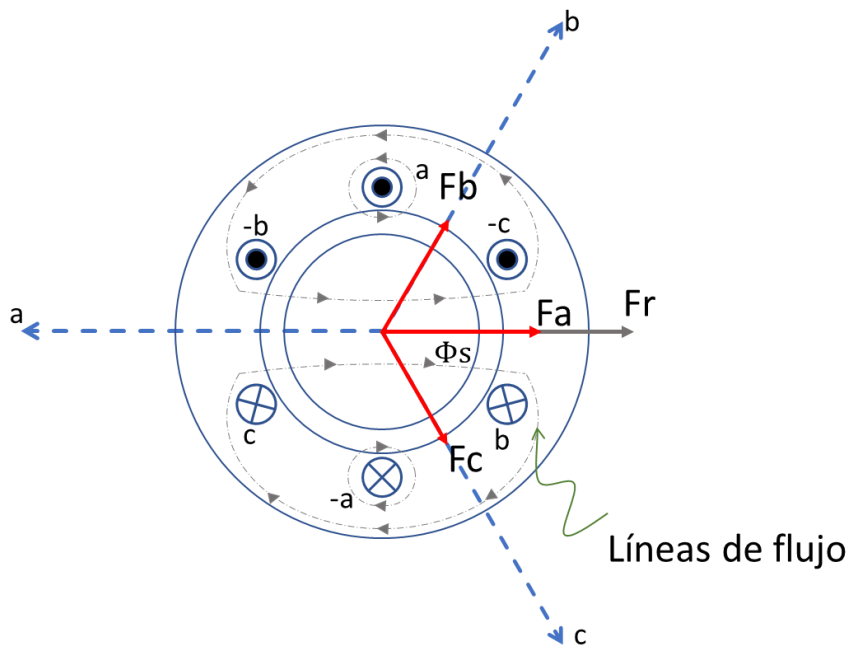


Figura 1.73. Análisis del tiempo t_4

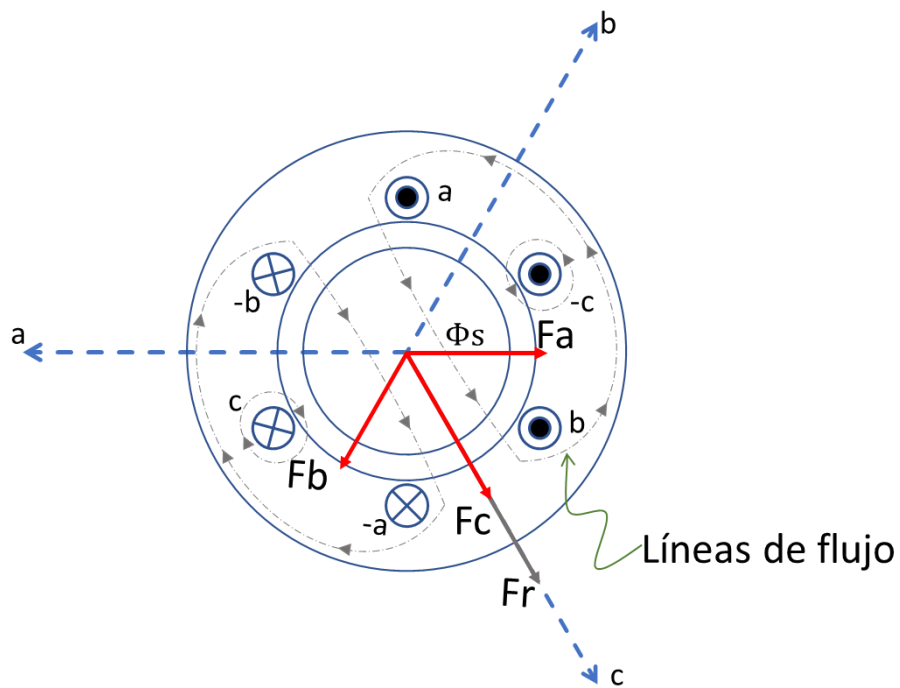


Figura 1.74. Análisis del tiempo t_5

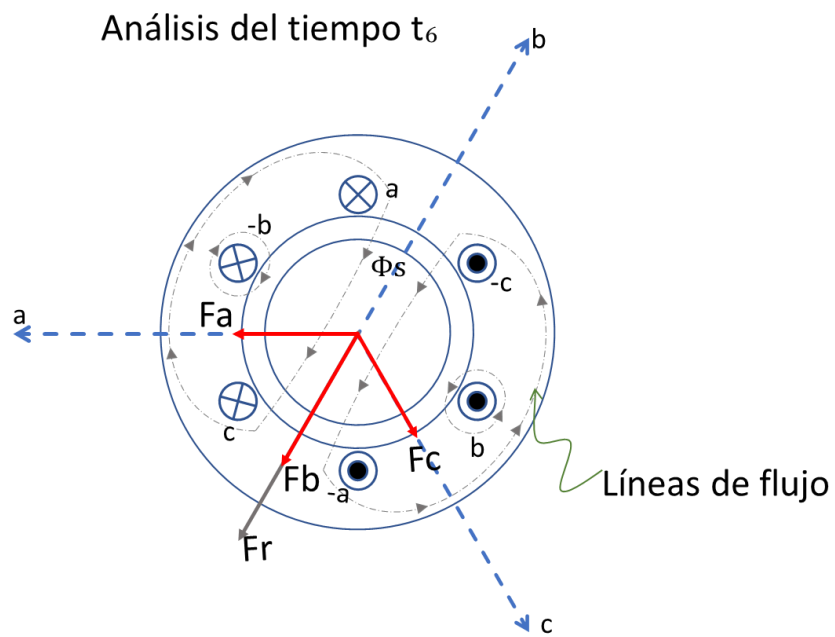


Figura 1.75. Análisis del tiempo t_6

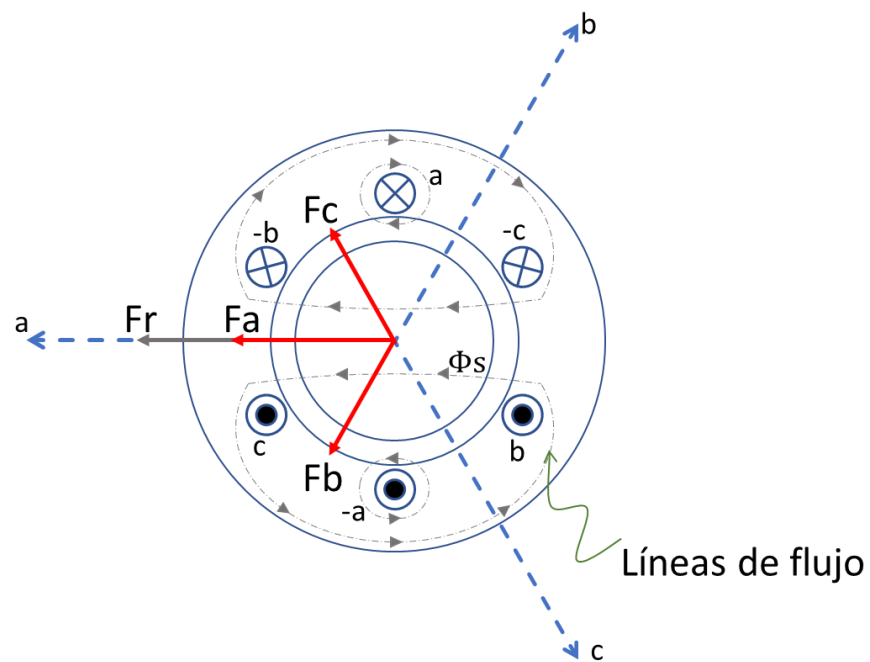


Figura 1.76. Análisis del tiempo $t_7 =$ Análisis de tiempo t_1

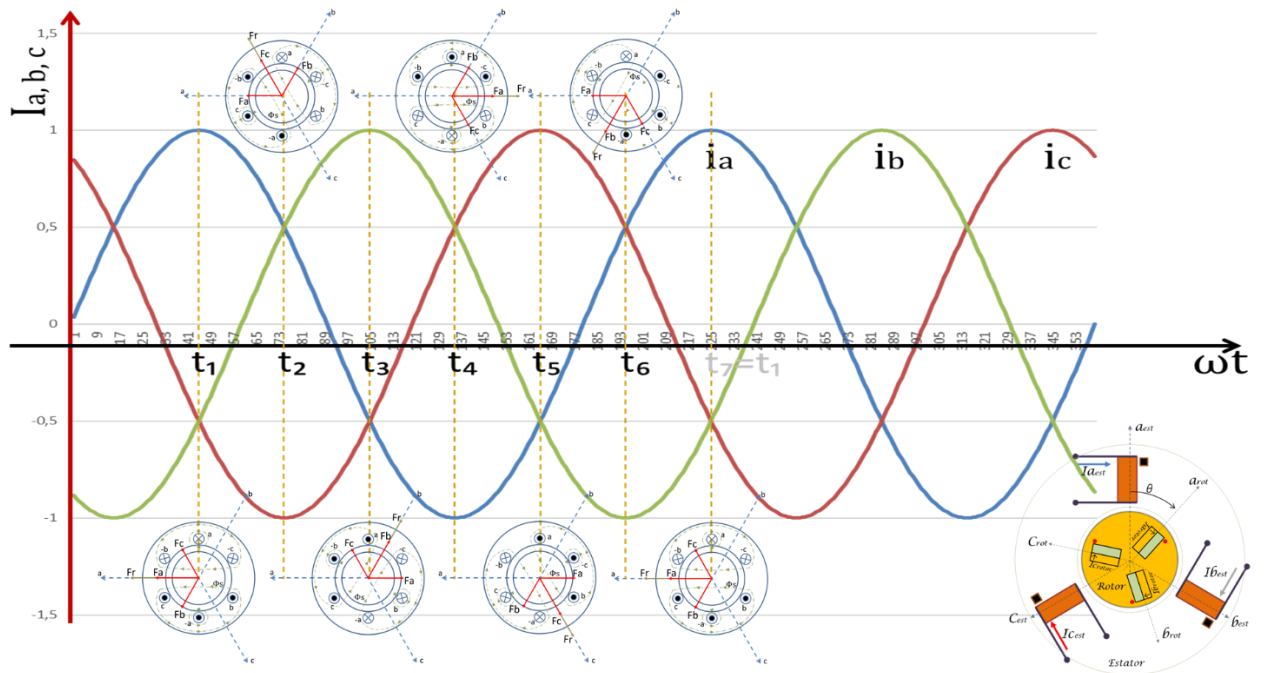


Figura 1.77. Esquema consolidado. El campo magnético rotatorio de un estator trifásico de dos polos

Si se acerca una brújula en el eje de la máquina asíncrona, esta girará a la misma velocidad que el campo magnético: En el caso de un motor de dos polos conectado a una rejilla de frecuencia 60 Hz, la velocidad del campo giratorio será de 3600 rpm. Si se aumenta el número de polos, por ejemplo, a cuatro polos, la aguja gira sólo la mitad de la distancia que antes durante un ciclo de la frecuencia de suministro. Esto implica que la velocidad del campo giratorio es inversamente proporcional al número de pares de polos y proporcional a la frecuencia del voltaje de suministro. Ver figura 1.78.

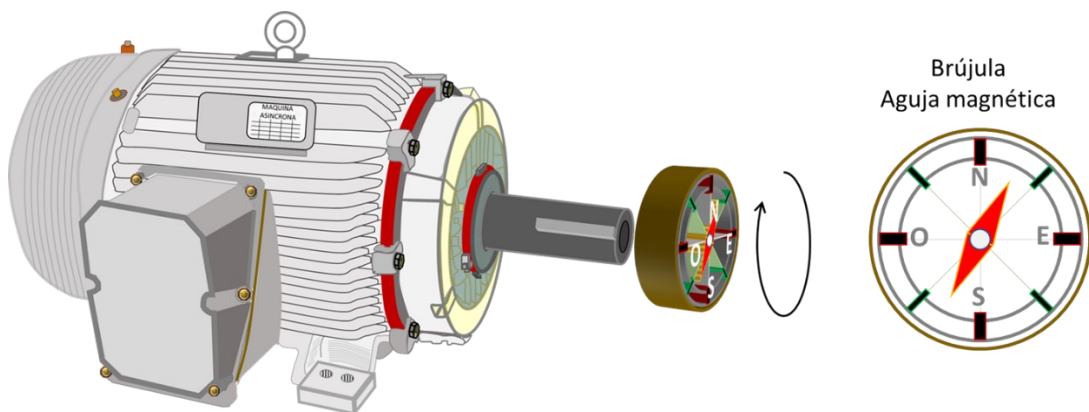


Figura 1.78. El campo magnético rotatorio de un estator trifásico. La brújula gira en el sentido del campo giratorio resultante entre el estator y el rotor.

Velocidad del campo giratorio: Es inversamente proporcional al número de pares de polos y proporcional a la frecuencia del voltaje de suministro. Ver figura 1.79.

Velocidad de Sincronismo (rps) → $n_s = \frac{fe}{P}$ ← Frecuencia de la RED de suministro de energía. (Hz)

← Número de pares de Polos

Figura 1.79. Fórmula para la velocidad de sincronismo en revoluciones por segundo (rps).

Esto implica que la velocidad de rotación del campo es inversamente proporcional al número de pares de polos y proporcional a la frecuencia del voltaje de suministro. También es importante anotar acá que, al cambiar la secuencia de fase del voltaje de suministro, mediante el intercambio de cualesquiera de dos de los cables de corriente, el campo rotará en la dirección contraria y con esto se invierte la rotación del motor de inducción trifásico. Ver figura 1.80.

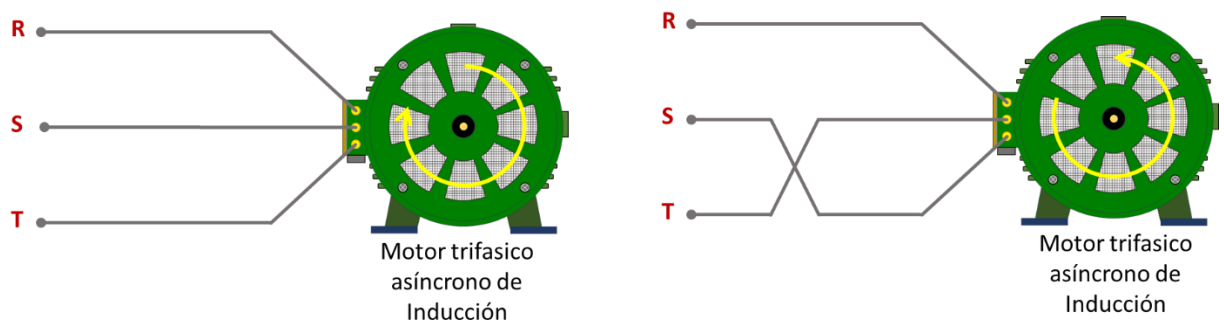


Figura 1.80. La inversión de fase en un motor trifásico ⇒ la inversión de rotación del eje mecánico

Deslizamiento y velocidad del Rotor.

En la máquina asíncrona trifásica de inducción, el campo magnético giratorio ϕ_s creado por el estator, cruza las barras del rotor (estando este detenido) e induce una corriente sobre estas barras.

Y estando el rotor detenido, la frecuencia del voltaje inducido es la misma que la del campo magnético giratorio.

En la maquina asínrona trifásica con jaula de ardilla las barras están en corto circuito y por ello la corriente inducida circulará por el rotor y producirá a su vez una onda de flujo electromagnético rotatorio ϕ_r similar al del estator.

Los campos del estator y del rotor se interfieren entre sí y el campo resultante crea una fuerza uniforme o torque uniforme sobre las barras del rotor. El torque sobre el rotor hará que este gire y además va dirigido de tal forma que gira en la misma dirección del campo rotatorio del estator.

Podemos decir entonces decir que el rotor sigue el campo rotatorio principal del estator tratando de alcanzarlo.

En la figura 1.81 la parte de la izquierda se muestra el campo de estator que se supone que está girando en el sentido de las agujas del reloj. El movimiento relativo del rotor con respecto al estator es *antihorario*.

Mediante la aplicación de la regla de la mano derecha, la dirección de la f.e.m. inducida en el rotor se encuentra hacia afuera. Por lo tanto, la dirección del flujo debido a la corriente del rotor por sí solo, se muestra en la figura del centro. Ahora, aplicando la regla de la mano izquierda, o por el campo resultante por el efecto combinado está claro que los conductores del rotor experimentan una fuerza que tiende a girarlos en el sentido de las agujas del reloj. Por lo tanto, en el rotor se establece una rotación en la misma dirección que la del flujo de estator (o de campo) (parte derecha de la figura 1.81 y la figura 1.82).

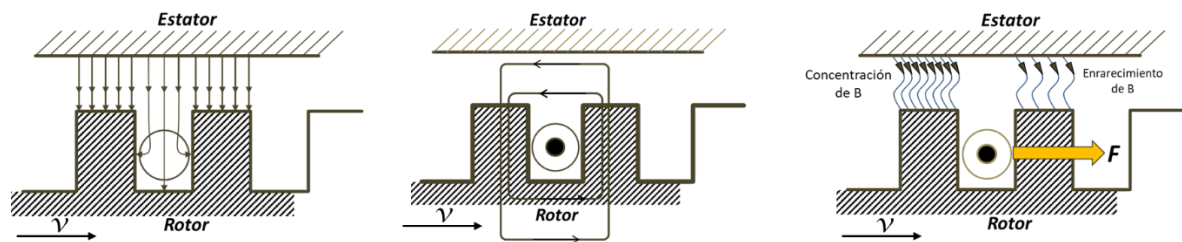


Figura 1.81. Deformación de las líneas de campo en el entrehierro

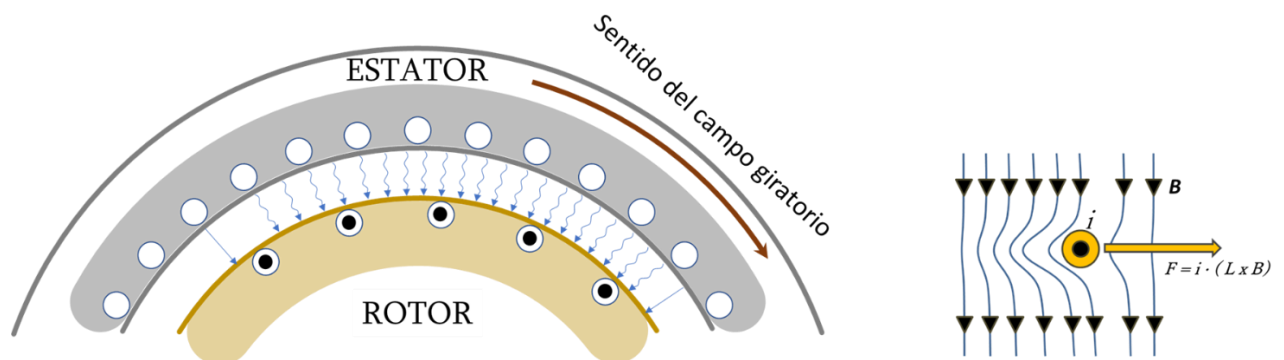


Figura 1.82. Recorrido del flujo electromagnético

Sin embargo, siempre debe haber un movimiento relativo entre el campo giratorio del estator y las barras del rotor, puesto que, si el rotor gira a la misma velocidad que el campo rotatorio, es decir, a una velocidad sincrónica, los conductores del rotor ya no serían cortados por las líneas de flujo y como consecuencia, no habría corriente inducida ni campo de rotor correspondiente y, por lo tanto, no habría par.

Es por esto que, la máquina de inducción también se llama máquina asíncrona ya que el rotor debe girar por debajo (o por encima) de la velocidad sincrónica para producir un par electromagnético.

Incluso si el motor funciona con la carga desacoplada, se requiere un pequeño par para superar la fricción y otras pérdidas de la máquina y con esto el rotor girará ligeramente por debajo de la velocidad sincrónica.

La diferencia entre la velocidad sincrónica n_s y la velocidad del rotor n_r se denomina velocidad del deslizamiento n_{d} y representa la velocidad del campo giratorio visto desde el rotor. Relacionando n_{d} con la velocidad sincrónica obtenemos el llamado deslizamiento S :

$$n_{\text{d}} = n_s - n_r$$

VELOCIDAD DEL
DESLIZAMIENTO

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

DESLIZAMIENTO

$$n_s = \frac{f_e}{P}$$

VELOCIDAD
SINCRONICA

El deslizamiento S puede ser negativo, es decir, la velocidad del rotor n_r puede estar por encima de la velocidad sincrónica; allí la máquina funciona como un generador impulsado por una turbina y genera corriente eléctrica en los devanados del estator. La combinación de las tres fórmulas anteriores nos conduce a lo siguiente:

$$f_e = \frac{P \times n_r}{1 - S}$$

FRECUENCIA
DEL ESTATOR

Voltaje y frecuencia inducidos:

La frecuencia del voltaje y de la corriente del rotor depende de la velocidad de deslizamiento n_{d} .

Es igual a la frecuencia del estator o de la red en reposo, porque la velocidad de rotación del campo magnético es la misma para los devanados del estator y del rotor.

Con el rotor puesto en movimiento, la frecuencia del rotor f_r varía proporcionalmente a n_{d} .

$$f_r = \frac{f_e \times n_{\text{d}}}{n_s}$$

FRECUENCIA
DEL ROTOR

f_r : Frecuencia del rotor en Hz (note que se trata de la frecuencia eléctrica del voltaje y de la corriente del rotor, no de la velocidad de rotación del rotor.

f_e : Frecuencia eléctrica de la red en Hz, es decir, la frecuencia del suministro de energía eléctrica tanto en voltaje como en corriente.

S : Deslizamiento

Se aplica una fórmula similar para el voltaje inducido del rotor:

En reposo, cuando el rotor está quieto, el campo magnético giratorio barre las barras del rotor a su velocidad máxima y luego, cuando adquiere rotación, el voltaje inducido disminuye proporcionalmente y llega a cero cuando el rotor gira a velocidad síncrona. Por lo tanto, el voltaje inducido del rotor se escribe así:

$$U_r = s \times U_{rsc}$$

VOLTAJE INDUCIDO
EN EL ROTOR

Donde U_{rsc} corresponde al voltaje inducido en el rotor, estando la maquina asíncrona detenida en condiciones de Rotor bloqueado.

El Circuito equivalente de la maquina asíncrona.

Una máquina de inducción asíncrona se parece en muchos aspectos a un transformador.

Como en un transformador, dos (o más) circuitos eléctricos, es decir, los devanados del estator y los devanados o barras del rotor, están acoplados por medio de un campo magnético para que la energía eléctrica se pueda transmitir de un circuito al otro.

La máquina de inducción va incluso más lejos que el transformador ya que el circuito del rotor es libre de moverse continuamente con respecto al circuito del estator estacionario y la energía se transforma de eléctrica a mecánica (motor) o viceversa (operación del generador).

Observemos primero el circuito del rotor (por fase). La tensión inducida U_r solo está limitada por la impedancia del rotor Z_r . Esta impedancia se compone de dos componentes: la resistencia del rotor R_r y la reactancia de fuga $X_{\sigma r}$.

La reactancia de fuga representa la parte del campo magnético (creado por la corriente del rotor) que no se vincula con el devanado del estator. Y dado que la reactancia es una función de la frecuencia ($X = 2 \times \pi \times f \times L$), la reactancia de fuga es proporcional al deslizamiento:

$$X_{\sigma r} = s \times X_{\sigma rsc}$$

Donde $X_{\sigma rsc}$ corresponde a la reactancia de rotor bloqueado. SC significa corto circuito

Si asumimos que la reactancia de fuga y la resistencia están conectadas en serie, la impedancia del rotor se vuelve:

$$Z_r = \sqrt{(R_r^2 + (s^2 \times X_{\sigma rsc}^2))}$$

Y la corriente del rotor es:

$$\Rightarrow I_r = U_r / Z_r$$

$$\Rightarrow I_r = \frac{S U_{rsc}}{\sqrt{(R_r^2 + (S^2 \times X_{\sigma rsc}^2))}}$$

La figura 1.83 muestra el diagrama del rotor que comprende la resistencia R_r y la reactancia $X_{\sigma r}$

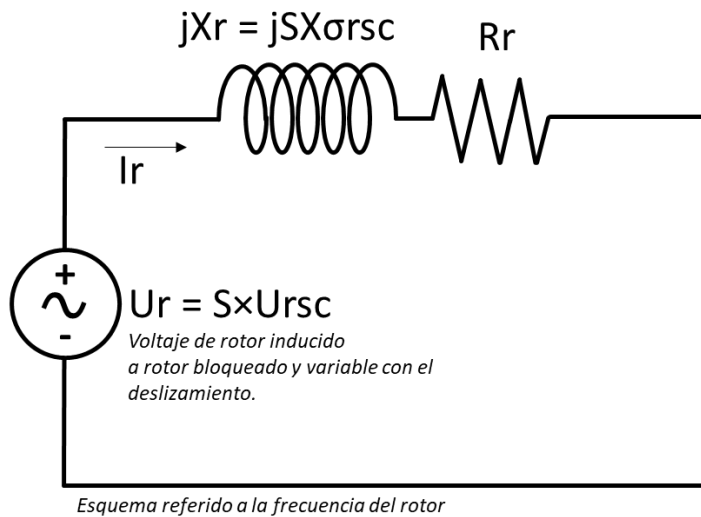


Figura 1.83. Representación eléctrica del rotor, el cual comprende la resistencia R_r y la reactancia $X_{\sigma r}$.

Y si dividimos tanto el numerador como el denominador por el deslizamiento, obtenemos lo siguiente:

$$\Rightarrow I_r = \frac{U_{rsc}}{\sqrt{((R_r/S)^2 + (X_{\sigma rsc}^2))}}$$

La anterior ecuación representa una corriente de rotor que es impulsada por el voltaje de rotor bloqueado U_{rsc} el cual posee la frecuencia de línea, es decir, la misma que la frecuencia del estator.

La resistencia variable (R_r / S) se puede dividir en dos componentes R_r y $R_r ((1-S) / S)$

Lo anterior para obtener el circuito equivalente del rotor en el que el voltaje U_{rsc} es constante y la impedancia del rotor contiene todos los efectos de la variación del deslizamiento.

Si bien el primer componente representa las pérdidas de cobre del devanado o de las barras del rotor, el segundo componente variable es la parte del rotor que desarrolla potencia cuando la corriente I_r fluye a través de él.

El diagrama del circuito del rotor correspondiente con los elementos resistivos separados se muestra en la siguiente figura 1.84.

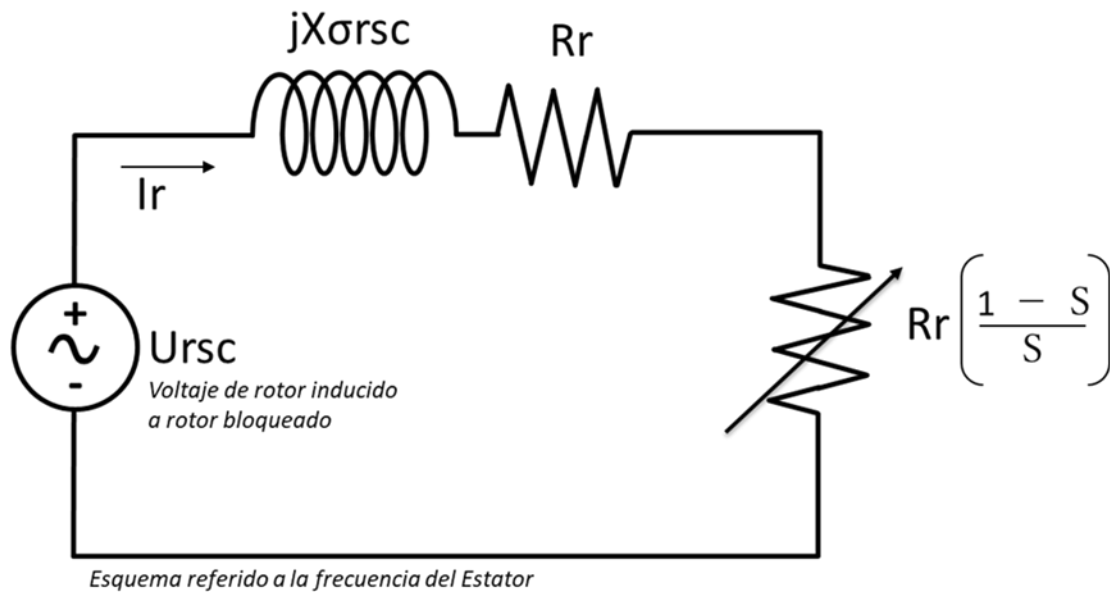


Figura 1.84. Diagrama del circuito del rotor correspondiente con los elementos resistivos separados

A partir del diagrama de la figura, ahora podemos describir el flujo de energía desde y hacia el rotor en modo por fase (para el funcionamiento del motor):

⇒ Potencia de entrada del rotor (*electromagnética*) = Pérdidas de cobre del rotor + Potencia desarrollada por el rotor (*mecánica*)

$$\Rightarrow \left[I_r^2 \times (R_r/s) \right] = \left[I_r^2 \times R_r \right] + \left[I_r^2 \times R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) \right]$$

Es importante tener en cuenta que la energía suministrada al rotor se encuentra en forma de energía magnética transmitida a través del espacio de aire entre el estator y el hierro del rotor (Ver la figura 1.85).

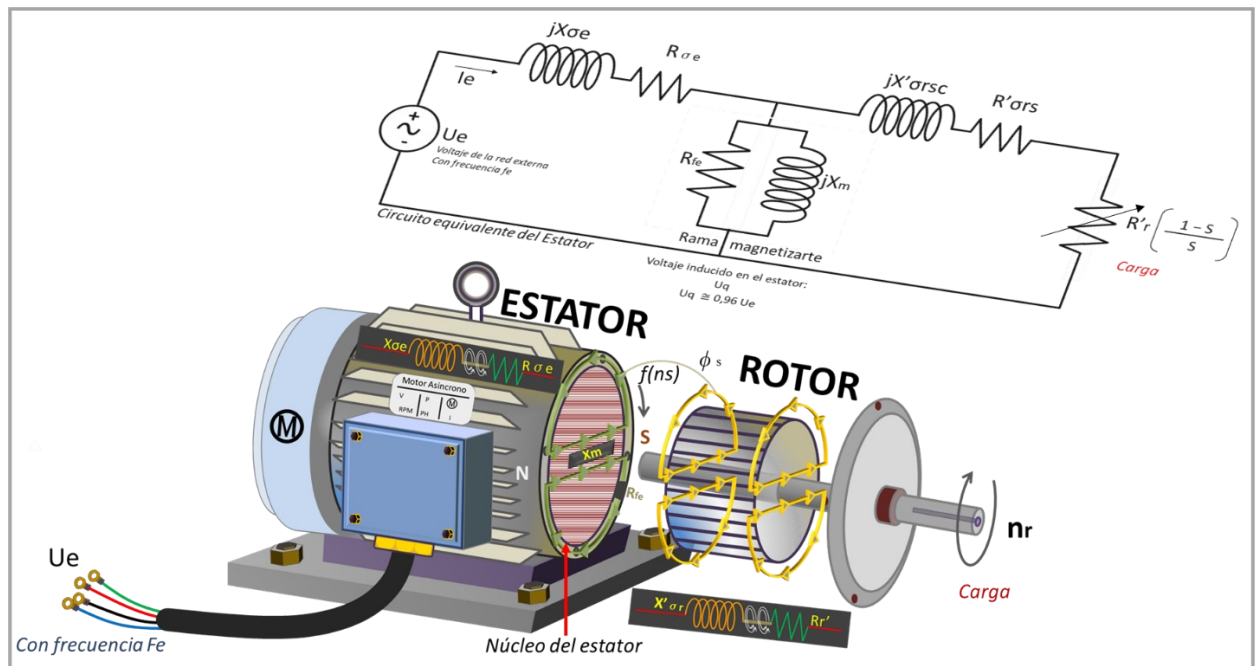


Figura 1.85. Circuito equivalente completo del motor
Maquina asincrona trifásica
Incluye estator y rotor.

Y para llegar a la potencia de entrada total (eléctrica) de la máquina, se deben agregar las pérdidas en el circuito del estator. Ver figura 1.86.

El devanado de fase del estator con la resistencia R_e y la reactancia de fuga $X_{\sigma e}$, también tiene una rama magnetizante con la reactancia X_m y un elemento resistivo, la pérdida de núcleo R_{fe} .

La potencia suministrada a la rama de magnetización se utiliza en gran parte para configurar el campo magnético (alineando el eje magnético del material ferromagnético a la polaridad alterna) representado por la reactancia X_m . Depende de la calidad del material del núcleo (curva de magnetización incl. Saturación) pero también del entrehierro. Un gran espacio de aire aumenta los requisitos de potencia reactiva para generar el campo magnético.

La otra parte de la potencia a suministrar a la rama de magnetización es un componente de potencia activa o real y se utiliza para compensar las pérdidas debidas a las corrientes parásitas y las pérdidas por histéresis en el núcleo (hierro del estator). La siguiente figura muestra el diagrama de circuito equivalente del estator.

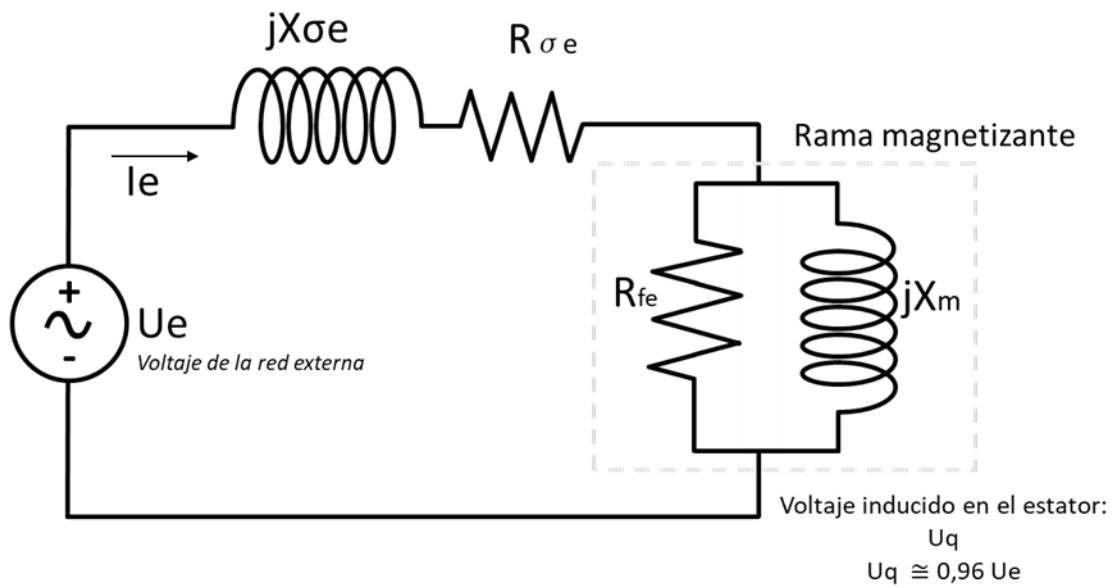


Figura 1.86. Circuito equivalente del estator.

Ahora queda combinar los diagramas de rotor y estator para obtener un diagrama de circuito equivalente para un motor de inducción por fase. Ver figuras 1.87, 1.88 y 1.89.

Combinando los diagramas anteriores vemos que los dos circuitos son compatibles si $U_{rsc} = U_q$.

Sin embargo, este es solo el caso si la relación de vueltas de los devanados del estator y del rotor es la misma.

Por lo tanto, todos los parámetros del rotor se refieren a cantidades de estator utilizando la relación de vueltas.

Las cantidades referidas al estator del circuito del rotor se denominan R_r' , $X_{\sigma r}'$, I_r' , etc.

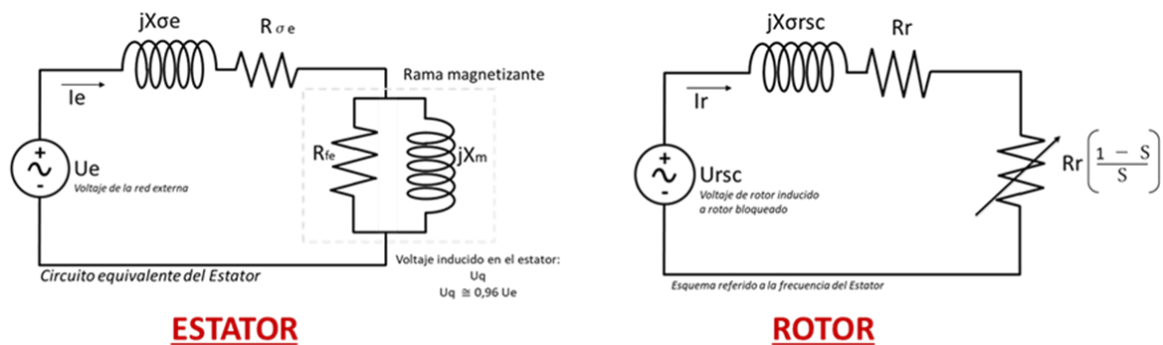


Figura 1.87. Diagramas de Estator y Rotor separados.

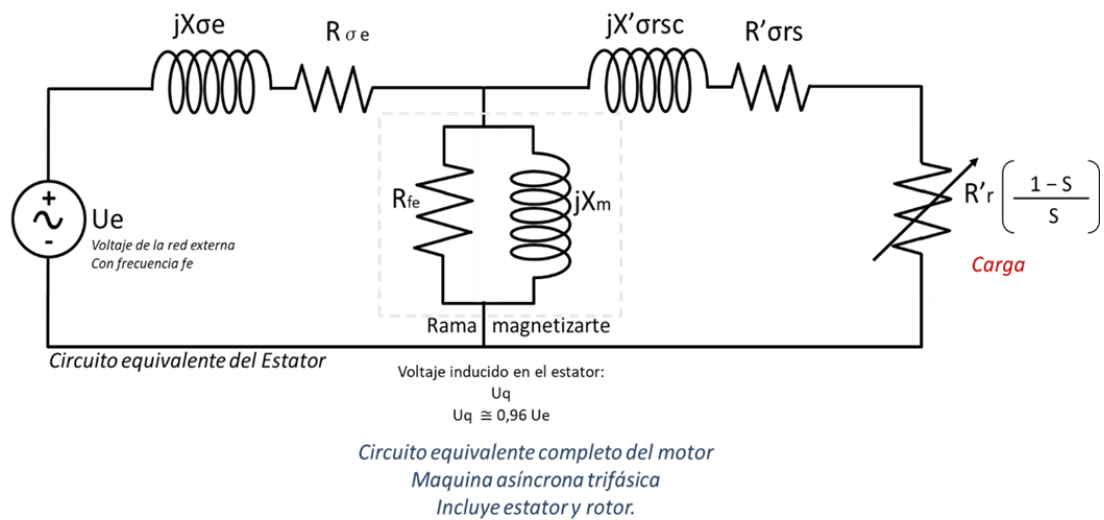


Figura 1.88. Diagramas de Estator y de Rotor combinados y referidos al lado del primario.

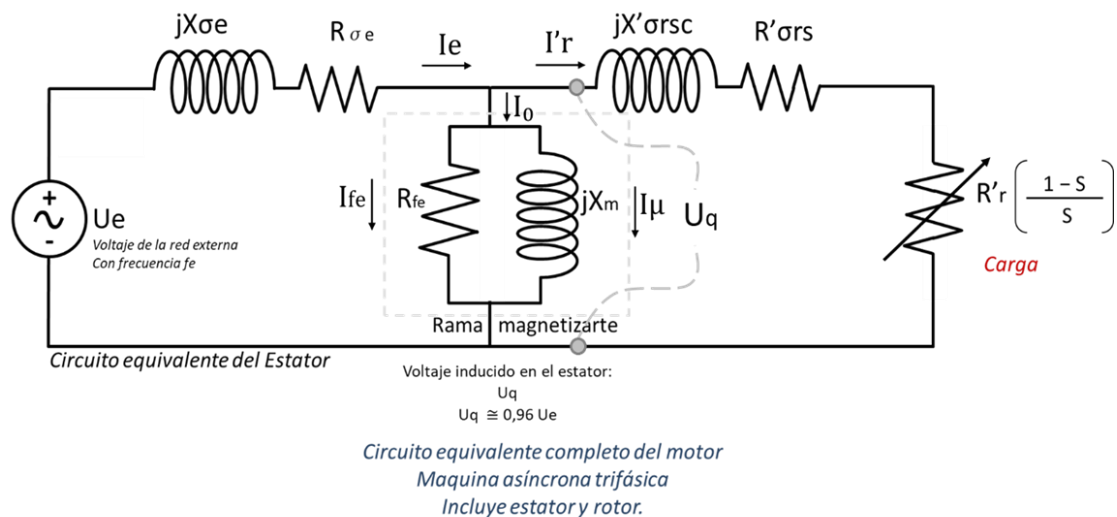


Figura 1.89. Diagramas de Estator y de Rotor combinados y referidos al lado del primario. *Detalle del voltaje U_q*

Operación sin carga

Dado que el motor funciona sin carga con un valor de deslizamiento muy bajo, prácticamente no fluye corriente en el circuito del rotor. El devanado del estator conectado a la tensión de la red mostrará solo una corriente baja I_0 .

Esta corriente sin carga se utiliza principalmente para configurar el campo magnético. El elemento dominante en el circuito es la reactancia de magnetización X_m del devanado del estator. Debido a esta gran reactancia en comparación con la resistencia del circuito, la corriente sin carga I_0 retrasará el voltaje de la red casi 90° , es decir, el circuito se comporta en gran medida inductivo.

Esto explica por qué los motores de inducción cuando operan sin carga o con carga liviana presentan un bajo factor de potencia $\cos \phi$.

Operación con carga.

Veremos cómo el motor de inducción se ajusta automáticamente a una carga creciente en el eje.

Cuando se conecta una carga al eje de la máquina, (la cual está representada por la resistencia $(R'r \times (1 - S) / S)$ en el diagrama de circuito equivalente), el rotor se ralentizará y su velocidad estará aún más por debajo de la velocidad de sincronismo que cuando estaba en vacío.

Entonces las barras del rotor cortarán ahora las líneas de flujo magnético induciendo voltaje en el devanado del rotor; y, por tanto, una corriente $I'r$ fluirá en el circuito del rotor la cual desarrollará energía.

Pero, ¿cómo se extrae esta energía adicional de la red? La corriente del rotor $I'r$ también crea flujo. Este flujo tiene una dirección tal que se opone al flujo principal de la corriente del estator que creó la corriente y el flujo del rotor en primer lugar (ley de Lenz). Por tanto, el flujo resultante de la máquina tiende a reducirse. Ver figura 1.90.

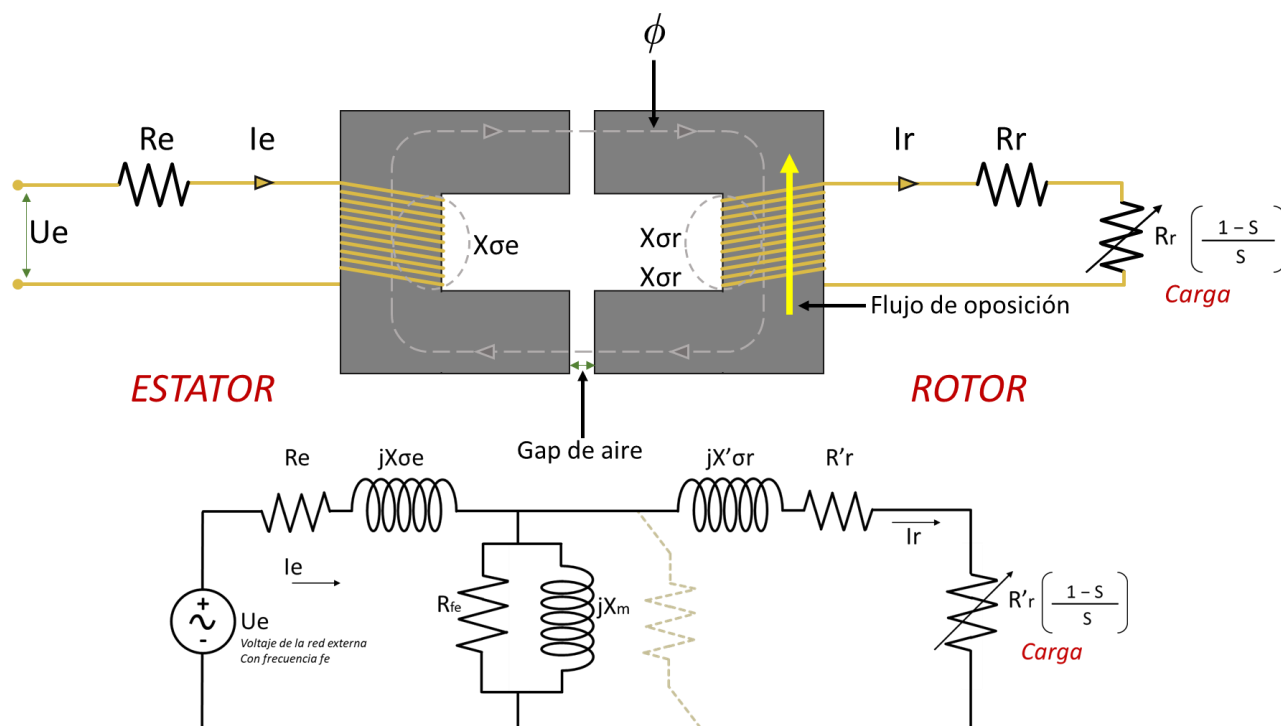


Figura 1.90. Desarrollo de flujo electromagnético y de corriente en el estator cuando un motor trabaja con carga

Como sabemos por la teoría electromagnética, la corriente I en cualquier bobina se reduce debido al fenómeno de autoinducción; es decir, el magnético de la bobina crea un voltaje inducido que se opone al voltaje de la fuente.

Esto es exactamente lo que sucede en el devanado del estator de la máquina de inducción cuando está cargada: un flujo decreciente reduce el voltaje autoinducido del devanado del estator y causa una mayor diferencia entre el voltaje de la red y el voltaje inducido (opuesto) del devanado, por lo tanto, permitiendo que fluya más corriente en el circuito del estator.

El aumento de la corriente I_e en el circuito del estator provoca dos cosas:

- El voltaje inducido aumenta para compensar la tendencia del circuito del rotor a reducir el flujo a través del núcleo;
- La entrada de energía de la red al estator aumenta para igualar la salida de potencia aumentada de la máquina cargada.

En la práctica, el devanado del estator reaccionará casi instantáneamente al aumento de la carga y el flujo del núcleo resultante permanecerá prácticamente constante desde sin carga hasta carga completa.

Con las corrientes en aumento, los elementos resistivos del diagrama de circuito equivalente, especialmente la carga $R'r(1-S)/S$, se convierten rápidamente en los elementos dominantes y el factor de potencia general del circuito mejora considerablemente.

Las siguientes figuras 1.91 y 1.92, muestran el diagrama fasorial de un motor de inducción asíncrono bajo: a) (sin carga) y b) (con carga completa), con los factores de potencia correspondientes.

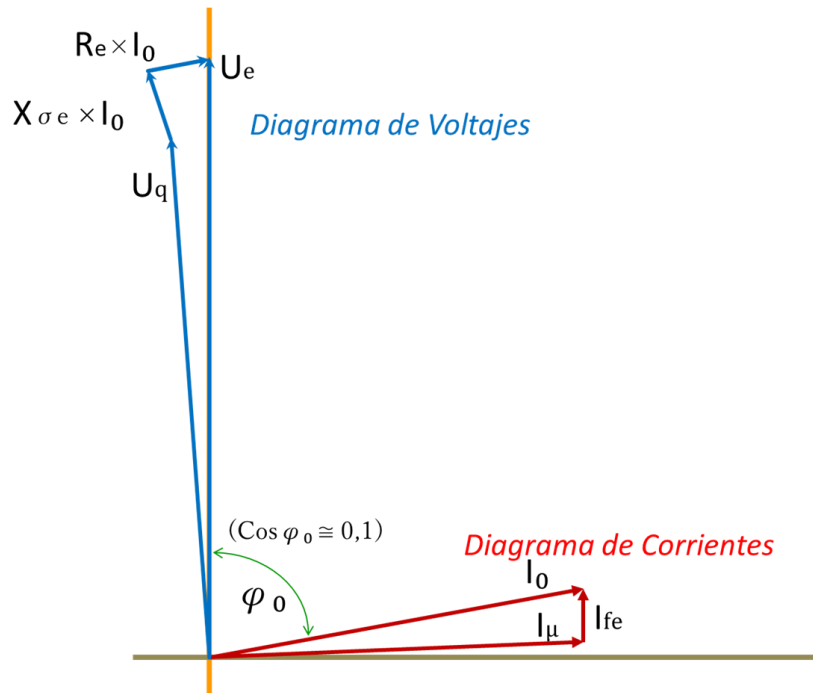


Figura 1.91. a) Diagrama fasorial para el motor de inducción en vacío (sin carga).

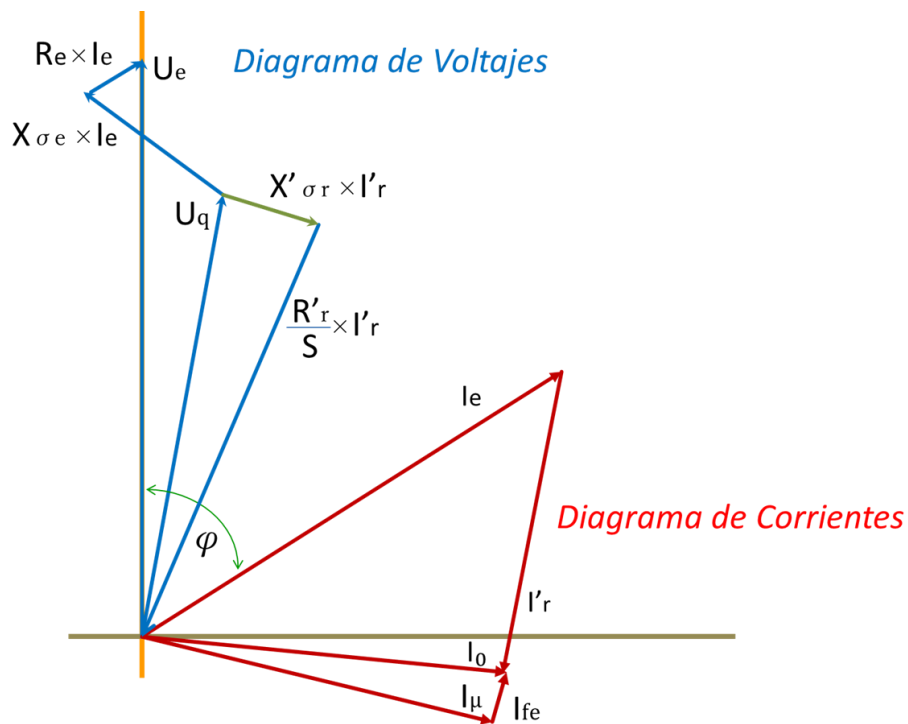


Figura 1.92. b) Diagrama fasorial para el motor de inducción en plena carga.

El flujo de potencia de una máquina de inducción en funcionamiento a motor. Ver figura 1.93.

El balance de los diversos componentes de la potencia se utiliza para analizar la conversión de energía eléctrica en mecánica en una máquina de inducción.

La siguiente figura muestra el flujo de energía para el funcionamiento del motor de una máquina de inducción trifásica.

La entrada de energía eléctrica es generalmente suministrada por una red trifásica. La potencia aparente se expresa de la siguiente manera:

$$S = (\sqrt{3}) \times V_{\text{línea}} \times I_{\text{línea}}$$

*Potencia
Aparente de
entrada*

ϕ $V_{\text{línea}}$: Voltaje de línea de la red de suministro.

$I_{\text{línea}}$: Corriente de línea de la red de suministro.

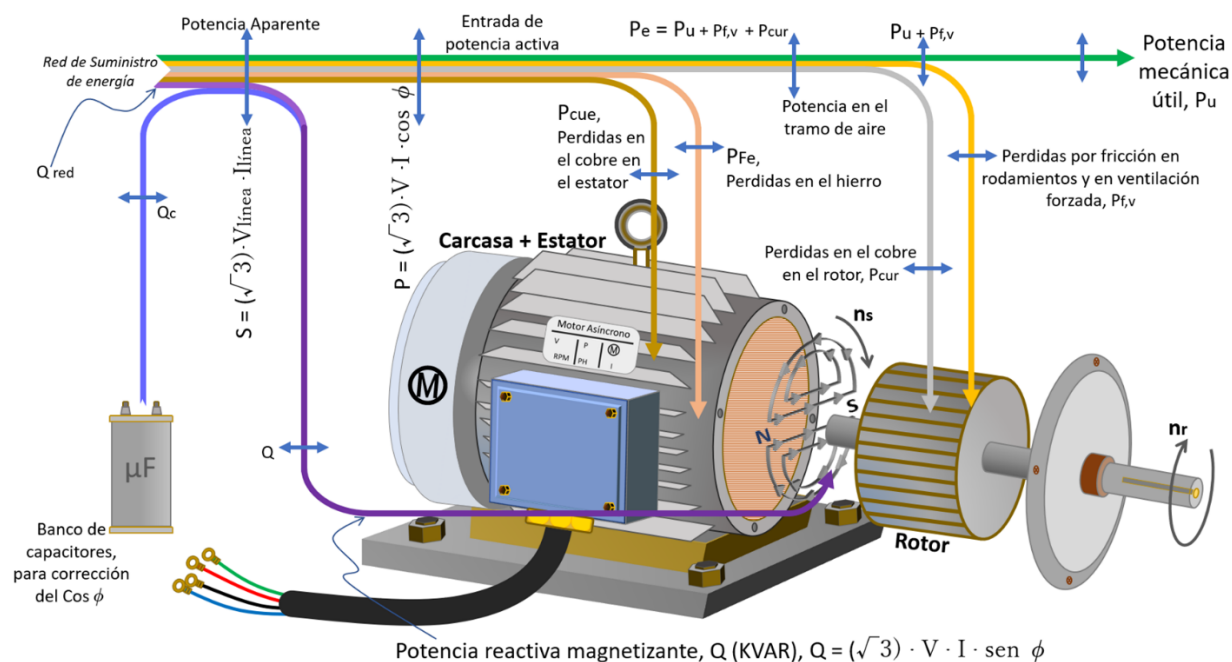


Figura 1.93. Flujo de Potencia de un motor asíncrono de Inducción trifásico

La potencia reactiva $Q = S \times \sin(\phi)$ de la potencia de entrada eléctrica se utiliza para configurar y generar el campo magnético en los devanados del motor. También en el funcionamiento sin carga del motor, esta potencia debe ser suministrada por la red o (en parte) por un banco de condensadores.

La potencia activa absorbida por una máquina de inducción es la siguiente:

$$P = (\sqrt{3}) \times V_{línea} \times I_{línea} \times \cos \phi$$

**Potencia Activa
de entrada**

donde ϕ es el ángulo de fase entre el voltaje de fase y la corriente de fase del motor

Es importante tener en cuenta que la potencia activa P es válida para la potencia de entrada eléctrica de las tres fases juntas, mientras que los cálculos que utilizan el diagrama de circuito equivalente se realizan por fase.

La potencia mecánica útil $P_{mech, \text{útil}}$ en el eje es función del par útil y de la velocidad del rotor:

$$P_{mech, \text{útil}} = (T_u \times 2 \times \pi \times n_r) / 60$$

*Potencia
Mecánica útil*

Donde:

T_u : torque útil en Nm

n_r : Velocidad rotacional del rotor en rpm

La eficiencia de una máquina se expresa por la relación entre la potencia de salida y la de entrada. En el caso de un motor eléctrico es:

$$\eta = \frac{P_{mech, \text{útil}}}{P}$$

Eficiencia

La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia mecánica útil constituye las pérdidas de la máquina.

$$P - P_{mech, \text{útil}} = \Sigma \text{Pérdidas}$$

Se pueden distinguir los siguientes *cuatro* tipos de pérdidas:

Mecánica:

$P(f + v)$, estas incluyen todas las pérdidas rotacionales como la fricción en los cojinetes y las pérdidas debidas a la ventilación forzada para enfriamiento.

Pérdidas en el hierro o en el núcleo P_{fe} :

P_{fe} , corresponden a la histéresis y a las pérdidas por corrientes parásitas como resultado de cambios normales de densidad de flujo. Las pérdidas en el hierro en el rotor pueden despreciarse ya que los cambios de densidad de flujo en el hierro del rotor son pequeños (el rotor gira cerca de la velocidad de rotación del campo magnético).

Pérdidas en el cobre:

También llamadas pérdidas por efecto joule: Corresponden a las pérdidas debidas a la resistencia óhmica del circuito del estator y del rotor.

Pérdidas en el cobre del estator: $P_{cu, e} = 3 \times R_e \times I_e^2$

Pérdidas en el cobre del rotor: $P_{cu, r} = 3 \times R_r \times I_r^2$

donde R corresponde a la resistencia del rotor o estator por fase

Se pueden distinguir los siguientes *cuatro* tipos de pérdidas:

Pérdidas adicionales:

Estas se producen en los devanados del rotor debido a las corrientes parásitas inducidas; estas pérdidas son del orden del 0,5% de la potencia mecánica nominal de la máquina y pueden despreciarse para máquinas pequeñas.

Ahora, la potencia transmitida desde el estator al rotor se denomina potencia de aire o potencia electromagnética P_e . Es la potencia de entrada eléctrica P menos las pérdidas de cobre y hierro en el estator.

$$P_e = P - P_{cu, e} - P_{fe}$$

Dado que la potencia también se puede expresar por el par (T_e) multiplicado por la velocidad angular ω , podemos definir un par electromagnético generado por el estator y que actúa sobre el rotor:

$$P_e = T_e \times \omega_e = \frac{T_e \times 2 \times \pi \times n_s}{60}$$

El par electromagnético es el mismo tanto en el estator como en el rotor, pero la velocidad angular del rotor y la del estator (campo) son diferentes:

$$\omega_r = \omega_e \times (1-s)$$

Así, la potencia mecánica P_{mech} desarrollada en el rotor debido al par electromagnético constante (T_e) es menor que P_e :

$$P_{mech} = T_e \times \omega_r = T_e \times \omega_e \times (1-s) = P_e \times (1-s)$$

Y la diferencia entre el entrehierro y la potencia mecánica corresponde a las pérdidas de cobre (efecto Joule) en el rotor:

$$P_{(cu, r)} = P_e - P_{mech} = S \times P_e = 3 \times R'_r \times I'^2_r$$

Para obtener una potencia mecánica útil $P_{mech, \text{útil}}$ se deben tener en cuenta las pérdidas debidas a la fricción y a la ventilación:

$$P_{mech, \text{útil}} = P_{mech} - P_{(f + v)}$$

Entonces, el par útil en el eje de la máquina se convierte así:

$$T_{mech, \text{útil}} = P_{mech, \text{útil}} / \omega_r = P_{mech, \text{útil}} / (2 \times \pi \times n_r / 60)$$

La máquina de inducción funcionando en modo Generador.
Ver figura 1.94.

Un motor de inducción puede funcionar como un generador cuando es impulsado por encima de su velocidad síncrona.

Sin embargo, el flujo de energía se invierte:

Un motor primario, como una turbina hidráulica, suministra energía mecánica al eje de la máquina.

Allí se producen las mismas pérdidas descritas anteriormente, pero en el funcionamiento del generador, deben restarse de la potencia de entrada mecánica.

Se aplican las mismas fórmulas y relaciones que se desarrollaron anteriormente, pero el deslizamiento cuando se trabaja por encima de la velocidad de sincronismo se vuelve de signo negativo al igual que el par.

$$S = (n_s - n_r) / n_s$$

Esto debe tenerse en cuenta en los cálculos de ingeniería, aunque en las discusiones generales con los fabricantes, a veces se puede omitir el signo negativo. La siguiente figura muestra el flujo de energía de una máquina de inducción en funcionamiento como generador.

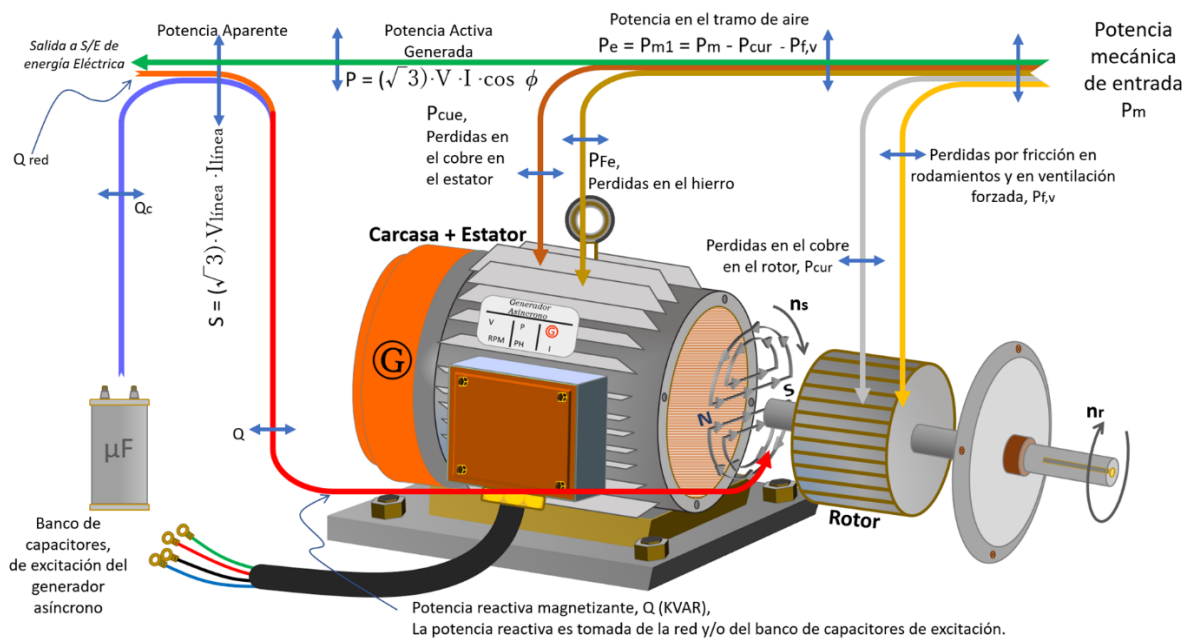


Figura 1.94. Flujo de Potencia para una máquina de Inducción Asíncrona en Modo Generador

Es interesante ver que el flujo de la potencia reactiva Q no se invierte cuando la máquina de inducción funciona como generador.

La potencia reactiva necesaria para producir un campo magnético no puede ser generada por el motor principal (turbina) ni por el rotor de jaula de ardilla en sí (sin terminales de rotor).

Por lo tanto, la máquina de inducción solo puede funcionar y suministrar potencia activa si está conectada a una fuente externa de potencia reactiva.

Cuando se conecta a una red con otras fuentes de energía, la energía reactiva puede ser suministrada por generadores sincronizados que trabajan en el rango de sobreexcitación.

En funcionamiento autónomo, se debe conectar una batería de condensadores en paralelo al devanado del estator para formar un circuito de resonancia que suministrará la potencia reactiva necesaria a la máquina de inducción.

Entonces funcionará como un generador de autoexcitación. La siguiente figura 1.95 muestra un diagrama de circuito esquemático de un generador asíncrono auto excitado.

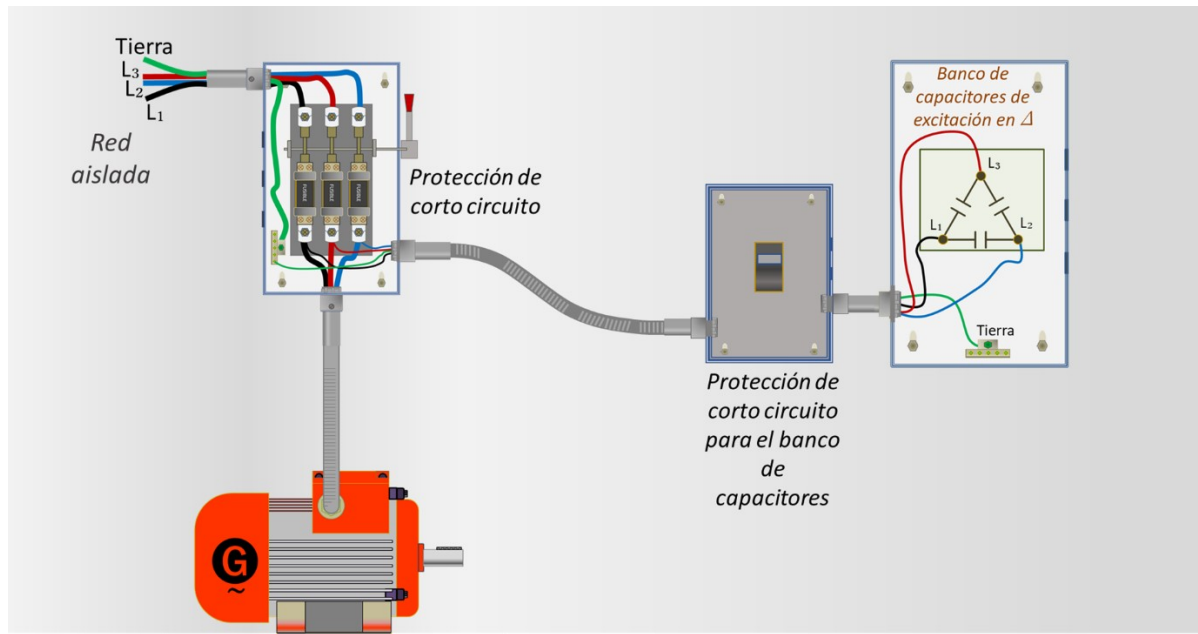


Figura 1.95. Generador asíncrono trifásico auto excitado conectado a un banco de capacitores de excitación en Δ

Un motor de inducción de una potencia determinada no puede entregar la misma potencia eléctrica en modo generador que absorbería de una red en funcionamiento del motor, ya que las pérdidas (cobre, hierro, fricción y viento) reducen la salida. En teoría, la potencia de entrada mecánica podría aumentarse para compensar las pérdidas y llegar a una salida eléctrica más alta, *sin embargo*, esto está limitado por el hecho de que una potencia de entrada demasiado alta pronto sobrecargaría la máquina, es decir, sobrecalentaría y finalmente quemaría los devanados del estator. Por lo tanto, las condiciones de funcionamiento del generador (G) están determinadas por la corriente del estator que no debe exceder la corriente nominal del motor (M) para la que están diseñados los devanados.

Y suponiendo que el voltaje es el mismo tanto para el motor (M) como para el generador (G), estas condiciones de selección se pueden expresar en términos de potencia así:

La potencia Aparente (de salida) en la operación como generador (G), no debe exceder la potencia Aparente (de entrada) de la máquina asíncrona cuando esta se encuentra en el modo como motor (M).

Cuando se compara el flujo de potencia del motor y el generador, se puede apreciar que la potencia del entrehierro P_e es mayor en el modo de generación que en el funcionamiento en modo motor, aunque la potencia aparente S es la misma para ambas condiciones.

Esto se debe al hecho de que la potencia que compensa las pérdidas del estator (hierro y cobre) debe transmitirse a través del entrehierro cuando se genera, pero no en el modo de motor.

La transmisión de una mayor potencia también requiere más corriente de magnetización para configurar el campo magnético que une el estator y el rotor. Y el aumento de la potencia magnética solo puede tener lugar a expensas de una reducción de la salida de potencia activa permitida, ya que la potencia aparente está limitada por la condición de sobrecarga (sobrecalentamiento).

Se ha observado también que un cambio de potencia activa a reactiva representado por una caída en el factor de potencia ($\cos \phi$), en una máquina de inducción es al menos un porcentaje (%) menor cuando genera (modo \textcircled{G}) que cuando se está en modo motor \textcircled{M} .

Este fenómeno también se puede ver en el circuito equivalente (ver las siguientes figuras 1.96, 1.97 y 1.98):

Cuando se está en modo motor, la tensión inducida U_q es menor que la tensión de la red U_e debido a la caída de tensión en los elementos del circuito del estator, mientras que, en el funcionamiento del generador, U_q debe ser mayor en la misma cantidad para suministrar voltaje de red nominal en los terminales. Es debido a esto el aumento de los requisitos de potencia de magnetización cuando se pasa de Modo Motor \textcircled{M} al funcionamiento en el modo generador \textcircled{G} .

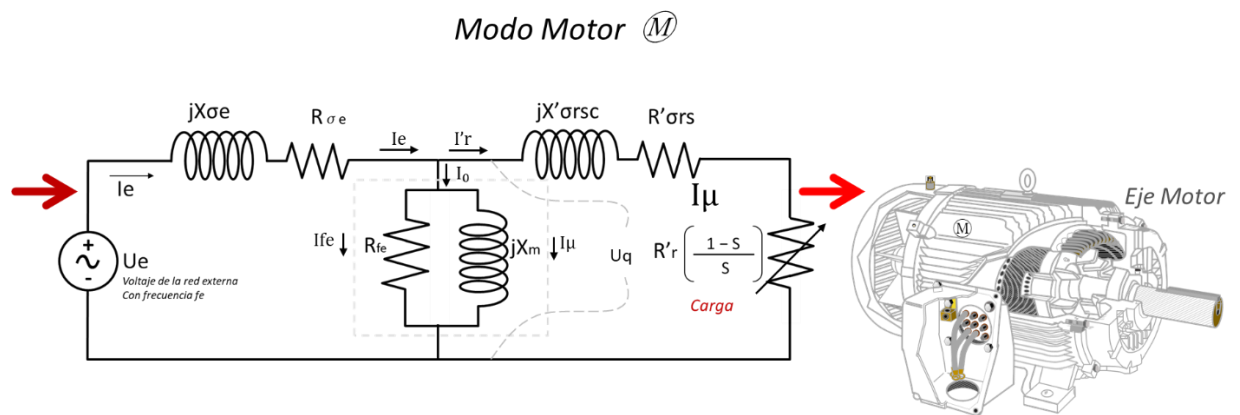


Figura 1.96. Diagrama de circuito equivalente para el funcionamiento del motor y generador y variación de los requisitos de magnetización

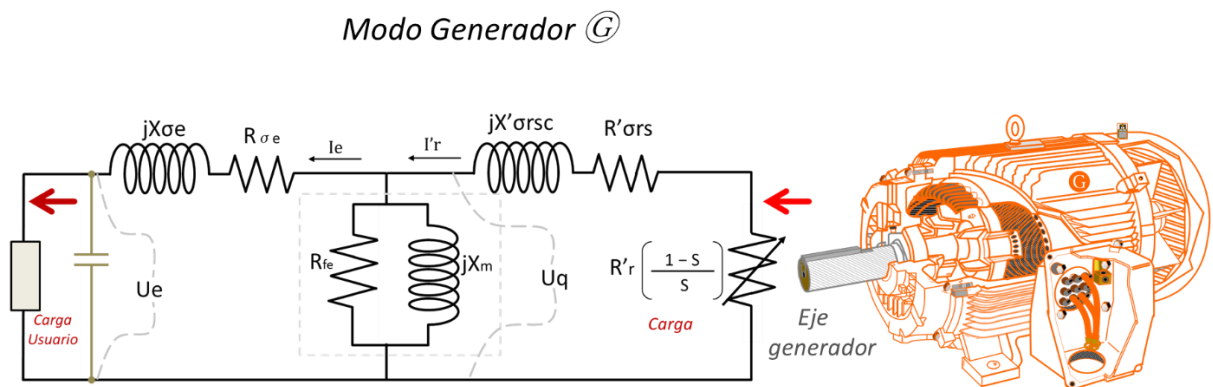


Figura 1.97. Diagrama de circuito equivalente para el funcionamiento del motor y generador y variación de los requisitos de magnetización

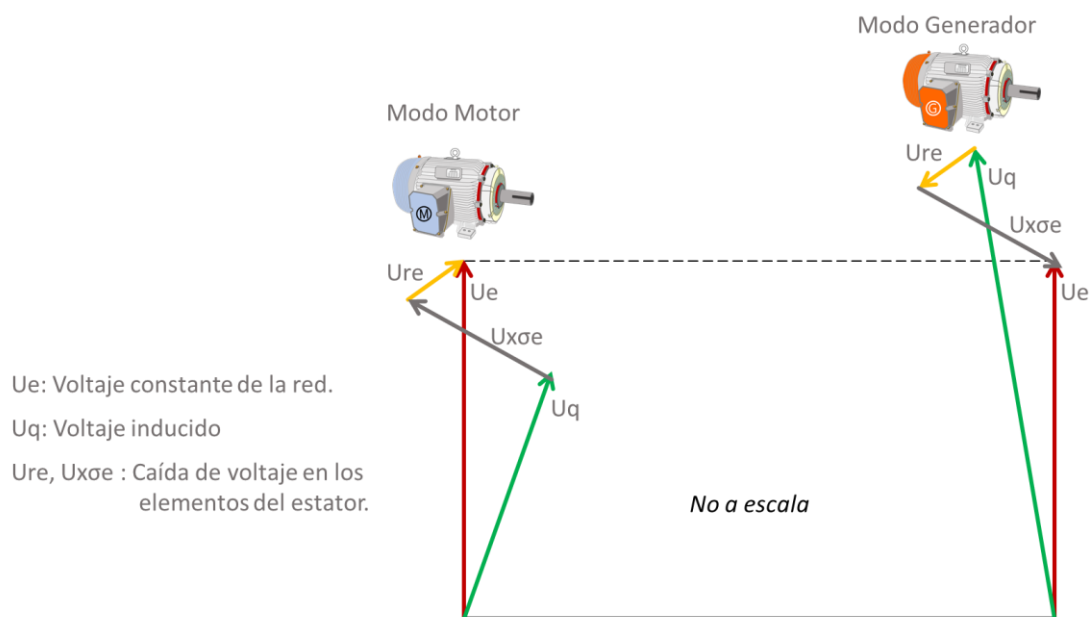


Figura 1.98. Diagrama de circuito equivalente para el funcionamiento del motor y generador y variación de los requisitos de magnetización.

El efecto de la saturación.

Un factor de potencia decreciente en la operación del generador en comparación con el motor se vuelve aún más claro debido al efecto de la saturación.

El material de hierro del estator y el núcleo del rotor muestra una buena calidad ferromagnética en un rango limitado, es decir, la inducción solo aumenta linealmente con la corriente de magnetización aplicada en la bobina hasta cierto punto (el punto de cambio de dirección) desde donde la curva comienza a aplanarse.

La siguiente figura muestra una curva de magnetización típica de un material de núcleo.

El aumento de los requisitos de magnetización en la operación del generador, tal como se explicó anteriormente, tiende a cambiar el punto de operación al rango de saturación magnética para muchos motores de inducción modernos.

Para mantener la tensión inducida Uq en el nivel requerido (es decir, Uq menos la caída de tensión en el estator debe estar cerca de la tensión nominal de la red, ver figura 1.98 “Diagrama de circuito equivalente para el funcionamiento del motor y generador y variación de los requisitos de magnetización”), la corriente de magnetización y con ella la demanda de potencia reactiva del generador de inducción deben aumentar aún más. El resultado es un factor de potencia pobre y la correspondiente pérdida de potencia activa.

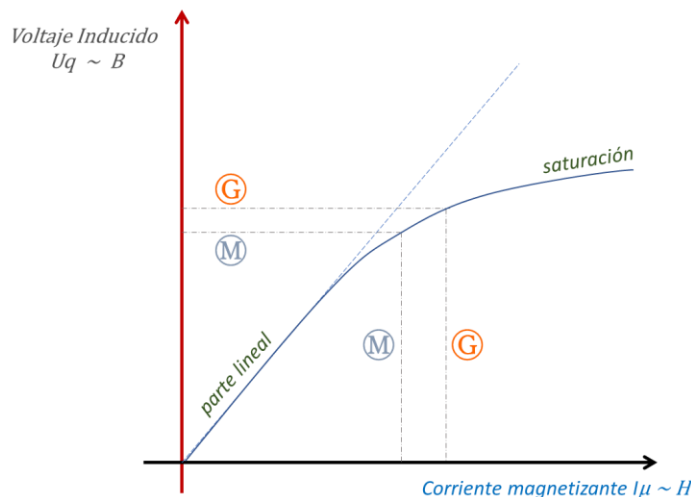


Figura 1.99. Típica curva de magnetización del material de un núcleo e incremento de la corriente reactiva en la operación en modo Generador \textcircled{G} .

El generador auto excitado.

Como se explicó anteriormente, una máquina de inducción puede funcionar como un generador en paralelo a una gran red que suministrará la potencia reactiva necesaria para magnetizar los circuitos magnéticos de la máquina de inducción. Cuando se opera en una red aislada, la corriente de magnetización puede ser suministrada por capacitores (vea la figura 1.95 "Generador asíncrono trifásico auto excitado conectado a un banco de capacitores de excitación en Δ " arriba).

Al arrancar la unidad de *turbina / generador*, no hay corriente reactiva disponible en el devanado del estator para producir un campo magnético ni los capacitores pueden suministrar energía reactiva sin ser cargados primero por energía inductiva. Entonces, ¿cómo se puede iniciar el proceso?

Debido a que los núcleos de hierro del estator y del rotor se han magnetizado durante las operaciones anteriores, estos generalmente mantienen una pequeña cantidad de magnetismo llamado magnetismo residual o remanencia. En la siguiente figura 1.99, este magnetismo residual está representado por el desplazamiento de la curva de magnetización.

Ahora, impulsado por la turbina, el rotor de la máquina de inducción comienza a girar y las líneas de flujo magnético de este magnetismo residual cortan los devanados del estator sobre los que se induce la tensión U_1 , la denominada tensión remanente.

El voltaje U_1 ahora carga el capacitor que suministrará la corriente de magnetización I_1 (ver la figura siguiente, característica del capacitor) regresando al devanado del estator durante el siguiente semiperíodo de la corriente alterna C.A.

I_1 a su vez aumenta la magnetización de la máquina y con ello se produce la tensión U_2 correspondiente.

Este proceso se repite hasta que la corriente inducida I_i (impulsada por la tensión inducida U_i) y la corriente del condensador I_c están en equilibrio. Este será el caso en el punto de intersección P de las dos curvas de la siguiente figura.

Este proceso se ha llevado a cabo sin carga. Seleccionando un condensador C (μF) adecuado, la tensión sin carga U_0 se puede configurar según sea necesario.

En ausencia de magnetismo residual en el rotor, se podría conectar una batería (4.5 a 12V) durante unos segundos a los terminales del estator (solo una fase) en reposo para restaurar un pequeño campo magnético en la máquina que iniciará el proceso de autoexcitación.

Generalmente es suficiente una fuente de voltaje de CC que permita que fluya aproximadamente la corriente nominal.

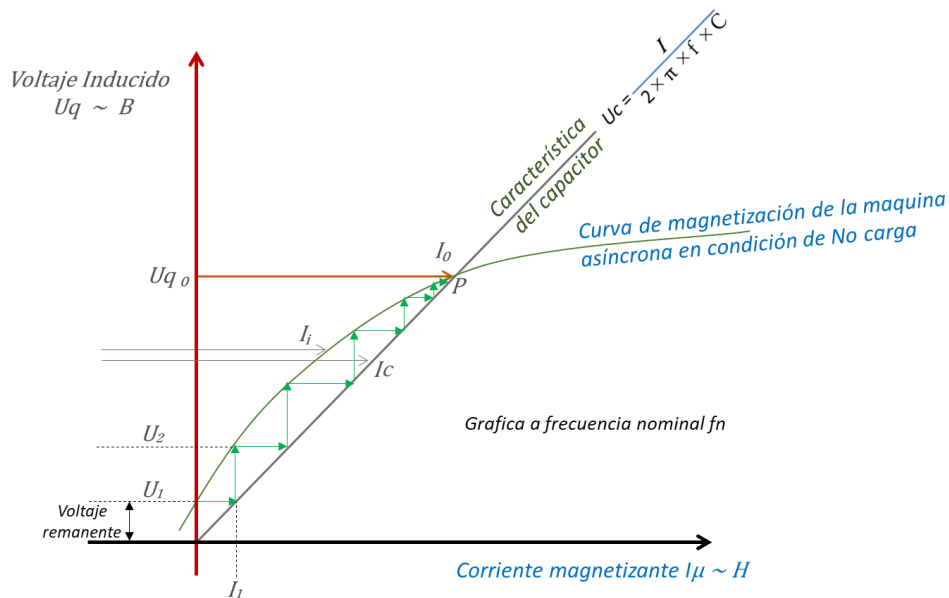


Figura 1.100. Auto excitación de una máquina de una máquina de inducción asincrónica trifásica por un capacitor conectado en paralelo en condiciones de no carga (en vacío).

El problema del control del voltaje y de la frecuencia del generador de inducción en operación aislada

Una vez que la máquina de inducción ha establecido su voltaje sin carga, la carga de consumo puede conectarse. Como se explicó anteriormente, la máquina de inducción requiere una mayor magnetización cuando está cargada, es decir, cuando la energía mecánica se va a convertir en energía eléctrica. Sin embargo, los condensadores seleccionados pueden suministrar una corriente reactiva constante a frecuencia y tensión nominales únicamente, la cual está determinada por la característica del condensador (línea recta en la figura 1.100).

Suponiendo que la tensión sin carga U_{q0} corresponde a la tensión nominal U_n , la corriente reactiva $I_{\mu 0}$ se utiliza enteramente para configurar el campo magnético sin carga.

Para crear un par electromagnético (que transmitirá la energía), debe estar disponible una corriente magnética ΔI_μ adicional.

En la siguiente figura podemos ver que esta corriente de magnetización adicional (representada por la diferencia entre el condensador y la característica sin carga) solo está disponible si se permite que caiga el voltaje en los terminales de la máquina.

La carga máxima se alcanza al valor máximo de la corriente de magnetización adicional $\Delta I_{\mu max}$ correspondiente a la tensión U_x . Una carga adicional provocaría una ruptura inmediata del voltaje, es decir, la máquina se desmagnetizará y ya no suministrará energía eléctrica. Lo anterior se observa en la siguiente figura 1.101 en la parte a.

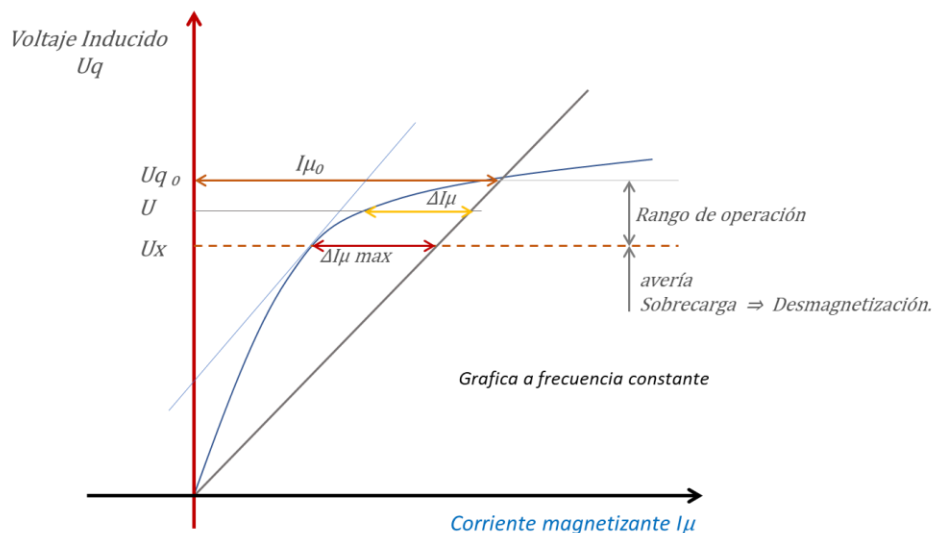


Figura 1.101. Desarrollo de voltaje en carga creciente y límite de desmagnetización de una máquina síncrona en modo generador. **a) Carga a frecuencia constante.**

De hecho, la carga máxima, antes de que se produzca la desmagnetización, está aún más limitada, ya que la velocidad del motor principal disminuye (de f_0 a f_1 en la siguiente figura 1.102, parte b), tanto las características del condensador como las condiciones sin carga cambian: se acercan entre sí. La carga máxima correspondiente (con $\Delta I_{\mu \text{ max}}$, justo antes de la avería) será menor que en el caso a). La figura 1.101 muestra este comportamiento.

Se puede apreciar que el valor máximo de la corriente de magnetización adicional $\Delta I_{\mu \text{ max}}$ es mayor para los materiales del núcleo que muestran una concavidad diferente. Además, la potencia de salida de una máquina de inducción en modo generador © en funcionamiento autónomo se puede aumentar conectando condensadores de mayor potencia.

Sin embargo, el uso de condensadores más grandes creará una sobretensión sin carga. La conexión de los condensadores por etapas, es decir, una primera batería para el proceso de autoexcitación y una segunda batería para permitir los requisitos de magnetización de la carga, podría mejorar la situación.

Además, un aumento de frecuencia puede hacer que haya más corriente de magnetización disponible para la carga, ya que las características del condensador y sin carga divergen para aumentar la frecuencia al igual que cambian juntas para disminuir la frecuencia.

Vea la siguiente figura 1.102, parte b.

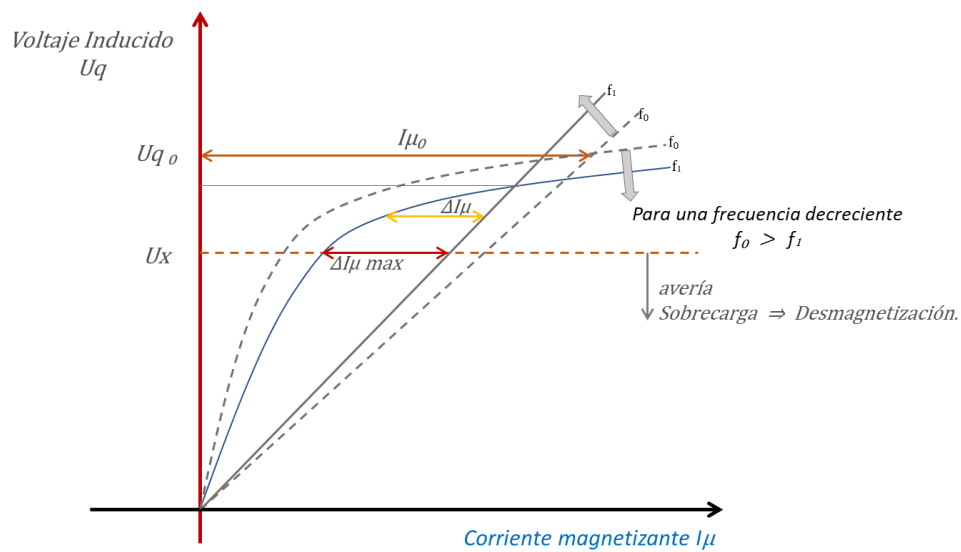


Figura 1.102. Desarrollo de voltaje en carga creciente y límite de desmagnetización de una maquina síncrona en modo generador. **b) Carga a frecuencia decreciente.**

Características de la maquina asíncrona de Inducción.

Al comparar motores de inducción o motores en general, uno de los parámetros más importantes es la relación *par-velocidad*. Las siguientes figuras 1.103 y 1.104 muestran una característica típica de par-velocidad de una máquina de inducción de jaula de ardilla.

La característica de par-velocidad de estas figuras muestran un punto máximo del par. Cargar el motor más allá de ese par de arranque hará que la máquina se detenga y no sea posible una operación estable. El rango entre el par a plena carga y el par de extracción no se puede utilizar para un funcionamiento permanente debido al sobrecalentamiento. Por lo tanto, el rango real operativo tanto en el motor como en la generación representa solo una pequeña parte de la característica completa. Sin embargo, es posible que deban utilizarse motores para arrancar máquinas bajo carga; y por esto, es importante el par de arranque, incluido su desarrollo hasta el punto nominal.

Y también, dependiendo de la aplicación del motor, el par de arranque requerido puede ser alto, tal como cuando se acciona una bomba de desplazamiento positivo o una grúa.

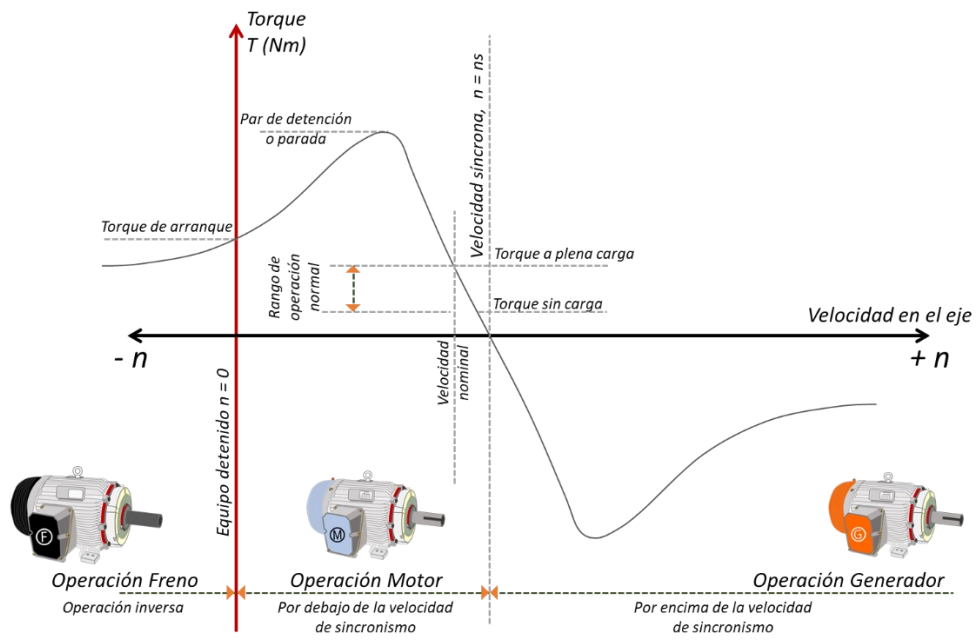


Figura 1.103. Zonas de operación como generador, motor y freno de la maquina asíncrona de inducción trifásica

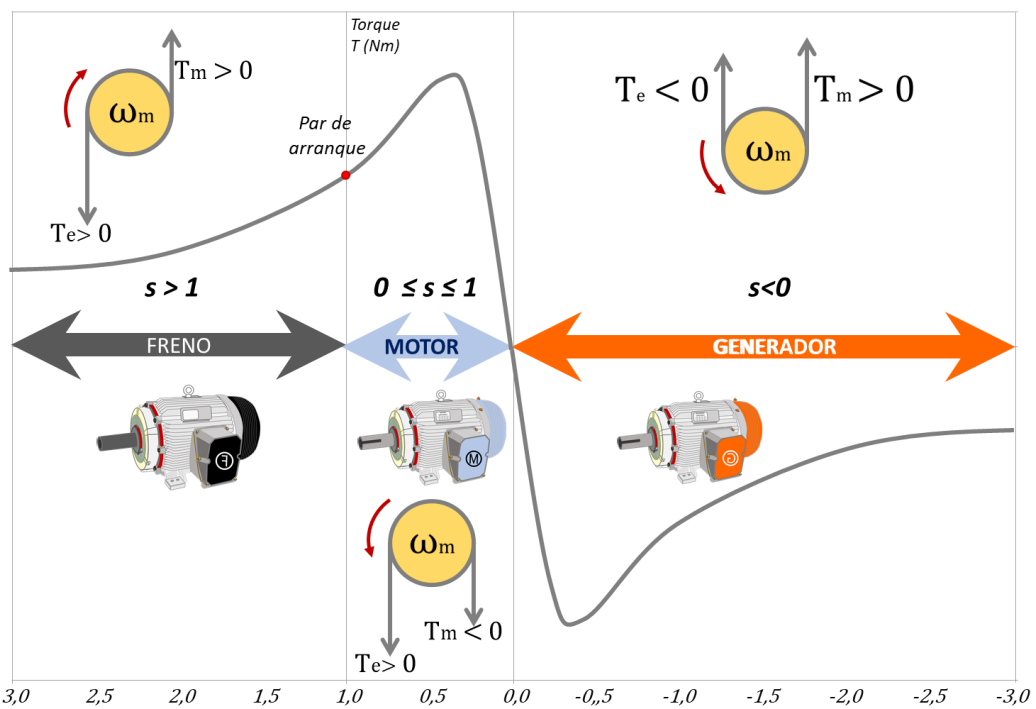
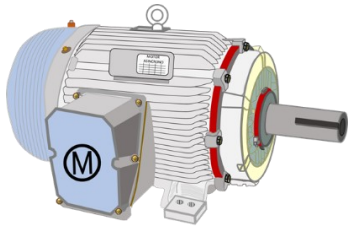


Figura 1.104. Zonas de operación como generador, motor y freno de la maquina asíncrona de inducción trifásica. Detalle del torque.



Cuando se opera como Motor \textcircled{M} :

En la zona de motorización, la carga es accionada por la máquina y se consume potencia de la red. Es decir, en un motor asíncrono la máquina absorbe potencia eléctrica por el estator para convertirla en potencia mecánica en su eje. En el motor tanto el par como la velocidad tienen signo positivo. Por lo tanto, el par está a favor de la velocidad y se trata de un par motor. Es este par el que provoca el giro de la máquina.

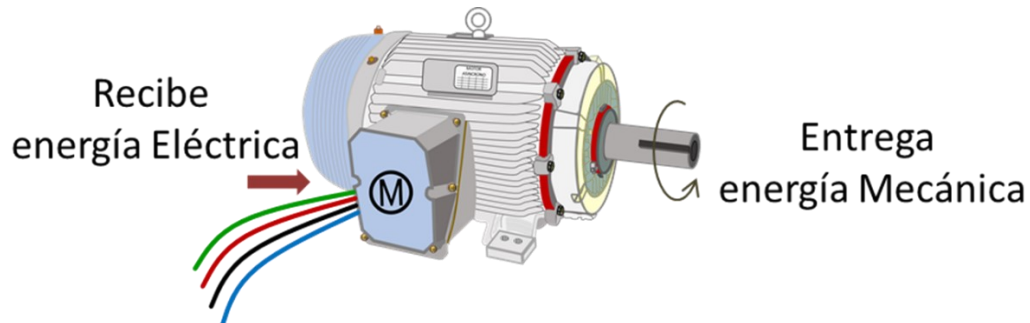
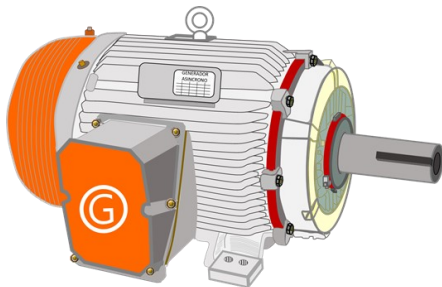


Figura 1.105. Operación Modo Motor \textcircled{M}



Cuando opera como Generador \textcircled{G} :

La operación como generador requiere que la máquina entregue potencia por el estator. La energía entra por el eje mecánico, atraviesa el entrehierro y llega al estator. En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor es superior a la de sincronismo n_s , lo que quiere decir que el deslizamiento s es negativo. Por lo tanto, funcionando como generador la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y de mayor valor que ésta.

En consecuencia, en un generador de inducción la máquina absorbe potencia mecánica en su eje para convertirla en potencia eléctrica (potencia activa) que se suministra a la red conectada al estator.

En este caso el par es negativo y la velocidad es positiva. Por lo tanto, el par de la máquina de inducción se opone a la velocidad y se trata de un par de frenado. Deberá existir entonces otro par, por ejemplo, el producido por un motor de gasolina acoplado al mismo eje que la máquina asíncrona, o una turbina, o un impeler de una PAT que mueva al grupo y sea el que lo esté obligando a girar a una velocidad superior a la de sincronismo.

El funcionamiento como generador de la máquina asíncrona exige que la red primaria, a la que se halla conectado el estator, esté alimentada por otras fuentes de energía eléctrica que, a la vez que fijan la pulsación de la corriente y la velocidad de sincronismo del campo giratorio, suministren a la máquina de inducción la energía reactiva precisa para la excitación.

Puesto que la máquina por sí misma es incapaz de generar corriente magnetizante, esta debe ser suministrada por la red a la que está conectada, tanto en el funcionamiento como motor como cuando lo hace como generador.

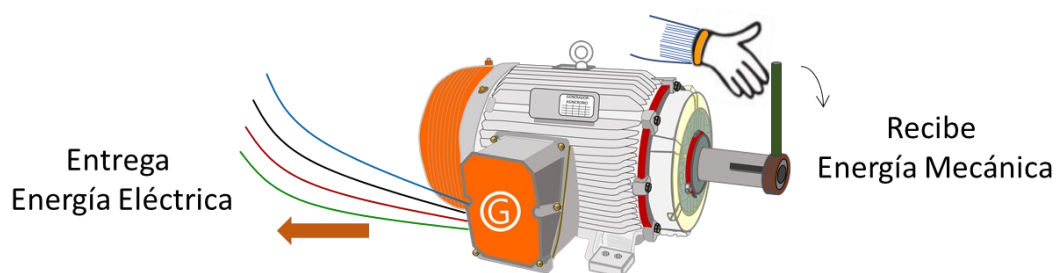
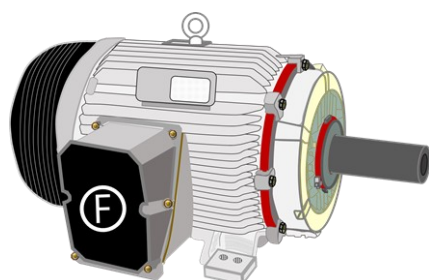


Figura 1.106. Operación Modo Generador (G)



Operación frenado (F)

En esta condición la máquina consume potencia tanto de la fuente como del eje mecánico, y se disipa como pérdidas en las resistencias pasivas del circuito equivalente.

En este caso la máquina utiliza potencia eléctrica de la fuente para oponerse al sentido del movimiento.

Estos puntos de operación pueden utilizarse para frenar un motor, consumiendo para este fin la energía cinética acumulada en la carga mecánica.

Durante el funcionamiento como freno, la máquina disipa internamente mucha energía y esto ocasiona un calentamiento importante, por esta razón este tipo de operación tan sólo debe utilizarse durante cortos períodos de tiempo.

Para que la máquina de inducción opere en la condición de freno, es necesario que se invierta el sentido de giro del campo magnético rotatorio con respecto a la velocidad del rotor. Esto se puede lograr invirtiendo la conexión de dos fases del estator, el sentido de giro del campo se invierte y la máquina entra en la condición de freno.

El par eléctrico que produce la máquina tiene sentido contrario al movimiento del rotor y la carga mecánica disminuye su velocidad. Cuando el rotor se detiene, se desconecta la máquina de la red y culmina el proceso de frenado.

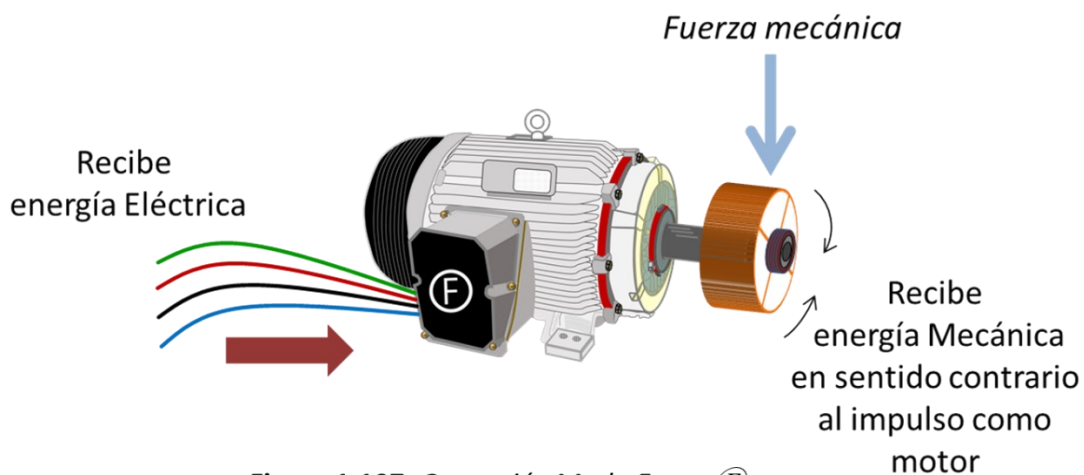


Figura 1.107. Operación Modo Freno (F)

Presentación del rendimiento de la máquina de inducción.

Aparte de la característica de par-velocidad, son de mucho interés otros valores relacionados con el de rendimiento de una máquina de inducción asíncrona.

La eficiencia η , el factor de potencia $\cos \phi$ en los terminales del motor, la corriente de entrada del motor I , el deslizamiento S y el par T se representan frente a la potencia mecánica P_{mech} . Ver figura 1.108.

Estas curvas comprenden generalmente solo el rango de funcionamiento normal del motor.

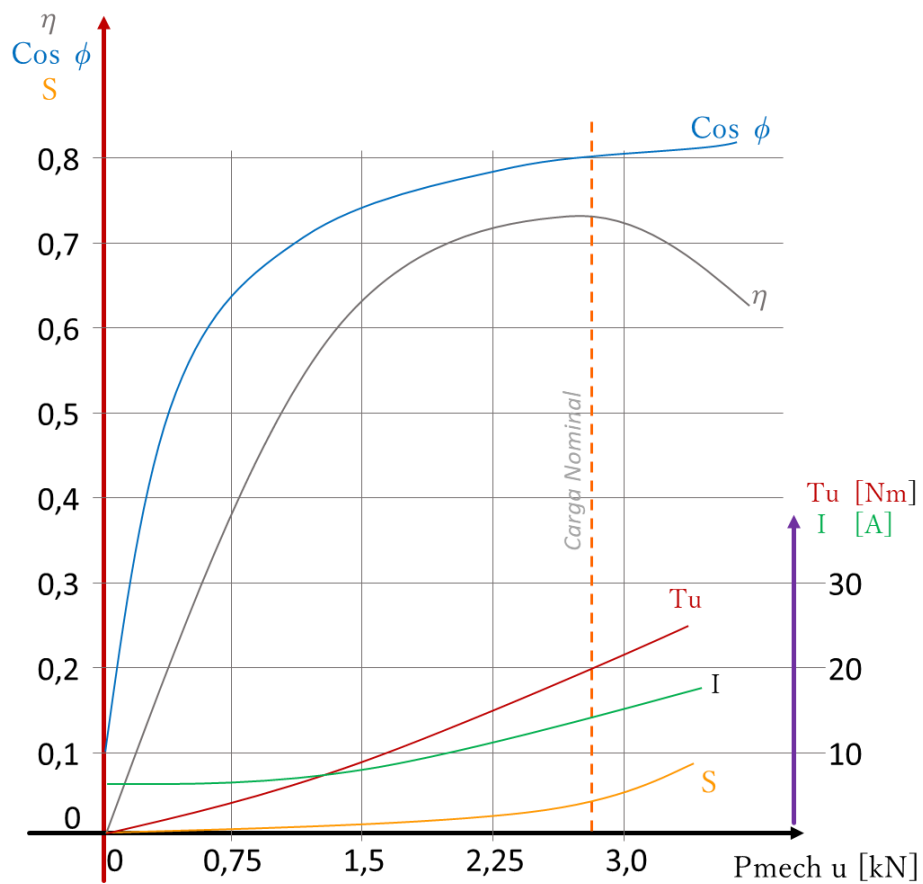


Figura 1.108. Curvas características de un motor \textcircled{M} de inducción asíncrono trifásico. **Curvas típicas.**

Y cuando la máquina de inducción se va a utilizar como generador \textcircled{G} , es más conveniente trazar las curvas de rendimiento contra la potencia eléctrica P_{el} en lugar de la potencia mecánica P_{mech} . Ver figura 1.109.

La siguiente figura muestra las características completas de una máquina de inducción de potencia de motor mecánico de 1.1kW.

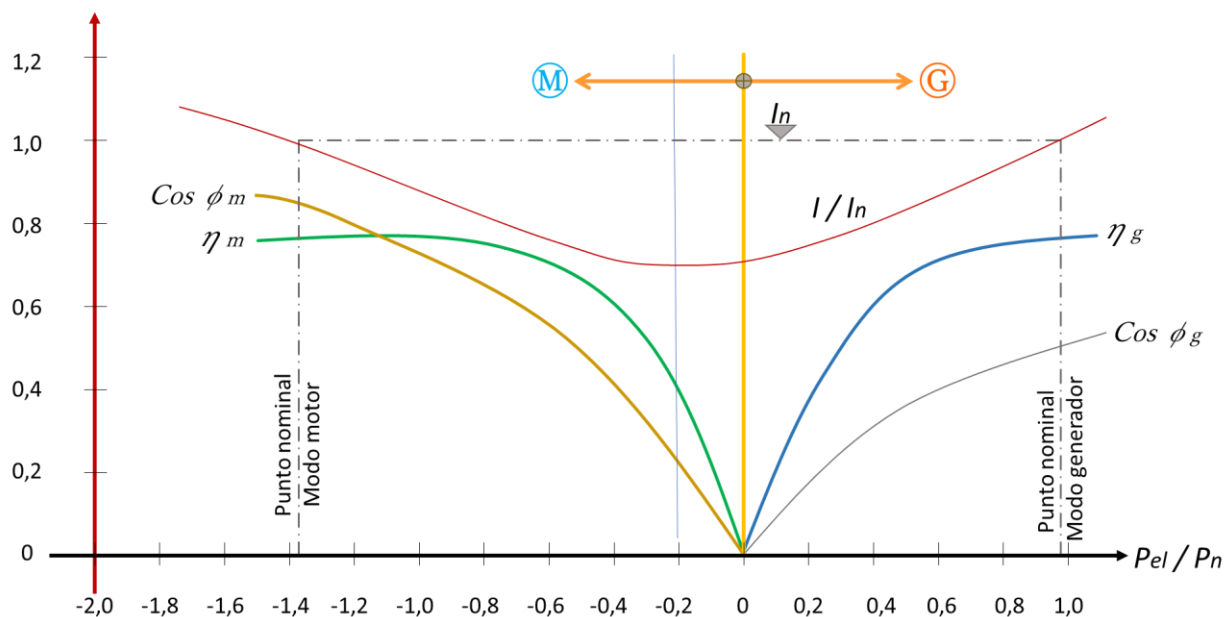


Figura 1.109. Curvas de rendimiento de una máquina asíncrona en modo Motor (M) y en modo Generador (G).

Pel: Potencia Eléctrica
Pn: Potencia mecánica del Motor

El diagrama Circular en una máquina de Inducción asíncrona trifásica.

El diagrama circular es una forma interesante de presentar el rendimiento completo de una máquina de inducción para todos los modos de funcionamiento posibles, es decir, Modo Motor (M), Modo Generador (G) y Modo de Frenado (F). Ver figuras 1.110 y 1.111.

Para una tensión constante en los terminales de la máquina y resistencias y reactancias constantes, la corriente eléctrica varía en función del deslizamiento y describe un círculo que caracteriza el rendimiento de la máquina.

El diagrama proporciona, por ejemplo, información sobre la demanda de potencia reactiva (magnetizante) de la máquina y permite identificar dónde se producen las pérdidas internas (en el hierro, en el cobre, etc.).

La determinación del diagrama circular es bastante complicada y requiere varios parámetros, que solo se pueden encontrar realizando pruebas sin carga y de rotor bloqueado a la máquina asíncrona. Además, el diagrama circular no tiene en cuenta los efectos de saturación y, por lo tanto, el rendimiento del generador no se puede determinar realmente con mucha precisión.

Mostraremos el diagrama circular aquí principalmente como un medio cualitativo para ilustrar ciertos fenómenos con mayor claridad.

La potencia activa se representa en el eje vertical, mientras que la potencia reactiva aparece en el eje horizontal (consulte la siguiente figura en donde se esquematiza el diagrama circular).

A voltaje constante, estas distancias también son una medida para las corrientes correspondientes.

Y cada punto del círculo representa un punto operativo de un cierto deslizamiento. Siguiendo la representación del triángulo de potencia, el vector entre cero y cualquier punto da la potencia aparente (o corriente total) suministrada o producida por la máquina y, posteriormente, el ángulo entre ese vector y el eje vertical es el ángulo de fase ϕ .

Estos puntos característicos en el diagrama circular se pueden distinguir: el punto sin carga P_0 (deslizamiento = 0), el punto de máquina parada Pk ($s = 1$) y el cambio de modo motor a freno P_∞

($S \Rightarrow \infty$). La línea recta entre P_0 y Pk se llama línea de potencia mecánica porque para estos dos puntos $P_{mech} = 0$. La distancia vertical entre esa línea y la circunferencia representa la potencia mecánica P_{mech} . De manera similar, la línea entre P_0 y P_∞ es la línea de torque porque para estos torques $T = 0$. El par para cualquier valor de deslizamiento está representado por la distancia vertical entre esa línea y la circunferencia. Es importante tener en cuenta que las pérdidas por fricción y ventilación aún no están incluidas en el diagrama circular; para obtener potencia mecánica útil y par útil para el funcionamiento del motor, estas pérdidas deben restarse por separado. Se supone además que las pérdidas de hierro son constantes y están representadas por la distancia entre el eje horizontal del diagrama y el diámetro horizontal del círculo.

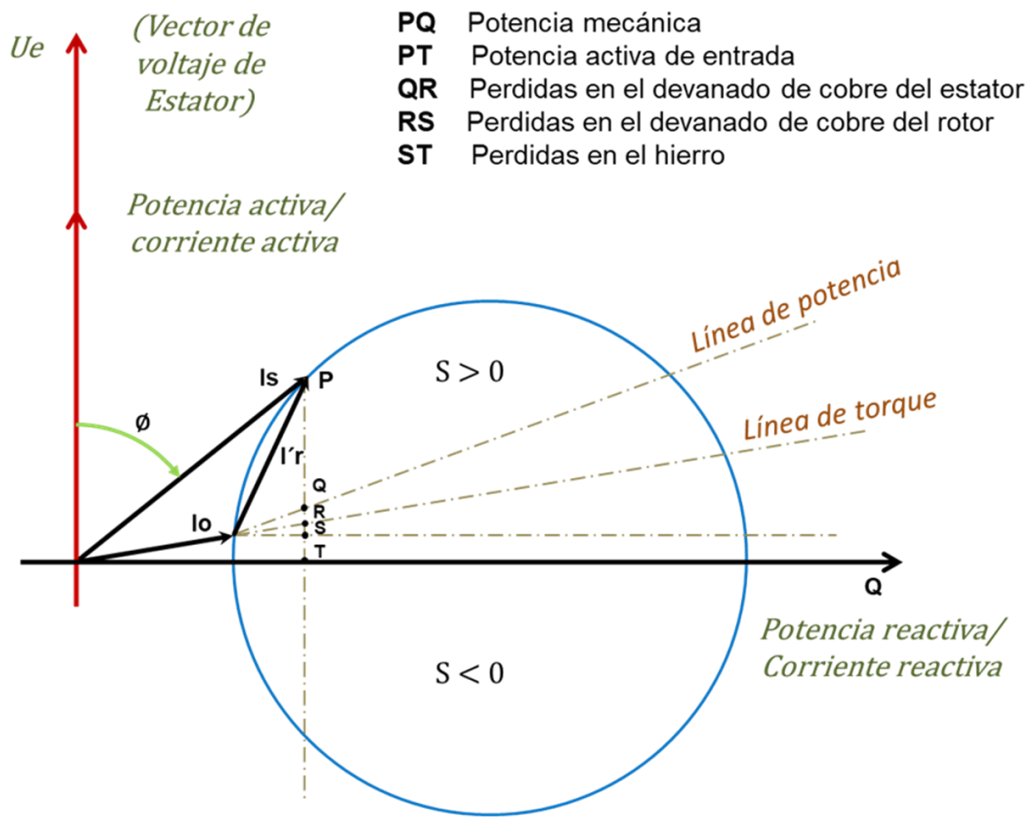


Figura 1.110. Diagrama de círculo para máquinas asíncronas.

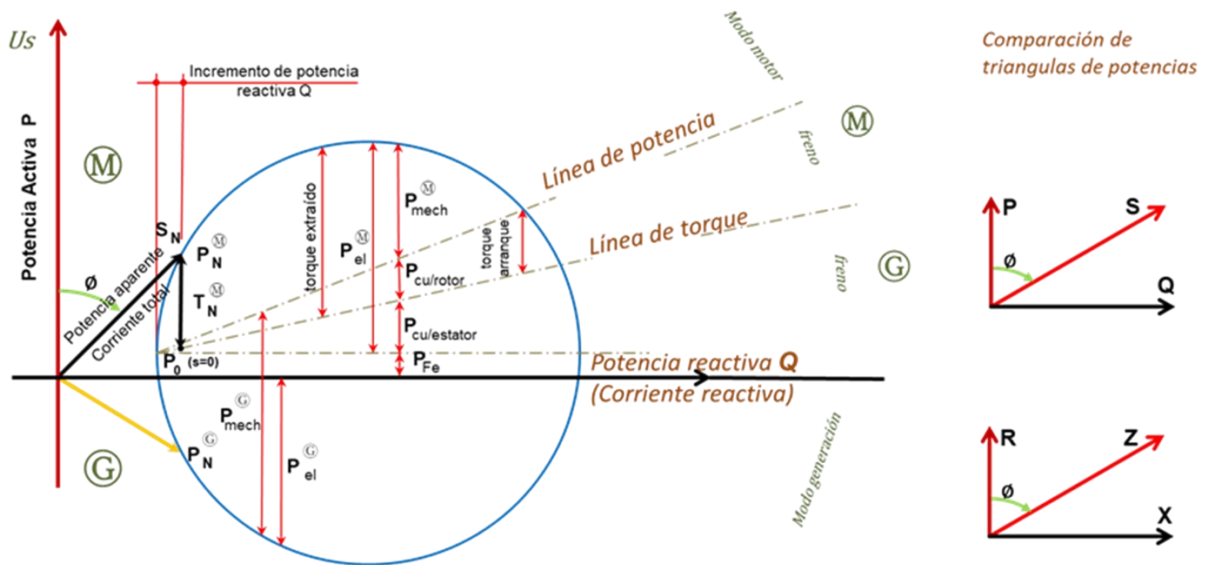


Figura 1.111. Diagrama de círculo para máquinas asíncronas.

Consideraciones generales sobre la selección de una máquina de inducción como generador.

Idealmente, la selección de un Motor de inducción (M) actuando como Generador (G) debería ser tan fácil como la selección de un generador: los folletos de los fabricantes se revisan en busca de la máquina que coincida con la potencia disponible del motor primario (turbina) con la máxima eficiencia.

Sin embargo, este no es el caso actualmente debido a la falta general de experiencia registrada con los motores de inducción cuando trabajan como generadores en aplicaciones prácticas.

La predicción del rendimiento de la máquina en modo generador no se puede encontrar en los manuales de los fabricantes ni en ningún otro lugar. Las reglas generales para la selección de un IMA pueden funcionar bien para ciertos diseños, mientras que fallarán para otros. Esto es especialmente cierto para el rango de potencia pequeño de las máquinas asíncronas (0,5 a 50 kW).

Los motores de inducción de diferentes diseños pueden tener una salida similar al trabajar como Motor (M), pero pueden producir un rendimiento considerablemente diferente al generar. Esto se puede ilustrar mejor con el diagrama circular.

Considere dos motores, A y B, de potencia similar ($P_n = 2,2 \text{ kW}$); El motor B, sin embargo, ha sido diseñado para arrancar cargas de alta inercia, es decir, su par de arranque es mayor que el del motor A.

Esta característica especial del motor B se ha logrado mediante una construcción de barra de rotor más elaborada (doble jaula), pero solo en él a expensas de una eficiencia ligeramente inferior y un factor de potencia $\cos \phi$ más bajo en el punto de funcionamiento nominal.

Esto se representa en el diagrama circular (Ver figura 1.112) mediante un desplazamiento del círculo hacia corrientes (o potencia) más altas tanto activas como reactivas.

Es importante tener en cuenta que la salida de potencia mecánica sigue siendo esencialmente la misma para ambos motores. Comparando las curvas de magnetización de estas dos máquinas (*ver en la siguiente figura 1.113*), podemos ver que el motor de doble jaula opera más profundamente en el rango saturado (mayor corriente de magnetización a voltaje nominal), de ahí su mayor demanda de potencia reactiva.

También es el efecto de la saturación lo que hace que el diagrama circular parezca algo diferente de la teoría:

La forma circular de la curva no se mantiene al cambiar de motor a generador; aparece una concavidad diferente en aproximadamente la corriente sin carga (deslizamiento = 0). Esta característica es aún más distintiva para la máquina altamente saturada. En funcionamiento con generador, la corriente nominal del estator I_e (o la potencia aparente S) no debe exceder la corriente nominal en funcionamiento del motor para evitar el sobrecalentamiento.

Por lo anterior, el punto de funcionamiento máximo en modo generador se puede encontrar a la misma distancia, es decir, desde cero, pero en la mitad inferior del círculo.

La figura 1.112 muestra que la producción de energía eléctrica al generar es menor de lo que cabría esperar de la teoría (diagrama de círculo ideal): la concavidad en la curva reduce considerablemente la potencia de salida. Y en el caso del motor *B altamente saturado*, la salida eléctrica no es ni la mitad de la del motor *A*.

Además, el requisito de *potencia reactiva* de la máquina de inducción actuando como generador *B* ha aumentado más desde el funcionamiento del motor al generador que el del motor *A*.

Y cuando se le opera como una unidad generadora de electricidad independiente, los capacitores requeridos para suministrar la corriente reactiva agregarán costos adicionales a la unidad *B*.

Por lo tanto, la regla esencial para la selección de una máquina de inducción asíncrona en modo generador se puede resumir de la siguiente manera:

Los motores saturados no son adecuados para el trabajo como generador y deben evitarse.

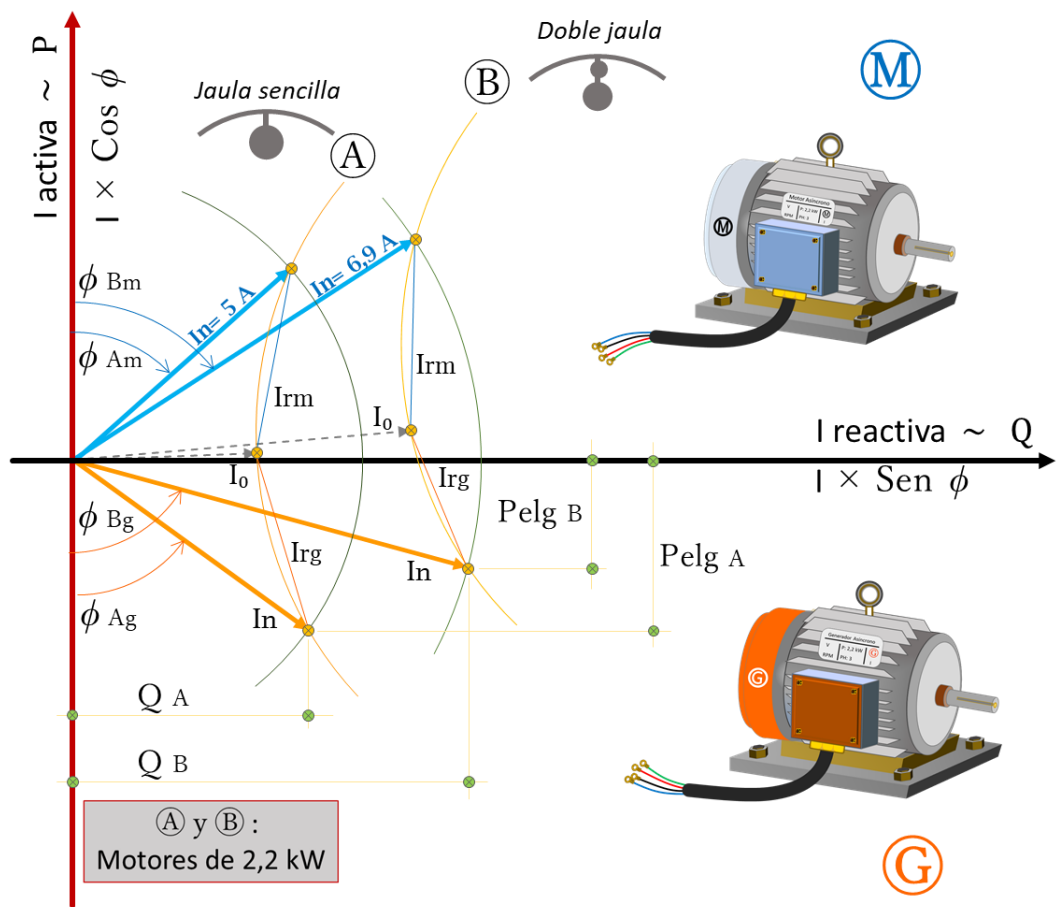


Figura 1.112. Diagrama del circulo para dos motores de potencias similares pero de diferentes diseños en su jaula de ardilla

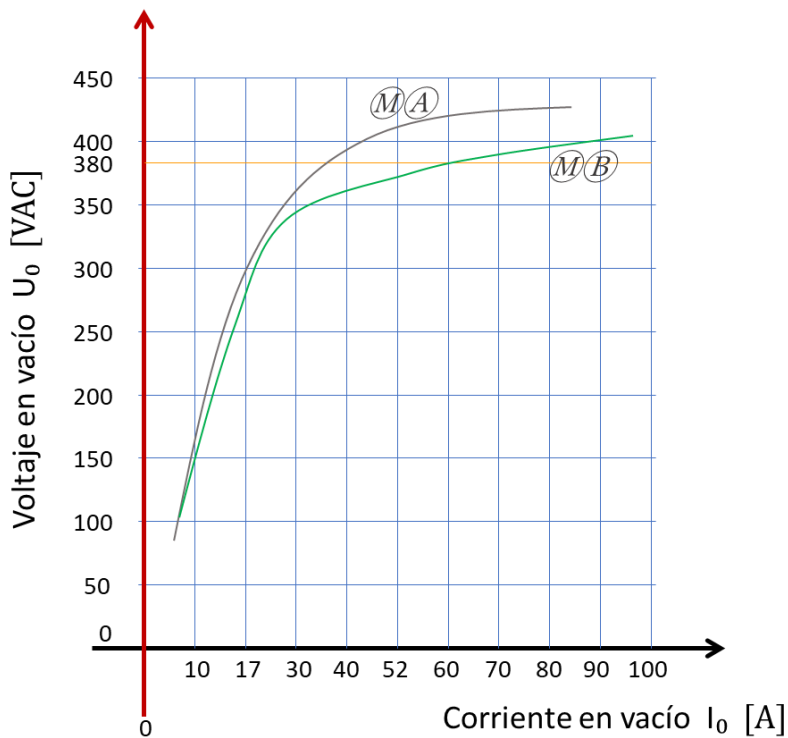


Figura 1.113. Curvas de magnetización de dos maquinas de Inducción en modo motor

Conclusión:

Se abordaron acá varios de los aspectos teóricos de la maquina asíncrona trifásica los cuales son el fundamento de este tipo de máquinas. Estos aspectos están lejos de cubrir la totalidad de la comprensión de las maquinas rotativas de inducción ya que es inmenso este campo y aún hoy se sigue investigando y desarrollando.

Pero lo que si constituye esta base teórica es que es un motivador para el estudio y la aplicación de este tema tan útil y tan apasionante (para algunos) como lo son las maquinas rotativas y más aún las maquinas rotativas asíncronas trifásicas.

Capítulo 2

Normas Usadas

Objetivo específico:

Sondear el campo normativo que abarca el hardware operativo del banco de trabajo de este estudio y listarlo de tal manera que se comprenda en donde aplican las normas que se mencionarán.

Este trabajo comprende dos partes principales:

Una parte de Hardware operativo (ver figura 2.1), es decir, una parte en donde implementamos un banco de pruebas para analizar las maquinas asincrónicas trifásicas. Es una componente eléctrica que comprende motores eléctricos de inducción y un tablero eléctrico de maniobra y control para dichos motores. Para esta parte listaremos las normas utilizadas, mencionando las normas locales y algunas internacionales.

Hardware operativo

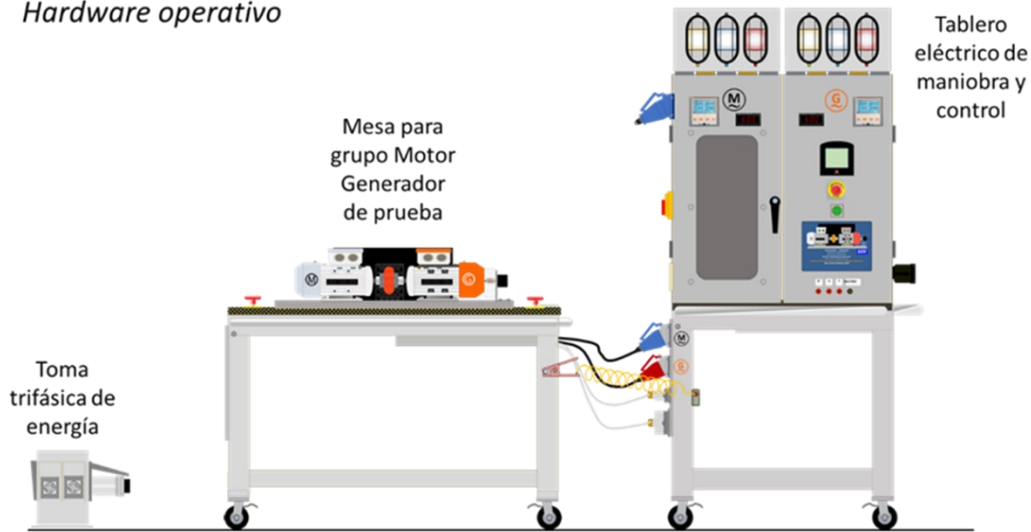


Figura 2.1. Hardware operativo. Banco de trabajo (M) - (G) de inducción.

La otra parte la compone un trabajo escrito en donde se incluye la forma de operar el Hardware anteriormente mencionado. Esta forma de operación del equipo también debe observarse dentro de un marco normativo, el cual mencionaremos y relacionaremos con este trabajo.

Las normas son de carácter regional para Colombia (Ver figura 2.2), en donde se realiza este trabajo y hay también normas internacionales (Ver figura 2.3) que presentan muy buenas recomendaciones tanto a nivel de montaje como a nivel de trabajo practico de la tesis.

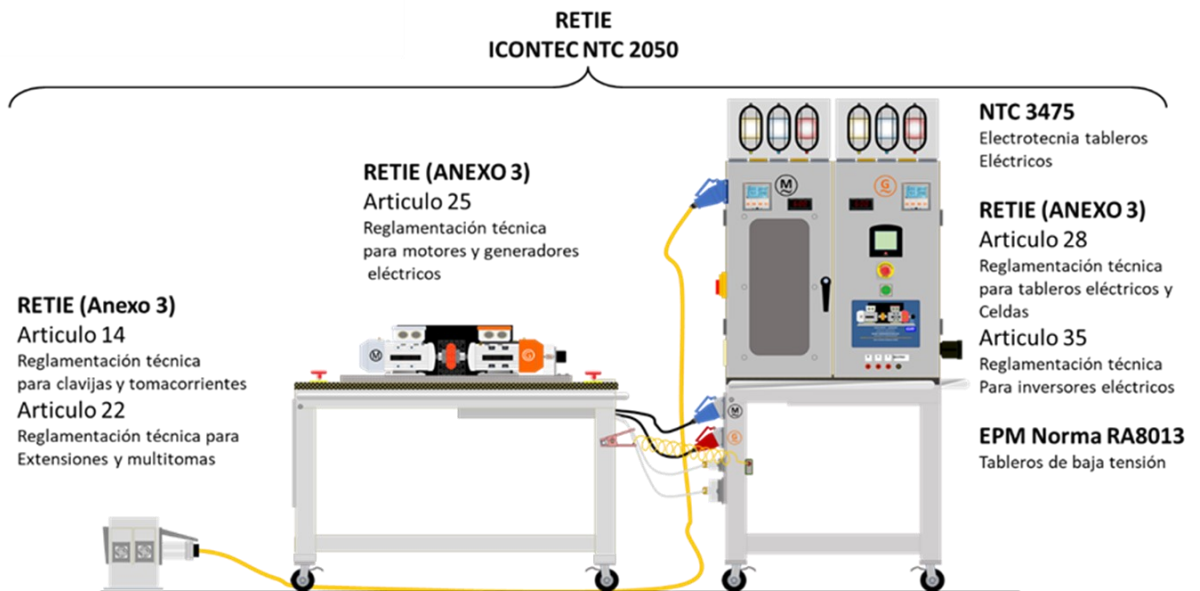


Figura 2.2. Detalle de normas Nacionales.

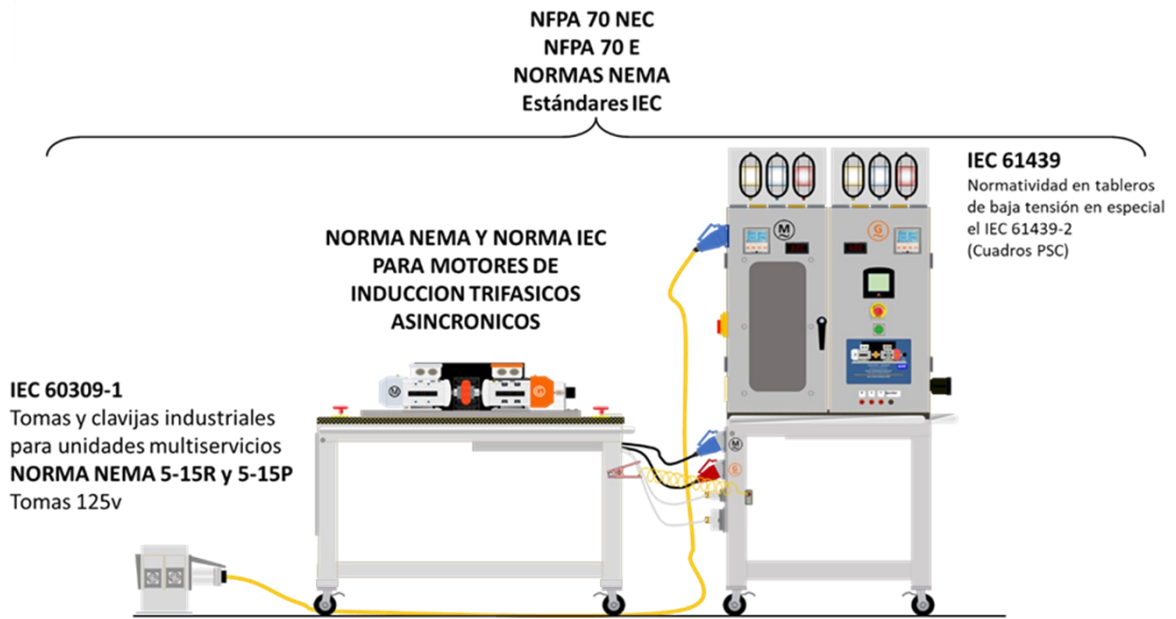


Figura 2.3. Detalle de normas Internacionales.

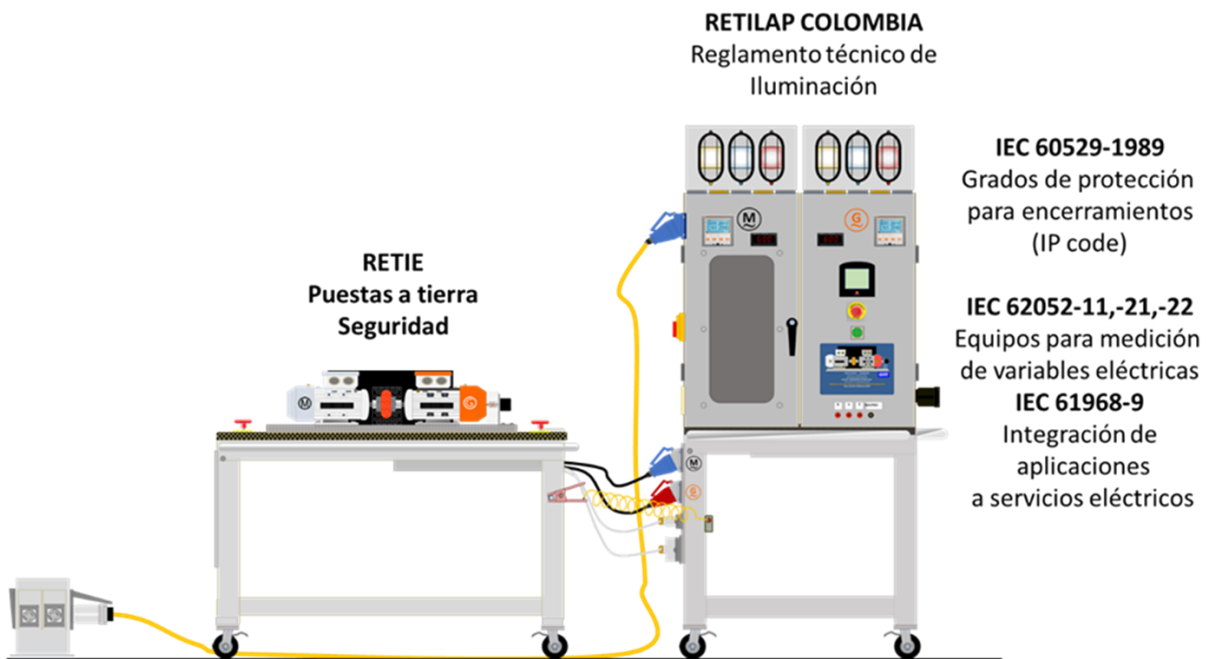


Figura 2.4. Otras normas Usadas.

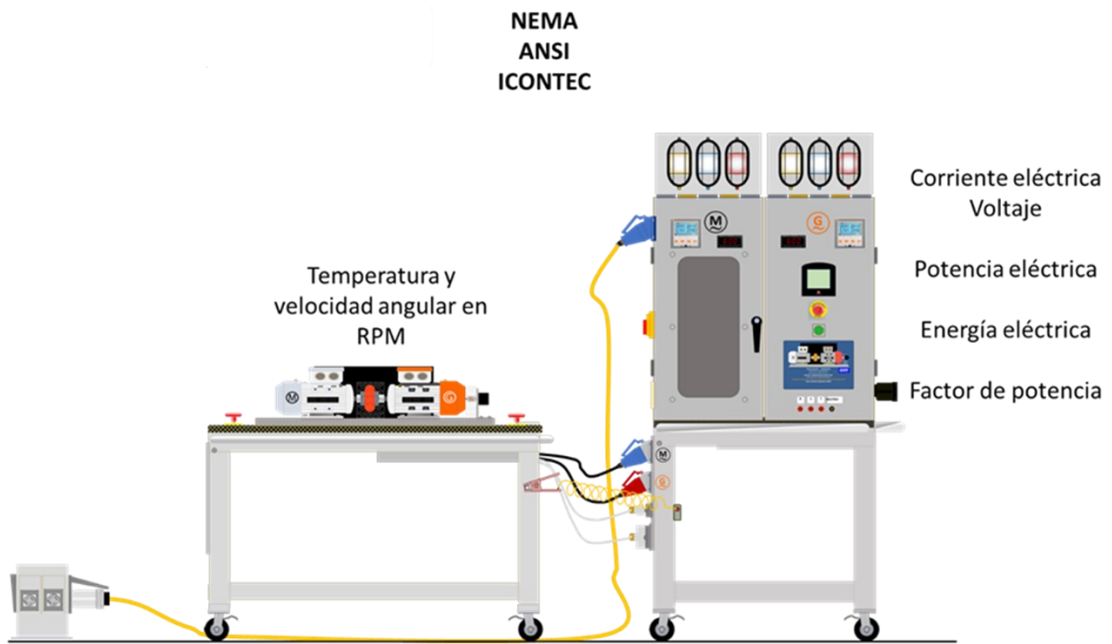


Figura 2.5. Normas para Instrumentación (de carácter internacional).



Figura 2.6. Normas para Referencia.

RETIE – Colombia.

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE tiene como objeto fundamental establecer las medidas tendientes a garantizar la seguridad de las personas, de la vida tanto animal como vegetal y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de origen eléctrico. Sin perjuicio del cumplimiento de las reglamentaciones civiles, mecánicas y fabricación de equipos. Para este trabajo muchos apartes del reglamento aplican pero los de mayor interés pueden ser los siguientes:

- RIESGOS ELÉCTRICOS
- REQUISITOS TÉCNICOS ESENCIALES
- REQUISITOS QUE DEBEN CUMPLIR ALGUNOS PRODUCTOS USADOS EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS
- REQUISITOS PARA LAS INSTALACIONES DESTINADAS AL USO FINAL DE LA ELECTRICIDAD

Norma ICONTEC NTC 2050 CODIGO ELECTRICO COLOMBIANO.

El objetivo de este código es la salvaguardia de las personas y de los bienes contra los riesgos que pueden surgir por el uso de la electricidad.

Este código contiene disposiciones que se consideran necesarias para la seguridad. El cumplimiento de las mismas y el mantenimiento adecuado darán lugar a una instalación prácticamente libre de riesgos, pero no necesariamente eficiente, conveniente o adecuada para el buen servicio o para ampliaciones futuras en el uso de la electricidad.

Dentro de los riesgos, se pueden resaltar los causados por sobrecarga en instalaciones eléctricas, debido a que no se utilizan de acuerdo con las disposiciones de este código. Esto sucede porque la instalación inicial no prevé los posibles aumentos del consumo de electricidad. Una instalación inicial adecuada y una previsión razonable de cambios en el sistema, permitirá futuros aumentos del consumo eléctrico.

Este código no tiene la intención de marcar especificaciones de diseño ni de ser un manual de instrucciones para personal no calificado.

Nota: Los Primeros cinco capítulos de la Norma ICONTEC NTC 2050 hacen parte del Reglamento técnico de Instalaciones eléctricas de Colombia RETIE. Ver figura 2.7

Para esta tesis aplican los primeros cuatro capítulos de este código.

INSTALACIONES BÁSICAS. Son las contempladas en los 4 primeros capítulos del Código Eléctrico Colombiano NTC 2050

CAP. 1: Definiciones y requisitos generales.

CAP. 2: Alambrado y protecciones.

CAP. 3: Métodos y materiales.

CAP. 4: Equipos de uso general.

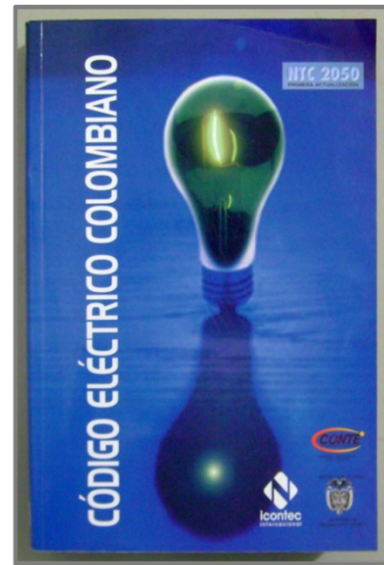


Figura 2.7. RETIE Colombia .

Norma ICONTEC NTC 3475 ELECTROTECNIA. TABLEROS ELECTRICOS.

Esta norma contiene se remite a detallar, componentes, unidades de medición, encerramientos, bases y soportes, cubiertas, barreras y divisiones, terminales de alambrado, espacio para el cableado, puesta a tierra y conexión, ensayo de temperatura, ensayo de lluvia, ensayo de corriente de corto circuito, etc. Ver figura 2.8.

La norma aplica para este trabajo para el tema de componentes, encerramiento, bases y soportes, terminales de alambrado, espacio para el cableado, puesta a tierra y diferentes conexiones internas y de entrada y salida, tanto en el tablero de control como en la mesa donde se ubica el grupo $\text{M} - \text{G}$ a estudiar.



Figura 2.8. Norma ICONTEC NTC 3475:1996
Electrotecnia

Norma IEC 60034-34 especifica los niveles de eficiencia energética para motores de inducción eléctricos trifásicos, de velocidad única, de jaula de ardilla con 2, 4 o 6 polos. Clasifica tres niveles:

IE₁ (estándar),

IE₂ (High),

IE₃ (Premium).

Para cada nivel la eficiencia se define para un rango de salida nominal desde 0,75 a 375 kW.

En la Unión Europea el nivel IE₂ fue obligatorio para todos los nuevos motores desde el 16 de junio de 2011. La clase IE₃ fue obligatoria desde el 1 de enero de 2015 (desde 7,5 a 375 kW) y desde el 1 de enero de 2017 (desde 0,75 a 375 kW). Ver figura 2.9.

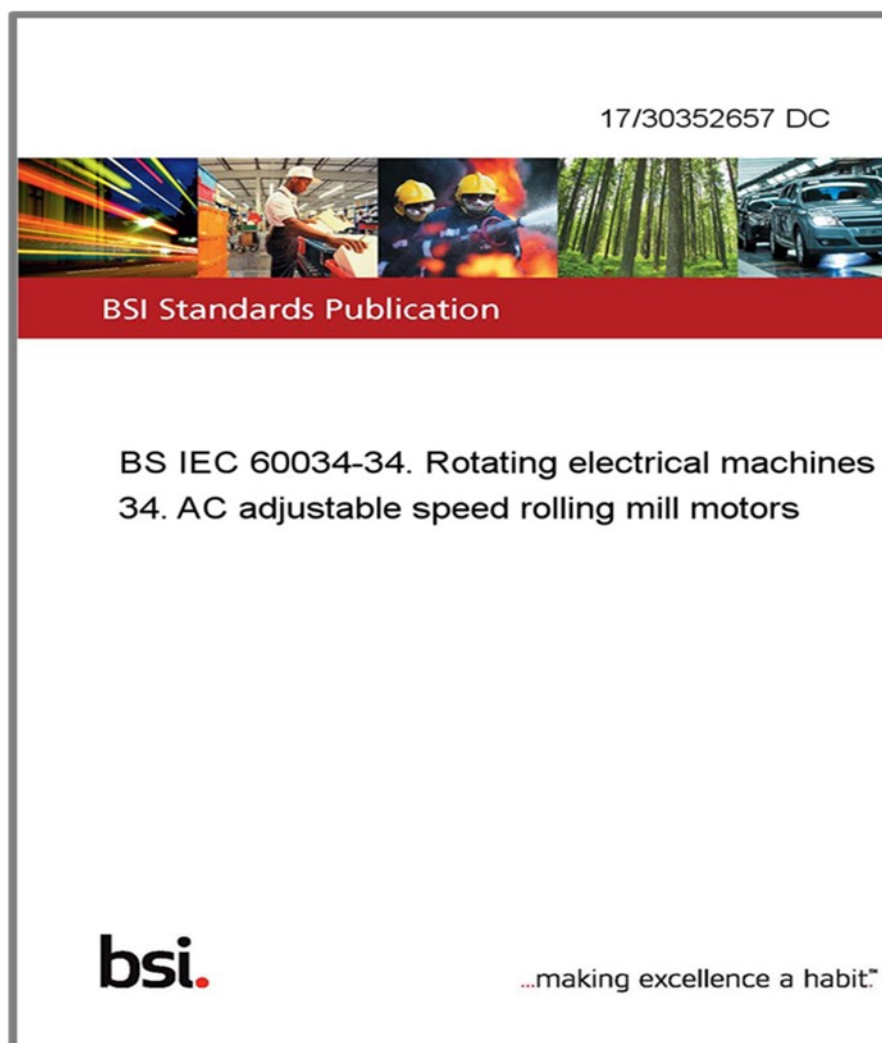


Figura 2.9. Norma Internacional IEC 60034-34

Norma técnica colombiana NTC 2805: Máquinas eléctricas rotatorias. características nominales y características de funcionamiento. Ver figura 2.10.

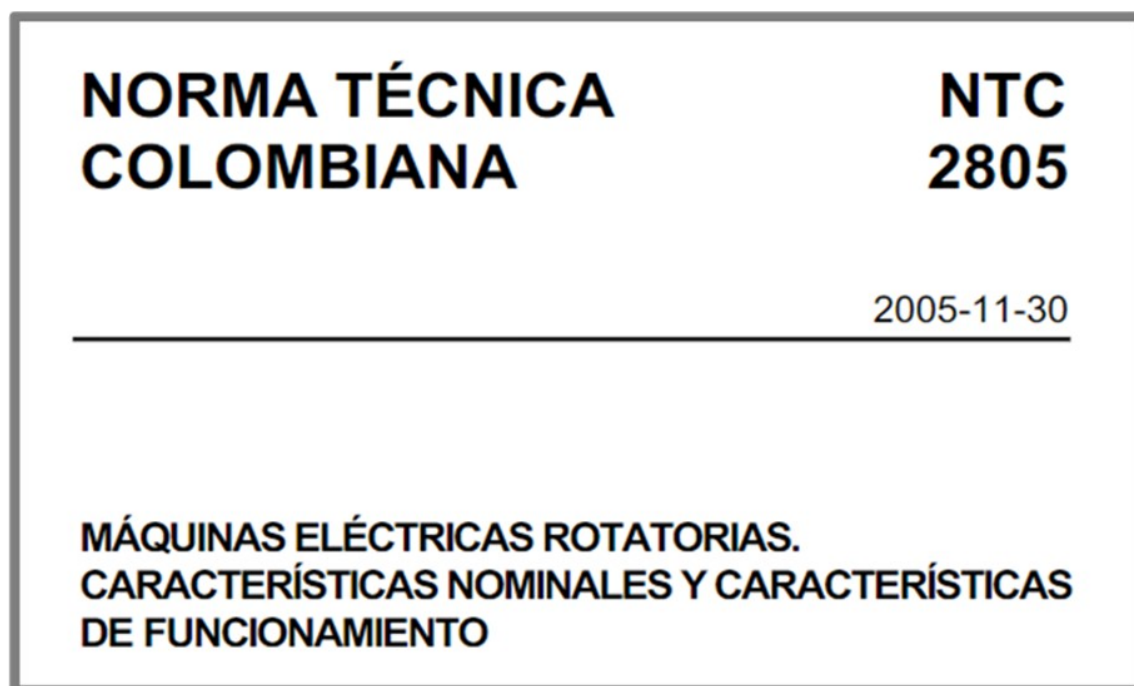


Figura 2.10. Norma ICONTEC NTC 2805.

Aplica para este trabajo en el tema de los grupos

Motor – Generador M - G que posee el banco de trabajo.

Esta norma establece los parámetros de desempeño de arranque para ocho diseños de motores trifásicos de inducción jaula de ardilla de una sola velocidad, de 50 Hz o 60 Hz, de acuerdo con la NTC 2805 (IEC 60034-1) que:

- Tengan una tensión nominal hasta de 1 000 V;
 - Estén destinados para arranque directo o estrella-triángulo;
 - Estén dimensionados para servicio Tipo S₁ (servicio continuo);
 - Estén contruidos con cualquier grado de protección y protección contra explosiones. Esta norma también se aplica a los motores de doble tensión siempre y cuando el nivel de flujo de saturación sea el mismo para ambas tensiones.

EPM Norma RA8013

Tableros de baja tensión. Ver figura 2.11.

Esta norma describe las características que deben tener las celdas y los tableros que van a encerrar equipos de protección, transformadores de potencia, seccionadores de media tensión, capacitores e interruptores de baja tensión, entre otros.

Utilizamos de esta norma la parte relacionada con:

- Conductores que ingresan a las celdas y tableros.
- Características de los barrajes.
- Barra de puesta a tierra.

epm®	NORMAS TÉCNICAS PARA REVISIÓN	
	CELDA DE MEDIA TENSIÓN Y TABLEROS DE BAJA TENSIÓN	RA8-013
<p>1. ALCANCE</p> <p>Esta norma describe las características que deben tener las celdas y los tableros que van a encerrar equipos de protección, transformadores de potencia, seccionadores de media tensión, capacitores e interruptores de baja tensión, entre otros.</p> <p>Para conocer las especificaciones de tableros de medida de baja tensión remitirse a la norma EPM RA8-012.</p> <p>Para las características del doble tiro y seccionador remitirse a la norma EPM RA8-010 y RA8-014.</p>		
<p>2. DEFINICIONES</p> <p>2.1. <u>Celda</u>: Es una estructura construida para instalarse de manera autosoportada y destinada a encerrar transformadores de potencia, transformadores de corriente, de potencial y equipos de seccionamiento de media tensión tales como interruptores o seccionadores.</p> <p>2.2. <u>Tablero</u>: Es una estructura metálica o plástica que cumpla con las condiciones mecánicas y de seguridad, construida para instalarse generalmente de manera empotrada o sobre puesta en los muros o paredes, o autosoportada y destinada a encerrar equipos de baja tensión.</p> <p>El tablero considerado en esta norma será utilizado para alojar interruptores termomagnéticos y equipos eléctricos de baja tensión.</p> <p>De acuerdo con lo establecido en el RETIE, para nuestro caso, los tableros también serán conocidos como cuadros, gabinetes, paneles, consolas o armarios eléctricos de baja y media tensión.</p> <p>2.3. <u>Barraje del tablero</u>: Es la barra de cobre electrolítico, de dimensiones y características debidamente especificadas de acuerdo con las normas técnicas de EPM o normas NTC, que se utilizan para las partes energizadas, el neutro y la tierra.</p> <p>2.4. <u>Partes vivas o energizadas</u>: Conductores, barraje, terminales o componentes eléctricos sin aislar o expuestos, que crean riesgo de descarga eléctrica.</p>		
<p>3. CARACTERÍSTICAS GENERALES</p> <p>Todas las celdas y los tableros deberán cumplir con lo establecido en el numeral 17.9 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. Adicionalmente, deberá cumplir con lo establecido en la sección 384 de la norma NTC 2050.</p>		
PRIMERA EDICIÓN: ABRIL - 2005	DIBUJÓ: ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN	APROBÓ: SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN
ÚLTIMA PUBLICACIÓN: DICIEMBRE - 2010	REVISÓ: ÁREA INGENIERÍA DISTRIBUCIÓN	Página 1 de 9

Figura 2.11. Norma EPM RA8-013 – Tableros en baja tensión.

Conclusión:

El banco e trabajo eléctrico que comprende este estudio, se encuentra inmerso en un grupo de normas que tratan de asegurar un trabajo seguro y eficiente con él. Normas que tienen que ver con el cálculo de conductores y partes eléctricas hasta normas relacionadas con el aspecto seguro operativo y tecnico e incluso cobijando también conceptos tales como recomendaciones en el uso de elementos y de practicas de eficiencia energética.

Capítulo 3

Seguridad eléctrica y ergonomía

Objetivo específico:

Este capítulo busca contextualizar el banco de pruebas dentro de un ámbito de trabajo seguro y bajo unas condiciones de trabajo adaptadas a las personas que están dentro del ámbito del laboratorio de Hidráulica.

El banco de trabajo posee una connotación marcada del tipo eléctrico y por lo tanto se busca en este capítulo mostrar y explicar los aspectos de seguridad eléctrica en todas las partes que componen el banco, así como también los aspectos de seguridad en donde hay presencia de elementos con partes en movimiento y cercanos a las personas.

También se busca exponer los elementos ergonómicos **más** relevantes que posee el banco, los cuales hacen que el equipo facilite y asegure el trabajo cómodo de las personas.

Los tableros eléctricos son equipos que concentran dispositivos de protección y de maniobra o comando, desde los cuales se puede proteger y operar toda una instalación o una máquina o un proceso.

Dada la presencia de energía eléctrica, es necesario que cualquier trabajo en estos equipamientos respete algunas medidas de seguridad.

El trabajar con energía eléctrica conlleva riesgos de diversa consideración, desde quemaduras menores hasta mutilaciones e incluso la muerte del operador. Por esta razón, se deben seguir ciertas medidas de seguridad en el trabajo con tableros eléctricos.

Para comenzar, todos los tableros deberán llevar estampada en forma visible, legible e indeleble la marca de fabricación, la tensión de servicio, la corriente nominal y el número de fases. Además, deben encontrarse señalizados (advertencia de riesgo de electrocución) y con llave, montarse dentro de cajas, gabinetes o armarios cerrados, y ubicarse en lugares seguros, de fácil acceso y libres de obstáculos. Ver figura 3.1

Código	PBMG-001	
Modelo	Prototipo Banco Motor Generador	
N° de Fabricación	001	
T° Max / Min.	45/5°C	
Pot. De diseño	1,2HP	
Voltaje	230 VAC	
N° Fases	3	
Año de fabricación	2020	
Corriente máxima.	6 AMP.	Frecuencia 60 HZ

Figura 3.1. Placa de fabricación del banco de trabajo.

Los tableros eléctricos, las tomas de corriente, los sistemas de iluminación y, en general, todo aparato eléctrico nunca debe entrar en contacto con agua o humedad, salvo que sean a prueba de agua, pero esto deberá previamente ser comprobado. Por lo tanto, nunca se debe operar tableros, aparatos o extensiones eléctricas con las manos o zapatos mojados o húmedos, o pisando superficies húmedas o mojadas.

Todo tablero deberá contar con una barra de conexión a tierra.

Si la caja, gabinete o armario que contiene el tablero es metálico, deberá protegerse contra tensiones peligrosas y deberá ser conectado a tierra.

Para evitar accidentes, conviene que el tablero esté blindado, y encerrados los elementos conectados a fuentes de energía, para evitar el acceso de personas no autorizadas. Ver figura 3.2.

Los circuitos de cada uno de los elementos del tablero deben ser de fácil reconocimiento y acceso.

Y para realizar reparaciones, debe bloquearse el paso de corriente.



Chapa de seguridad para cerramiento seguro del tablero



Protecciones eléctricas a los circuitos y elementos activos del banco de pruebas.

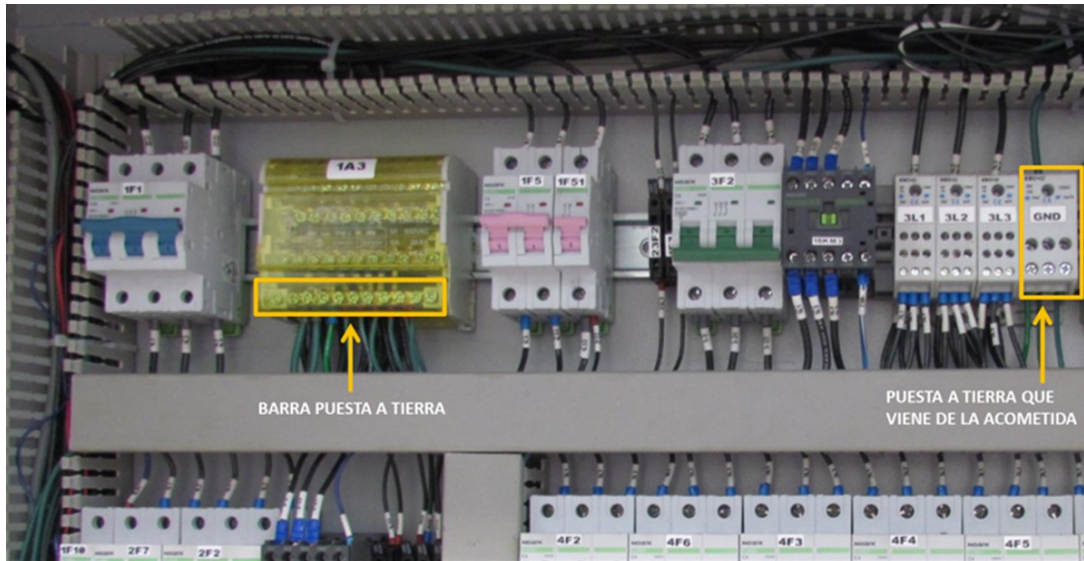
Figura 3.2. Encerramiento de elementos energizados. Marcación de todos los componentes para fácil identificación de cada una de las partes.

La Puesta a Tierra del banco.

Junto con las protecciones instaladas al Tablero del banco de pruebas, este posee una barra de tierra interna, la que se conecta a la malla de tierra de la Instalación eléctrica mediante un cable de conexión a tierra (ya sea desnudo o con aislante de plástico de color verde o amarillo). Ver figura 3.3.

En términos generales, la normativa obliga a que todos los tomacorrientes de la Instalación estén conectados a tierra (es decir que cuenten con el conductor de tierra que equipotencializa a la instalación).

El Tablero General del banco de pruebas sirve para administrar adecuadamente la energía que va al motor y que viene del generador y es el lugar donde se concentran los sistemas de protección que brindan seguridad al técnico del laboratorio.



Barras de acometida.

Sistema trifásico de tres barras mas la barra de tierra en el tablero de potencia y control

Figura 3.3. Señalización de barrajes de puesta a tierra del banco de trabajo.

Definición de desconectador principal y de parada de emergencia:

El desconectador principal comanda la entrada principal de energía a todo el tablero del banco de trabajo. Esta diseñado con candado de seguridad para ser operado solo por personal autorizado. Ver figura 3.4.

La función de parada de emergencia sirve para prevenir situaciones que puedan poner en peligro a las personas, para evitar daños en la máquina o en trabajos en curso o para minimizar los riesgos ya existentes, y ha de activarse con una sola maniobra de una persona.

La función principal del dispositivo de parada de emergencia es la de parar la máquina o equipo lo más rápidamente posible. Este dispositivo se instalará en las máquinas en sitios fácilmente accesibles y reconocibles.

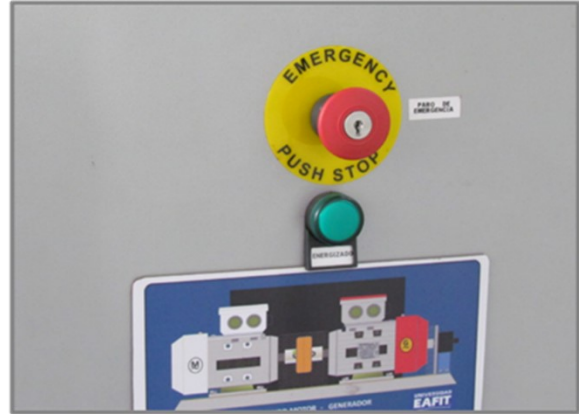
Al presionar el pulsador este se bloquea en la función de parada y girando el pulsador, se desbloquea su mecanismo y estará listo para ser pulsado nuevamente en una situación de emergencia.

El botón de parada de emergencia es de color rojo como estándar, a menudo con un fondo amarillo. Ver figura 3.5.



Blindaje del sistema.
Candado de seguridad en el desconectador principal

Figura 3.4 Desconectador Principal.



Parada de emergencia con llave.
Asegura la reposición segura por un técnico.

Figura 3.5 Parada de emergencia con llave.



Señalización interna del tablero para indicar peligro de riesgo eléctrico en los condensadores de carga del banco.

Figura 3.6 Visualización de elementos varios usados en el montaje del banco de trabajo. Adecuada señalización, conexiones seguras y elementos adecuados al tipo de montaje.



Parada de emergencia en la mesa de pruebas del grupo motor generador en estudio. Fácilmente accesible al usuario.

El tablero está diseñado ergonómicamente para su fácil operación en forma accesible segura.

Posee un pequeño escritorio para operar el tablero y visualizar las variables eléctricas de los indicadores existentes en su parte frontal. Ver figura 3.7

Se buscó proveer de instrumentos adecuados que al ser accionados el operador este los perciba, detecte, capte, actúe y reaccione apropiadamente con la indiscutible intención de salvaguardar su salud e integridad. Lo anterior se logra haciendo el uso correcto de formas, figuras, códigos de colores, luces de colores, en conjunto con ciertas normas ya establecidas (ver capítulo de normas) a nivel tanto nacional como internacional. Ver figura 3.6



Figura 3.7 Ergonomía del puesto de trabajo.

Nota adicional sobre la parada de emergencia:

La parada de emergencia del equipo se dispuso de tal forma que actúa totalmente independiente del PLC sobre los equipos de maniobra del motor impulsor, es decir que apaga el motor impulsor sin pasar por las entradas del PLC. Con esto se logra mayor seguridad al no depender de una unidad de control electrónica como lo es el PLC. Lo anterior implica el apagado de todos los equipos, en especial apaga el Motor y por ende al Generador, con lo que se logra parar el proceso de generación o de impulsión del Generador.

Visualización de las partes operativas del banco de trabajo.

Se observa este detalle en los siguientes esquemas del banco de trabajo.
Ver figuras 3.8 y 3.9

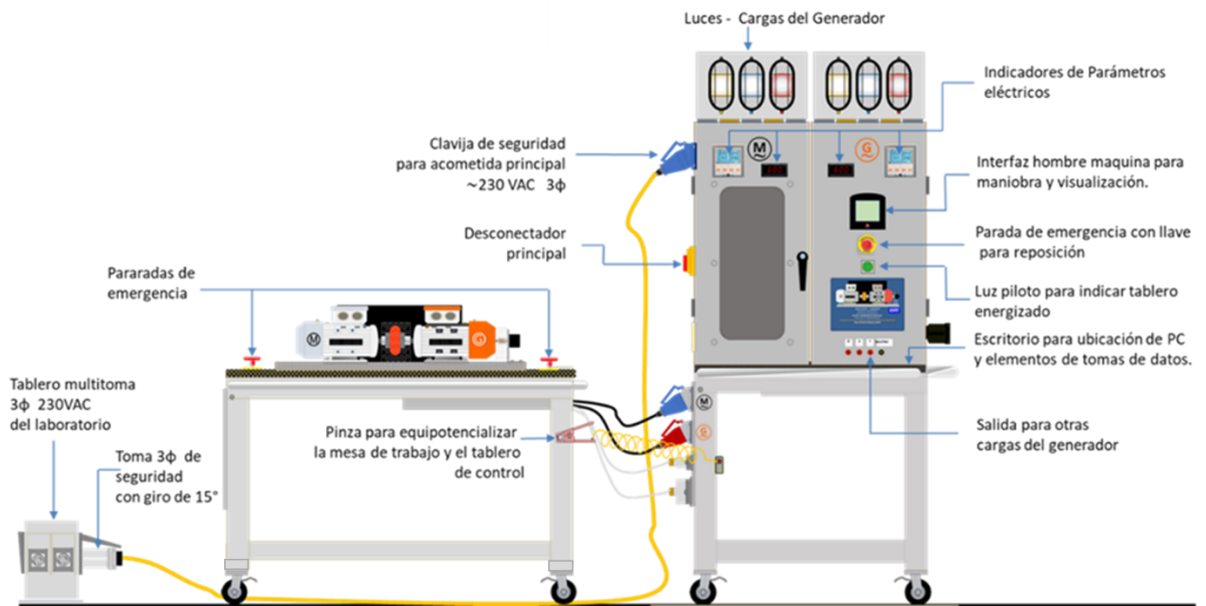


Figura 3.8. Visualización de partes operativas del equipo.

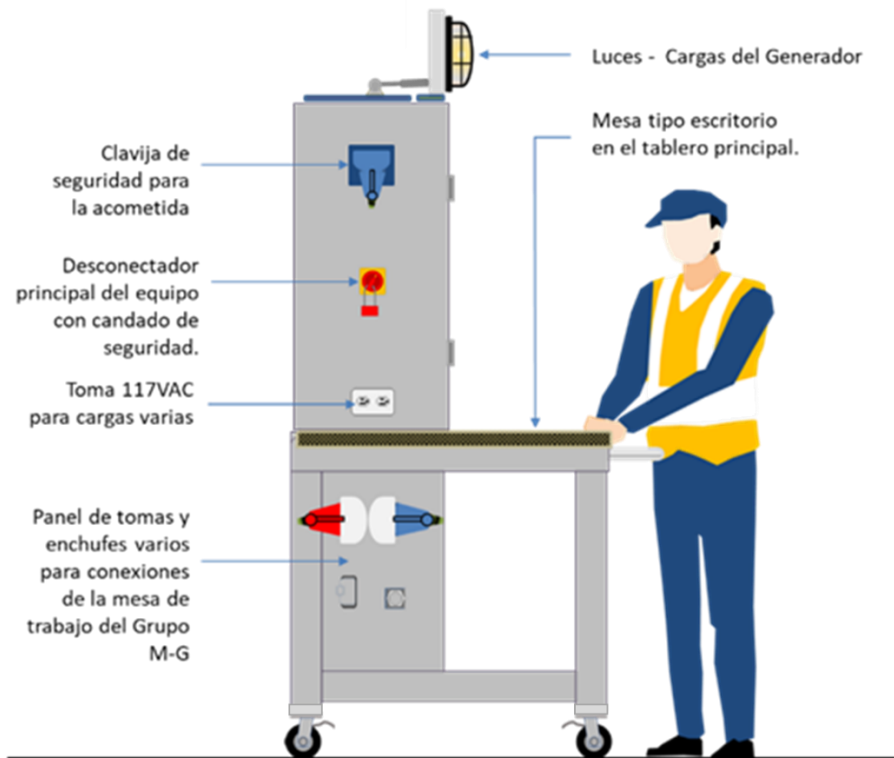


Figura 3.9. Visualización de partes operativas del equipo.

Guardas Protectoras .

Tipo de la protección:

Protección contra partes móviles expuestas.

Una guarda protectora, la cual es una protección de tipo permanente, es un elemento que solo puede ser eliminado con la ayuda de una herramienta, es decir es aquel elemento que se fija en su lugar permanentemente con miras a separar un elemento o espacio de otro.

Estos elementos son lo suficientemente resistentes para proteger contra intrusiones accidentales y se sujetan de forma muy segura al equipo. Las guardas tienen forma de U con pestañas para su fijación a la estructura sobre la que están montados los motores.

La guarda fija impide el acceso a una zona peligrosa en todas las direcciones.

La guarda fija no encierra completamente una zona de peligro fijo, pero evita o reduce el acceso a ella debido a sus dimensiones y su distancia hasta el elemento activo.

El equipo posee guardas protectores en:

Guarda protectora en U en el acople mecánico del grupo Motor – Generador (M) - (G).

Guarda protectora en U en el acople mecánico entre el encoder y el generador.

Ver figura 3.10.

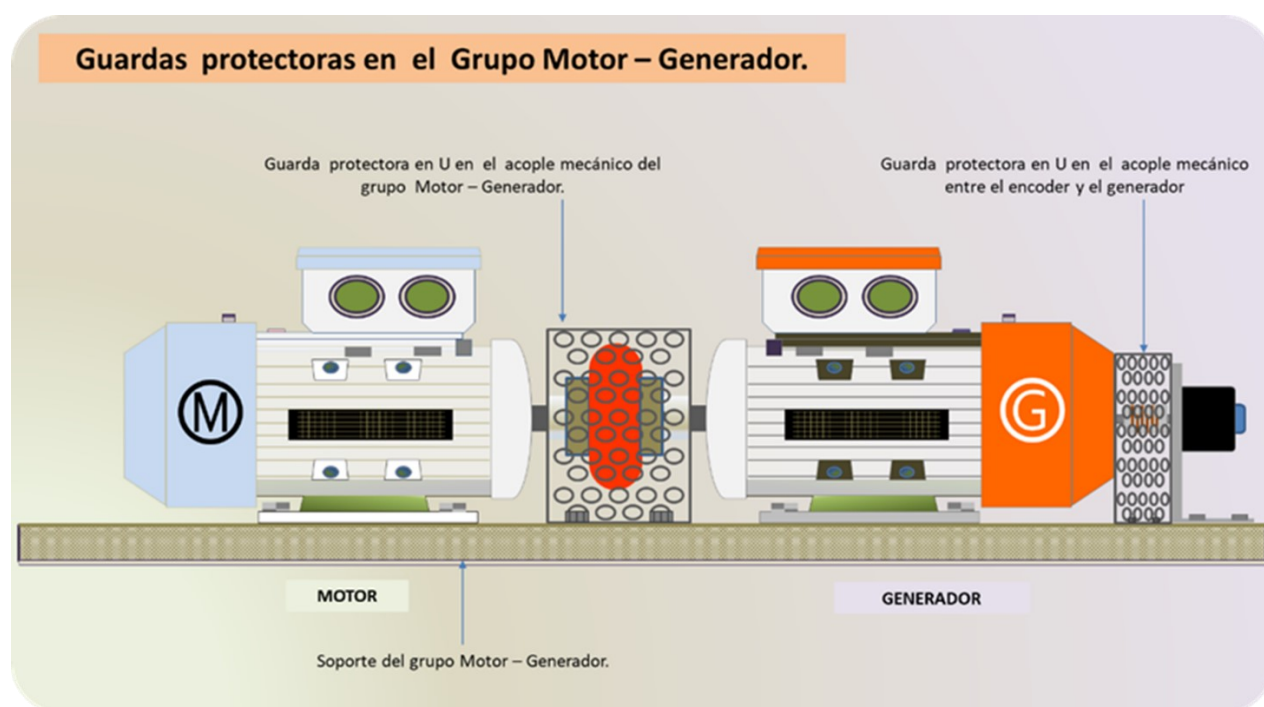


Figura 3.10. Guardas de protección para partes en movimiento.

Nota sobre las protecciones eléctricas:

El equipo posee las protecciones eléctricas de sobrecarga y de corto circuito adecuadas, las cuales pueden observarse en el catalogo de planos eléctricos del banco de motores. Ver figura 3.11. Este catalogo se puede ver en el capítulo: 18 ANEXOS

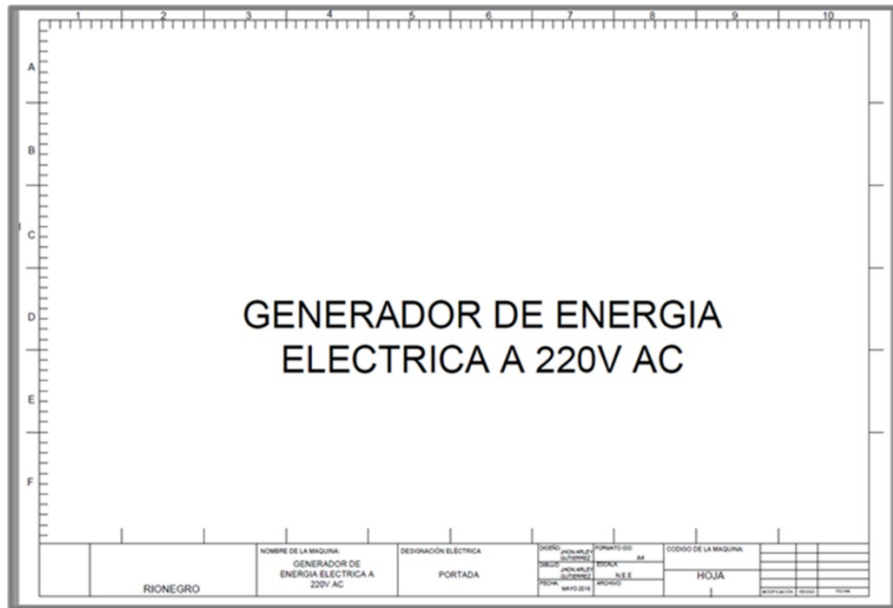


Figura 3.11. *Catalogo de planos eléctricos del equipo.*

Como referencia en este capítulo podemos anotar que la Norma NFPA70E fue de gran utilidad para el diseño de este banco de trabajo. Sobre todo en el tema de las paradas de emergencia y sistemas de bloqueo. Ver figura 3.12.

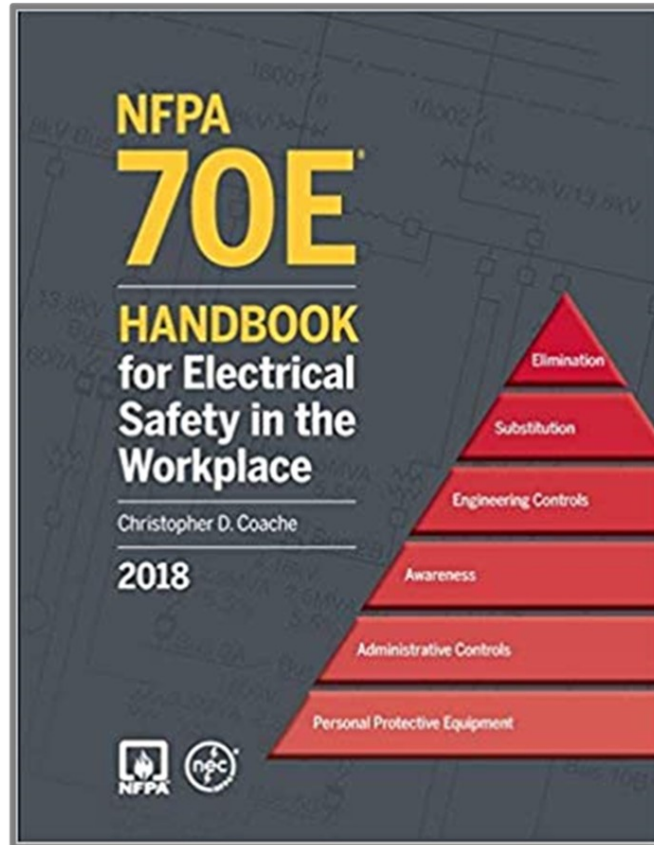


Figura 3.12. Norma NFPA 70E.

La NFPA 70E-Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo, es una norma de consenso general de la National Fire Protection Association NFPA, que refleja muchos años de experiencia de importantes participantes de la industria en general para reducir riesgos y accidentes de trabajo. Su última actualización es la NFPA 70E 2018, disponible en inglés y español.

El libro cuenta con tres capítulos principales y varios anexos, que en su totalidad atienden las necesidades fundamentales de la seguridad eléctrica, enfocándose en las prácticas seguras del trabajo, el uso de los EPP (Equipos de Protección Personal) adecuados, los requisitos de seguridad relacionados con el mantenimiento del sistema de suministro eléctrico, los requisitos de seguridad para equipos especiales y los requisitos de seguridad para las instalaciones.

Conclusión:

Se buscó que el diseño del equipo fuera del tipo modular rodante de tal forma que pudiese trasladar de un lado a otro dentro de las instalaciones del laboratorio. Este banco posee un grado de protección IP00 apto para sitios cerrados y ventilados.

El tablero fue pintado con pintura electrostática la cual lo protege en gran medida de la oxidación y alarga su vida útil en ambientes con humedad elevada.

Las paradas de emergencia y los distintos aspectos de seguridad eléctrica y mecánica del banco de trabajo, aseguran que este sea operado en forma segura y cómoda por aquellas personas que estudian los fenómenos asociados a las máquinas asíncronas de inducción. Lo anterior es importante complementarlo con la lectura de este libro en gran medida.

Capítulo 4

Diseño y Construcción del Equipo

Objetivo específico:

Mostrar el desarrollo paso a paso del proyecto.

El capítulo muestra el prototipo inicial del banco de trabajo y los cambios realizados a este, hasta llegar al banco de trabajo que constituye el hardware de este trabajo.

Esta evolución del proyecto busca también mostrar que el trabajo en conjunto de M y G puede lograrse con un tablero de control en forma ordenada, asimilable y segura.

El equipo se construyó luego de haber probado con suficiente tiempo un prototipo de un grupo motor generador M-G con motores asíncronos trifásicos de inducción.

Se trabajó en el prototipo con dos motores de inducción trifásicos tratando de lograr una configuración tal como la que se observa en un Video de Internet, del cual relacionamos su primera página en la diapositiva siguiente.

Este video nos ayudó mucho en la comprensión inicial de un grupo Motor – Generador.

El video muestra dos motores ABB de 0,22 kW conectados mecánicamente entre sí en sus ejes rotativos. Ver figura 4.1.

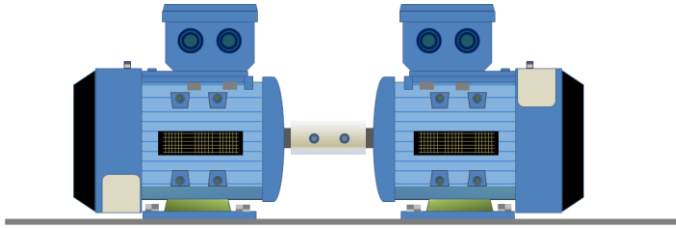
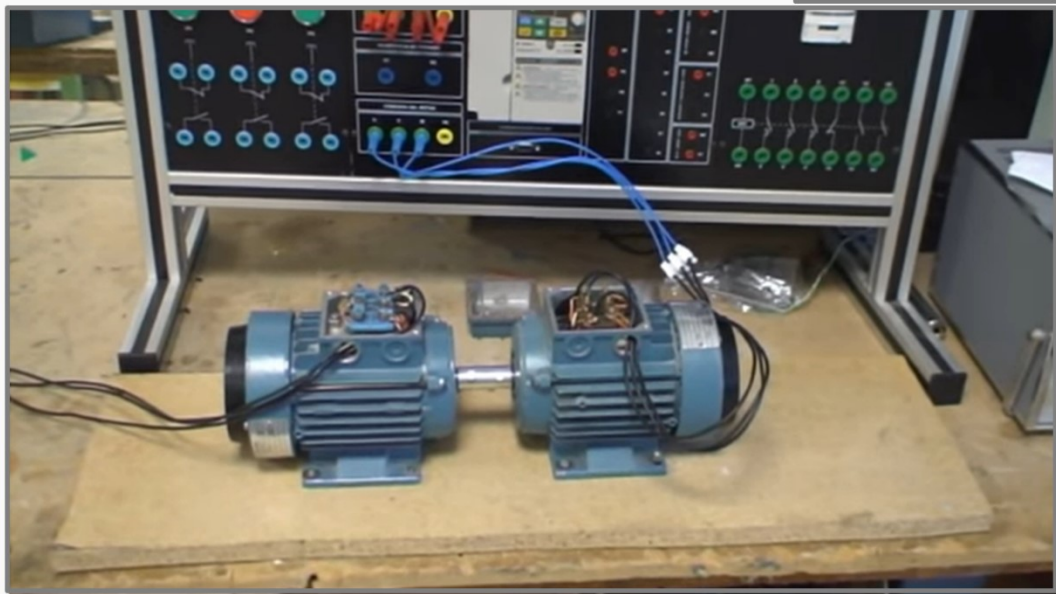


Figura 4.1. Dos motores 3 ϕ asíncronos marca ABB de 0,22 kW conectados entre si a través de un acople tipo rígido tipo manguito.



Vista en Internet 1.



https://www.youtube.com/watch?v=731ppW4eFaE&ab_channel=IESCincoVillas
Generador Asíncrono

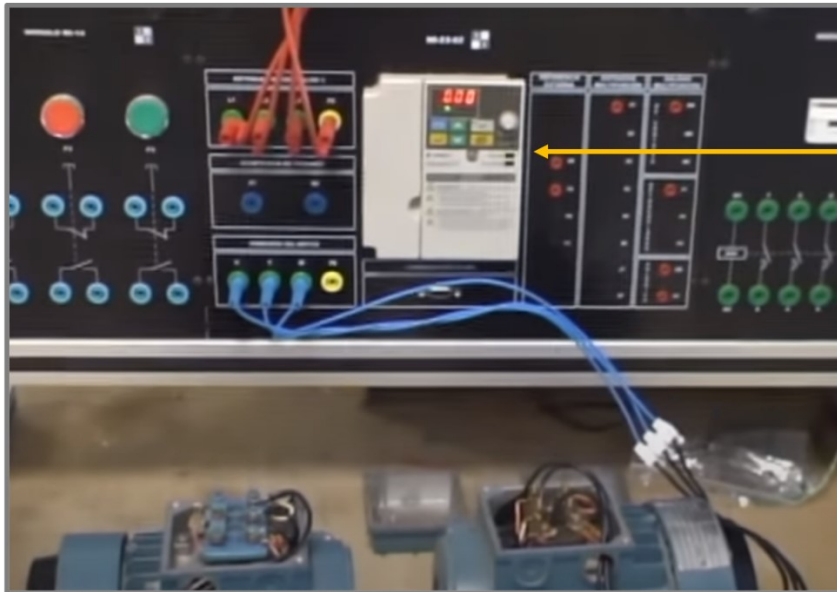
Figura 4.2. Vista de fotografía del video de los motores asíncronos. Este video fue muy útil en el desarrollo de este trabajo porque sirvió para compararlo con los avances del banco de \mathcal{M} - \mathcal{G} construido en esta tesis.

Uno de los motores hace las veces de un motor Primo impulsando al otro, el cual actúa como generador. Ver figura 4.2.

El motor primo impulsará al otro y lo llevará por encima de su velocidad de sincronismo.

Y para poder ejecutar lo anterior, el motor primo se asiste con un variador de frecuencia electrónico para poder variar su velocidad por encima y por debajo de 60 HZ (en donde se encuentra en su velocidad de sincronismo). Ver figura 4.3.

Con esta condición y con los condensadores de excitación activados, el generador entregará energía a un banco de bombillas trifásico conectado a la salida del generador.



Variador de frecuencia en el ensayo del video que se muestra en Internet.

https://www.youtube.com/watch?v=731ppW4eFaE&ab_channel=IESCincoVillas

Figura 4.3. Vista de fotografía del VDF del motor del grupo M - G del video que menciona en la figura anterior. Este Variador de frecuencia asiste al motor M para llevarlo un poco mas allá de la velocidad síncrona del generador. Es decir se lleva un poco mas allá de 60 Hz para que se presente la generación en G . Aprox. 64 Hz.

Vista en Internet 2.



https://www.youtube.com/watch?v=km7pnzb_sc4

GENERADOR TRIFASICO ASINCRONICO. Vista de Internet.

Figura 4.4. Vista de la fotografía de otro video en Internet – YouTube.

Se aprecia el VDF del motor M a la izquierda y el banco de condensadores de autoexcitación en paralelo y la carga trifásica de bombillas a la derecha. Se aprecia un motor sensiblemente mas potente que el generador G (el de la derecha) .

Basados en el video de la vista de Internet 1 (figura 4.2) se diseñó un primer prototipo de un grupo motor – generador en donde se buscaba tener la experiencia de la maquina asincrónica funcionando como generador.

Para lo anterior se trabajo con dos motores de inducción pequeños con la configuración que se muestra en la siguiente figura 4.5.

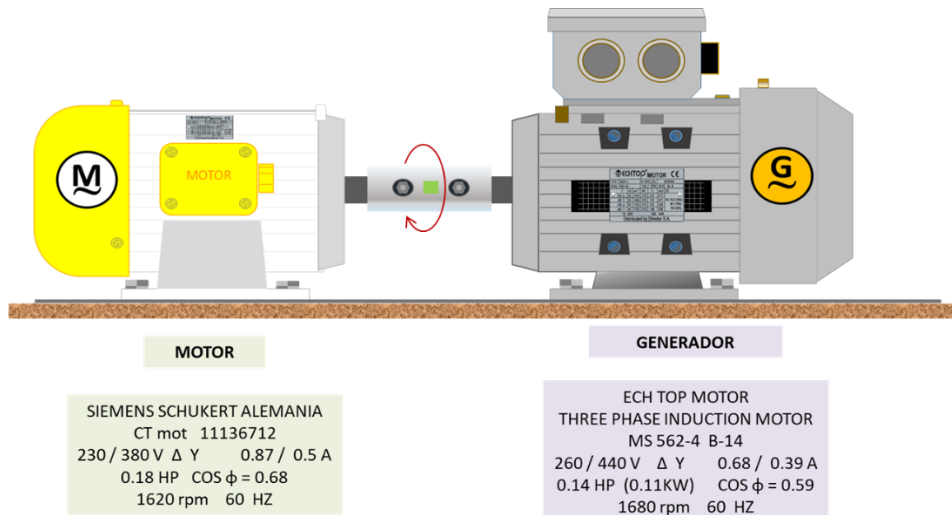


Figura 4.5. Esquema del prototipo M - G del trabajo. El grupo estaba montado en una base de madera. Los motores no son iguales (el Motor posee un potencia ligeramente superior al Generador) .

El motor de color blanco amarillo es una maquina de 0,18 HP y es de ya hace varios años ya que fue utilizado en algunas practicas de laboratorio cuando estaba realizando el pregrado de Ingeniería Eléctrica. El otro motor es de construcción nueva y tiene una potencia de 0,14 HP. Ver figura 4.6.

El motor blanco amarillo se utilizó en este prototipo como MOTOR y se identifica con la letra M y el motor gris trabajará como Generador y se identifica con la letra G .

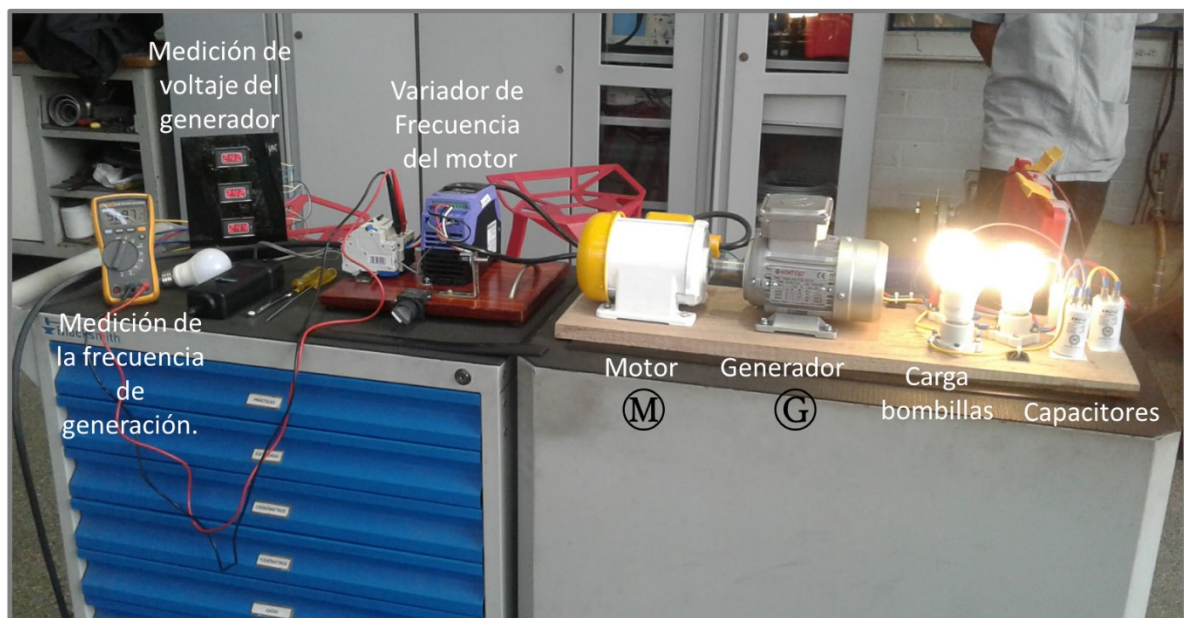
Se observan en el prototipo:

- Las bombillas en disposición en λ
- El banco de condensadores para excitación del generador con conexión en λ .
- El Motor M
- El Generador G .

Ver figura 4.7.



Figura 4.6. Fotografía del prototipo M - G del trabajo. Se aprecia el VDF del Motor al fondo y la carga resistiva trifásica del Generador, en conjunto con los capacitores de excitación en paralelo, a la derecha.



Prototipo inicial del Grupo Motor – Generador de Inducción.

Figura 4.7. Fotografía del prototipo M - G del trabajo en funcionamiento. Se aprecia el sistema trabajando; las bombillas trabajan con voltaje entregado por el generador G . La autoexcitación de G es dada por los capacitores en λ los cuales se observan a la derecha.

Para este prototipo se trabajó con el siguiente diagrama eléctrico (ver figura 4.8), el cual sirvió para exponer el trabajo del mismo y para ser una base del trabajo posterior. El esquema muestra dos motores de inducción conectados uno al otro mecánicamente por sus ejes de salida de movimiento. Un motor va a mover al otro. Las velocidades reflejan que se trata de maquinas de cuatro polos con velocidades de sus campos rotatorios en 1800rpm.

Esto indica que el variador de velocidad del motor \textcircled{M} deberá llevar al generador a una velocidad por encima de las 1800rpm y para esto deberá colocar al motor en una frecuencia por encima del 60HZ. Hemos comprobado que una frecuencia de 64 HZ se puede lograr la generación siempre y cuando se cumpla con la condición de la excitación reactiva de los devanados del generador.

Para la excitación reactiva de los devanados del generador, en la condición de maquina aislada de la red, se hace necesario asistir al sistema trifásico con un banco de condensadores, previamente calculado y también previamente cargado para que se cuente con la energía reactiva necesaria para excitar las bobinas y poder generar así los campos magnéticos causantes de la generación de energía del equipo.

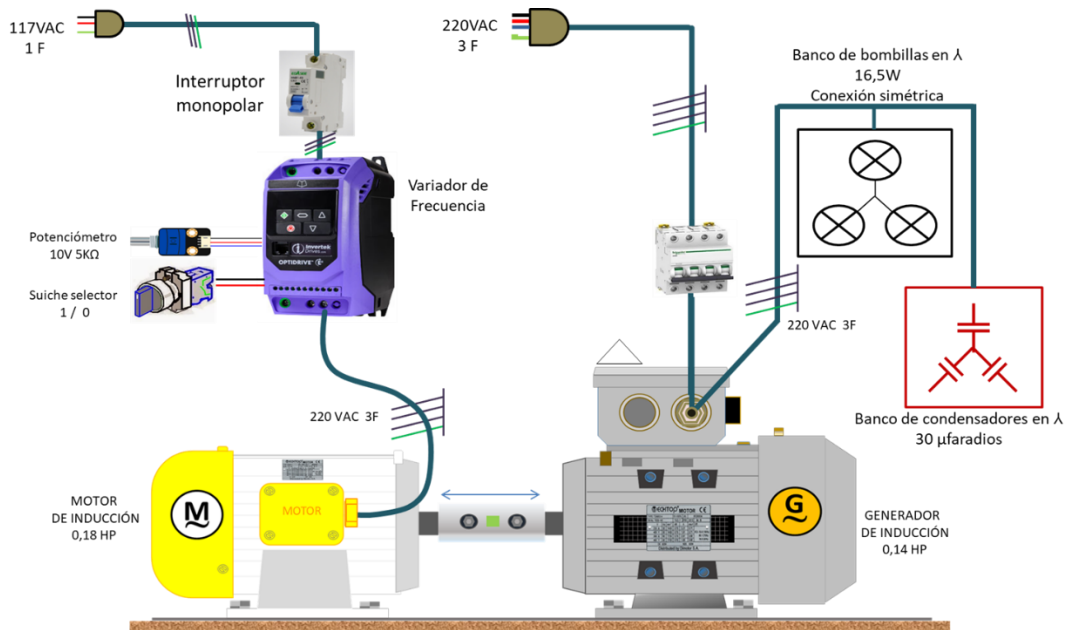


Figura 4.8. Esquema del prototipo \textcircled{M} - \textcircled{G} del trabajo con sus elementos de conexión básicos. Se destacan el VDF del Motor con su potenciómetro para la consigna de velocidad, la carga de bombillas en configuración 3ϕ en Δ y el banco de capacitores trifásico en Δ en paralelo con los bornes de salida de voltaje del Generador \textcircled{G}

En esta etapa del proyecto:

Observamos que el equipo requiere una medición muy constante de la velocidad mecánica la cual se realiza con un tacómetro del laboratorio.

Y además, a la par se requieren mediciones de voltaje en las líneas de salida del generador. Y también se requiere la medición de la corriente eléctrica en cada una de las fases. Ver figuras 4.9 y 4.10.

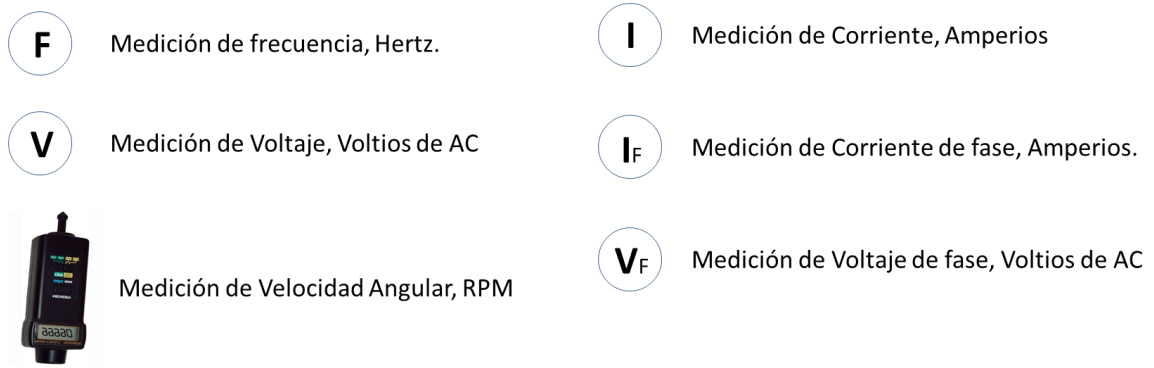


Figura 4.9. Marcas de visualización de variables que se miden en el prototipo \mathcal{M} - \mathcal{G} .

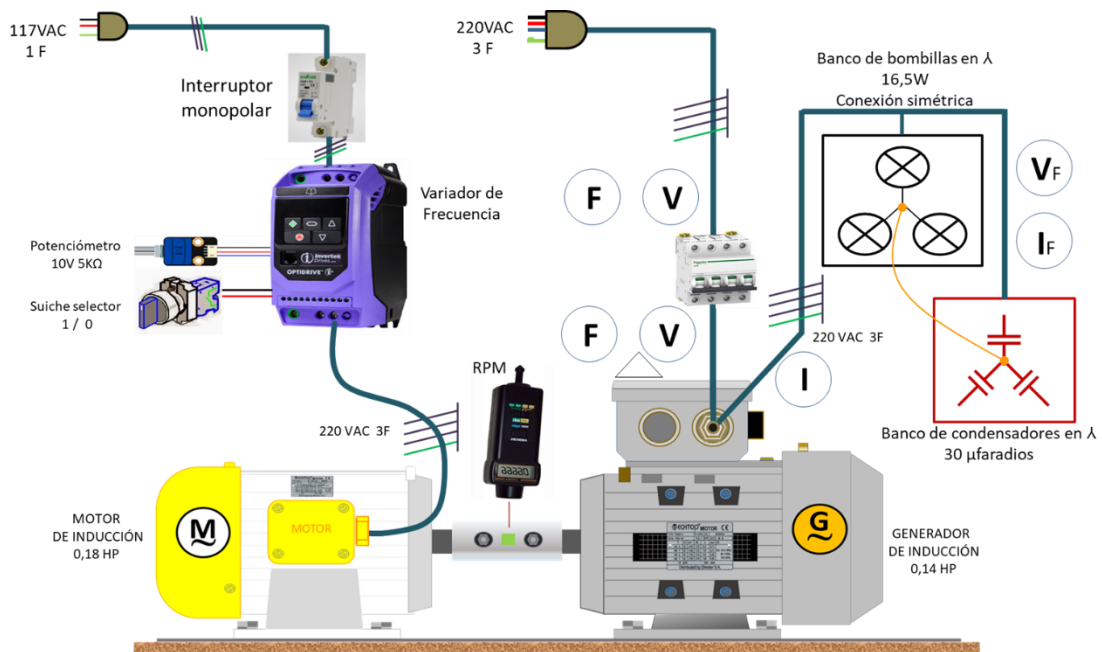


Figura 4.10. Esquema del prototipo \mathcal{M} - \mathcal{G} del trabajo con sus elementos de conexión básicos. Se observan las marcas en donde tomaron lecturas de Voltaje, Corriente, Frecuencia y Velocidad Angular según lo identifique la marca.

El modelo piloto se construyó para examinarlo con instrumentos de medición portátiles, tales como voltímetros, amperímetros, tacómetros, etc. Ver figura 4.11. Esto sirvió para el modelamiento de la maquina definitiva en su componente de mediciones fijas y constantes que se le deben practicar al sistema en todo momento.

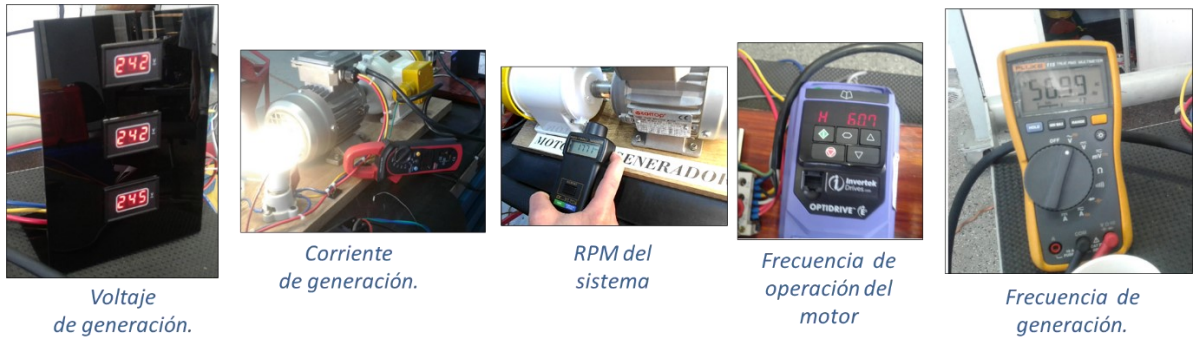


Figura 4.11. Equipos portátiles para la medición de variables eléctricas en el banco de trabajo. Se destacan: Voltímetros , amperímetro, tacómetro óptico, display del VDF en online, Multímetro dedicado a la medición de frecuencia en Hz.

YouTube ^{CO}

Otra página de referencia: Video de la prueba de un grupo motor generador. **Vista en Internet 3**

https://www.youtube.com/watch?v=OurM73MMXT0&ab_channel=Stjepan

Testing induction generator

Figura 4.12. Vista de otra referencia de video de grupo $\text{M} - \text{G}$ usando maquinas asíncronas trifásicas y un VDF asistiendo al motor M . El grupo de cargas de cargas y capacitores se encuentra por debajo del ensamble mostrado.

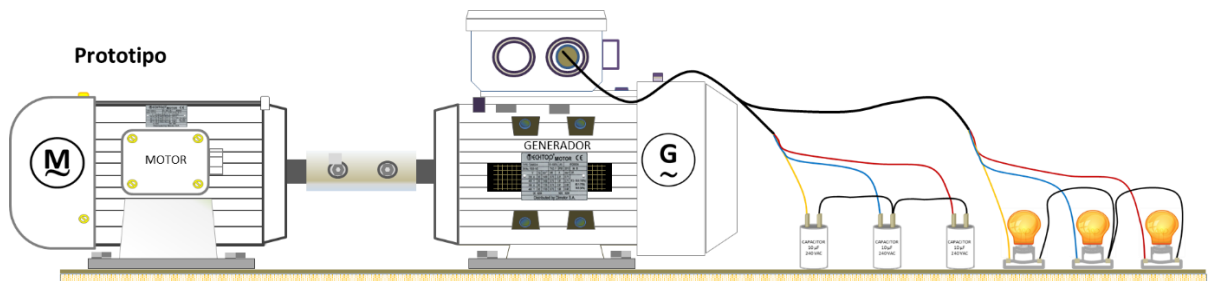


Figura 4.13. Vista del esquema del prototipo del banco $\text{M} - \text{G}$. Se observan las cargas del generador. Bombillas y capacitores.

El prototipo se operó de la siguiente forma:
Se procedió a la carga de los capacitores operando al generador como motor durante un corto tiempo. Ver figura 4.14.

En el dibujo se observa que al operar \textcircled{G} como \textcircled{M} también le llega alimentación 3ϕ a los condensadores y a las bombillas donde tanto condensadores como bombillas están conectados en configuración λ .

Con esta operación garantizamos la carga de los capacitores.

Nota:

Los capacitores se calcularon de acuerdo a los cálculos que se muestran en el capítulo 8 para el grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} de 1/7 de HP. Ver figura 4.15

Para el caso específico del prototipo, en la siguiente hoja se muestran los cálculos de la capacitancia requerida por fase para excitar el generador y llevarlo a operación. Nota: estos cálculos se extrajeron del capítulo 8 para el Grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} de 0,14 de HP en configuración en λ .

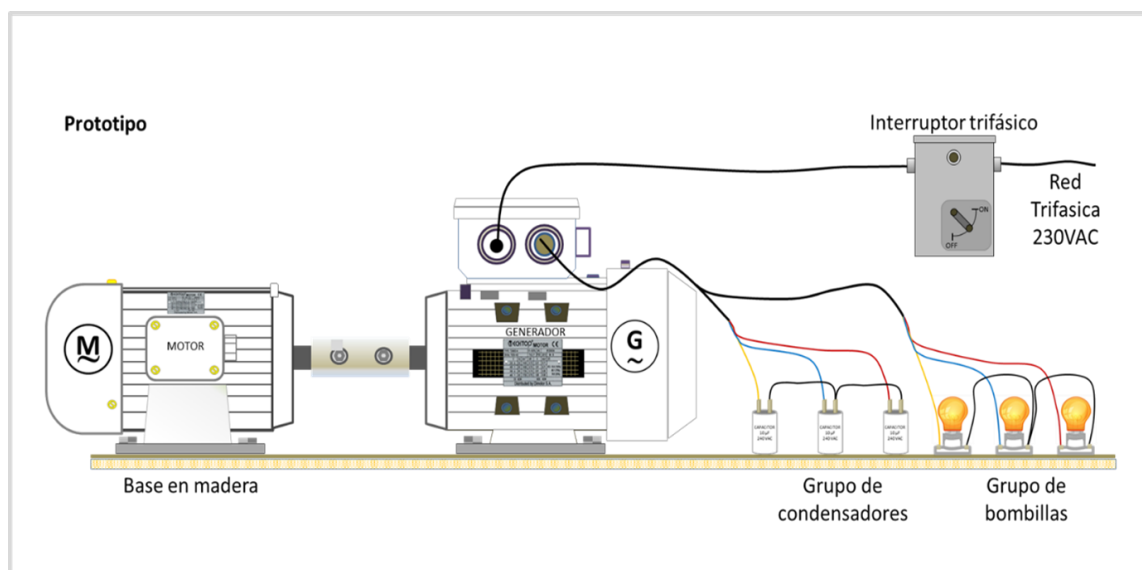


Figura 4.14. Vista del esquema del prototipo del banco \textcircled{M} - \textcircled{G} . Se observan las cargas del generador. Bombillas y capacitores y además la conexión de potencia para el momento en que se necesita operar \textcircled{G} como \textcircled{M} para excitar las bobinas del generador.

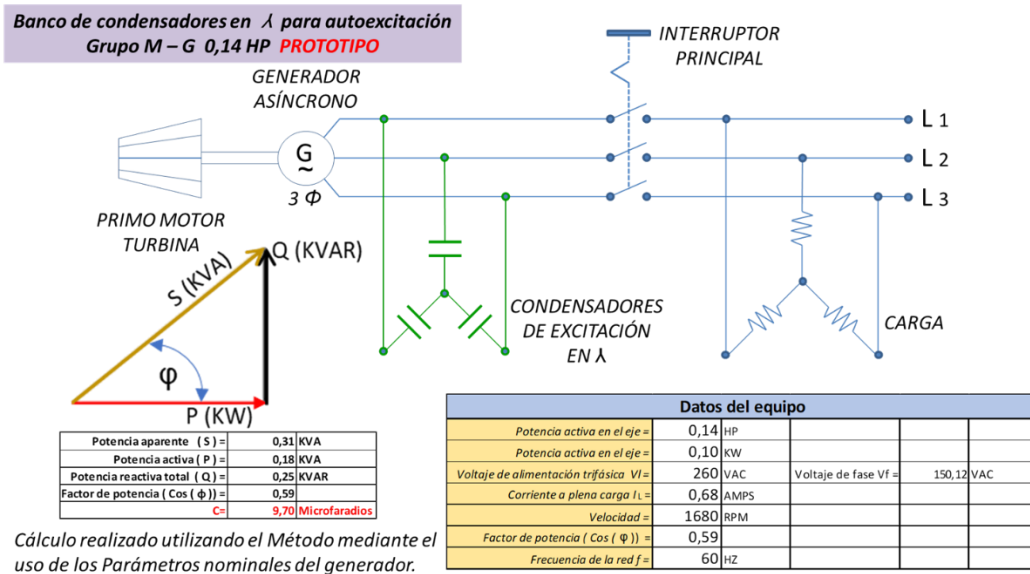


Figura 4.15. Vista del cálculo de los condensadores en paralelo en configuración λ para el prototipo del proyecto. Estos cálculos se muestran en el capítulo 8 con más detalle.

Luego de operar el generador como motor un corto tiempo, y con los condensadores cargados, procedemos a apagarlo y a disponerlo para su trabajo como generador. La siguiente figura 4.16 nos muestra como asistimos al motor del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} con un variador de frecuencia el cual nos permite variar la velocidad de todo el sistema con valores cercanos a la velocidad nominal por encima y por debajo de esta. Lo que buscamos es operar el sistema alrededor de 60 HZ dentro de un rango de que oscila entre los 50 y 70 HZ.

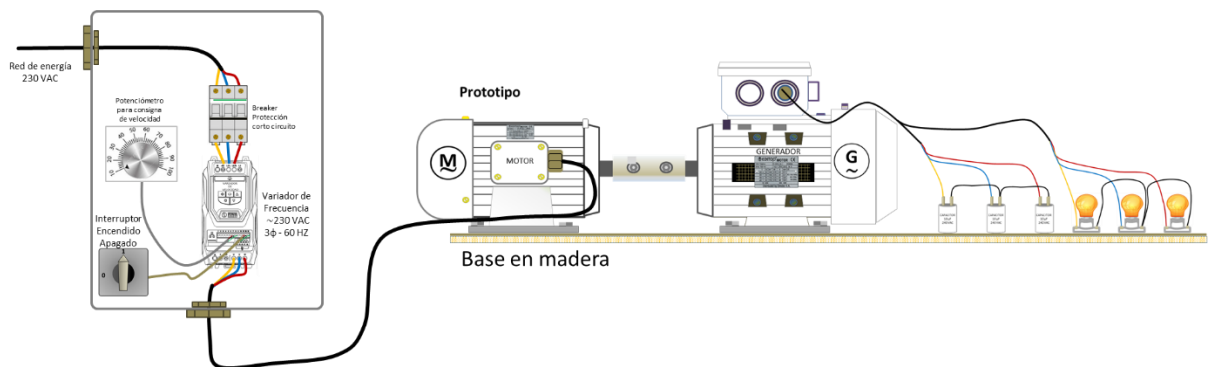


Figura 4.16. Vista del esquema de banco prototipo \textcircled{M} - \textcircled{G} . Se muestran las cargas del generador \textcircled{G} y el VDF que asiste al motor \textcircled{M} .

La experiencia con el grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} prototipo nos mostró que al llegar a 64 HZ el generador pasó a su estado de generación encendiendo las bombillas. Allí observamos lo siguiente en lo relacionado al estado de las variables eléctricas en el momento de la generación. Ver figura 4.17.

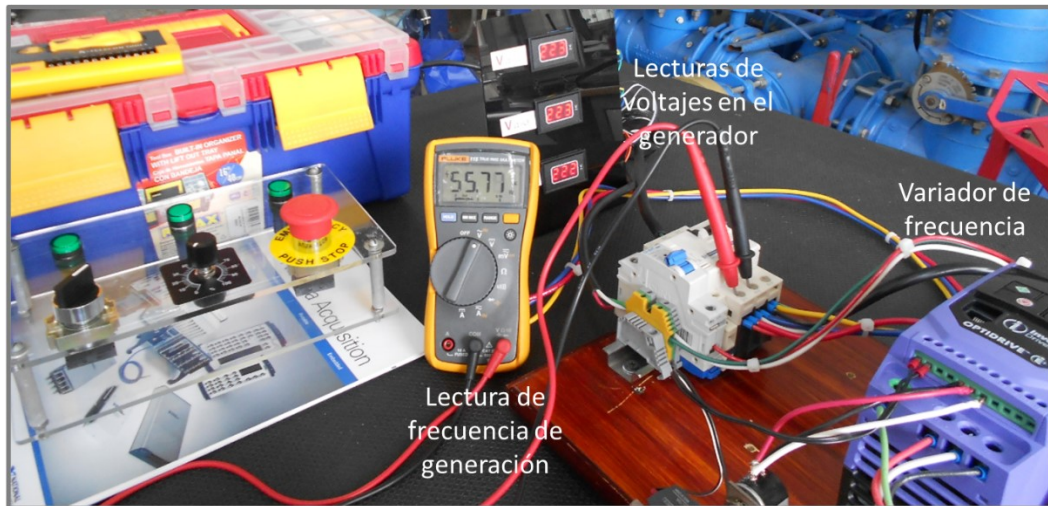


Figura 4.17. Vista de la lectura de frecuencia al generador \textcircled{G} del banco prototipo, realizada con un multímetro portátil Fluke 87. SE observan además lecturas de voltajes al generador entre sus fases y el VDF que asiste al motor \textcircled{M} .

Lectura de variables eléctricas en el generador en el momento en que este entra en su fase de generación y sin ninguna regulación.

Motor en operación.			Generador en operación.		
V $L_1 - L_2 =$	224,00	VCA	V $L_1 - L_2 =$	231,00	VCA
V $L_1 - L_3 =$	224,00	VCA	V $L_1 - L_3 =$	231,00	VCA
V $L_2 - L_3 =$	223,00	VCA	V $L_2 - L_3 =$	230,00	VCA
velocidad angular =	1771,00	RPM	Frecuencia =	56,23	HZ
Frecuencia =	64,00	HZ			
Capacitores configuración trifásica en λ			Carga del generador		
$L_1 - L_2 =$	10,00	μF	$L_1 - L_2 =$	7,00	W
$L_1 - L_3 =$	10,00	μF	$L_1 - L_3 =$	7,00	W
$L_2 - L_3 =$	10,00	μF	$L_2 - L_3 =$	7,00	W

Luego de haber realizado los ensayos con el prototipo y de lograr la generación, vimos pertinente mejorar las condiciones de instalación del grupo motor generador de tal manera que su acople mecánico funcionara mucho mejor.

Se diseñó una plataforma metálica para asegurar el grupo motor generador de tal manera que su acople mecánico funcionara mucho mejor.

Entonces también se cambió el tipo de acople entre los dos motores ya que el primer acople presentaba desalineamientos constantes y entorpecía el poder observar el proceso de generación en la máquina asíncrona así como también el poder realizar mediciones confiables. Ver figura 4.18.



Acople rígido de manguito



Acople de mordazas, de cruceta o de araña.

Figura 4.18. Vista del primer cambio realizado al sistema de acople mecánico entre las máquinas del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} . Se pasó de un manguito rígido a un acople tipo mordaza.

Y además se vio la importancia de medir en línea la velocidad del sistema completo, la cual mecánicamente es un a sola.

Para lo anterior se optó por colocar un encoder tipo incremental en el eje del rotor del motor por el lado de la tapa del ventilador para luego llevar esta señal hasta un dispositivo que decodifica la señal de pulsos del encoder y la convierte en indicación de RPM. Ver figura 4.19.

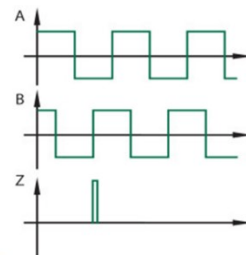
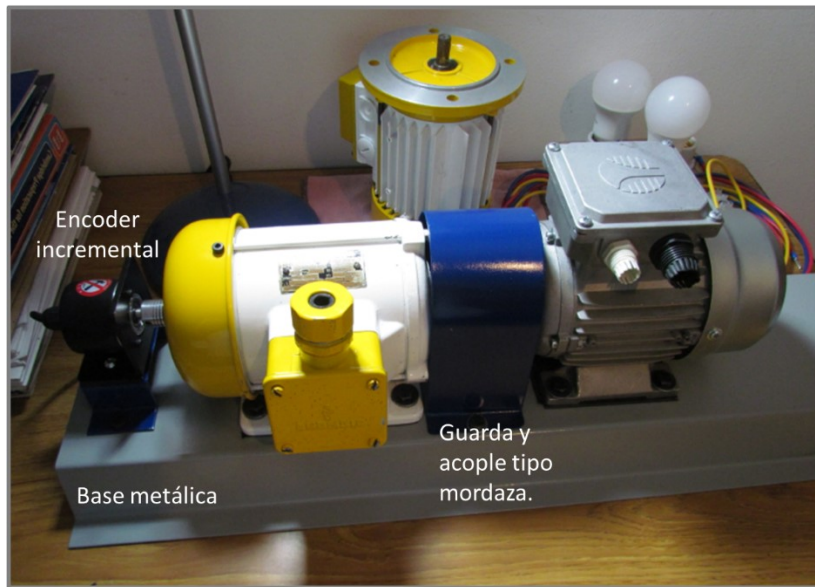


Grafico tomado de internet:
https://www.logicbus.com.mx/info_encoders.php

Figura 4.19. Encoder tipo incremental ubicado inicialmente en el lado del del Motor \textcircled{M} y luego se trasladó al lado del generador \textcircled{G} por ser mas representativo el estar ubicado en este lugar.

Vista del prototipo en sus primeras fases de estudio



Se cambió:

- La base de madera por una base metálica.
- Se cambió el acople mecánico por un tipo mordaza.
- Se colocó una guarda de protección en el punto del acople entre los motores.
- Se colocó un encoder tipo incremental en el lado motor para medir las RPM del grupo M – G.

Figura 4.20. Vista del primer cambio representativo realizado al prototipo inicial

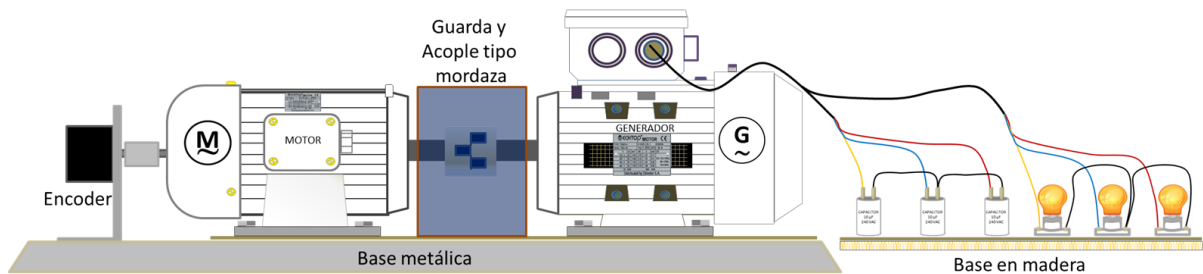


Figura 4.21. Vista del esquema del prototipo luego de su primera reforma. El encoder inicialmente se consideró del lado del Motor (M). La base metálica solo abarcó esta vez al grupo (M) - (G). Las cargas y condensadores conservaron su ubicación en la base de madera. El nuevo acople tipo mordaza se cubrió además con una guarda protectora de elementos móviles.

Con el grupo Motor – Generador (M) – (G) prototipo, ya con una nueva base metálica, la generación fue más estable y mucho más continua. Ver figura 4.20

Se observó que la velocidad mecánica era imprescindible medirla continuamente y por esto la decisión de colocar un encoder fijo en el eje mecánico por el lado motor. Esto porque la relación de la velocidad angular es directamente proporcional a la frecuencia eléctrica y esta variable es muy importante en el proceso eléctrico de la generación.

La carga y los condensadores se mantuvieron en la base en madera procurando tenerlos aparte del grupo motor. Ver figura 4.21.

En la fotografía (figura 4.22) se observa la forma de onda de salida del voltaje de línea del generador aunque se nota una muy baja frecuencia en la forma de onda de salida: 55,9 HZ.

Esto puede corregirse incrementando las RPM de entrada del grupo (M) – (G) o variando la capacitancia de excitación.

El prototipo ha servido entonces para darnos cuenta un poco más profundo del fenómeno con el que estamos trabajando. Debemos **ponerle más atención** al voltaje y a la frecuencia de salida y también a la carga que vaya a hacer uso del generador. Un cambio adicional ha tenido el prototipo en lo referente a la posición del enconder en el grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} , y es el siguiente:



Figura 4.22. Medición de Frecuencia eléctrica del Generador realizada con un medidor de la calidad de la potencia FLUKE 43B. Se observa un valor de 55,9 Hz

El enconder se trasladó al lado de la salida del eje del Generador por el lado del ventilador. Ver figura 4.23
Esto porque es más representativo medir la velocidad en el eje del generador que en el eje del motor primo.
Por razones didácticas y de comprensión del proceso de la generación quedará entonces el Enconder situado en el lado del generador (la velocidad del generador es la que prevalece en el proceso de generación no la del impulsor).

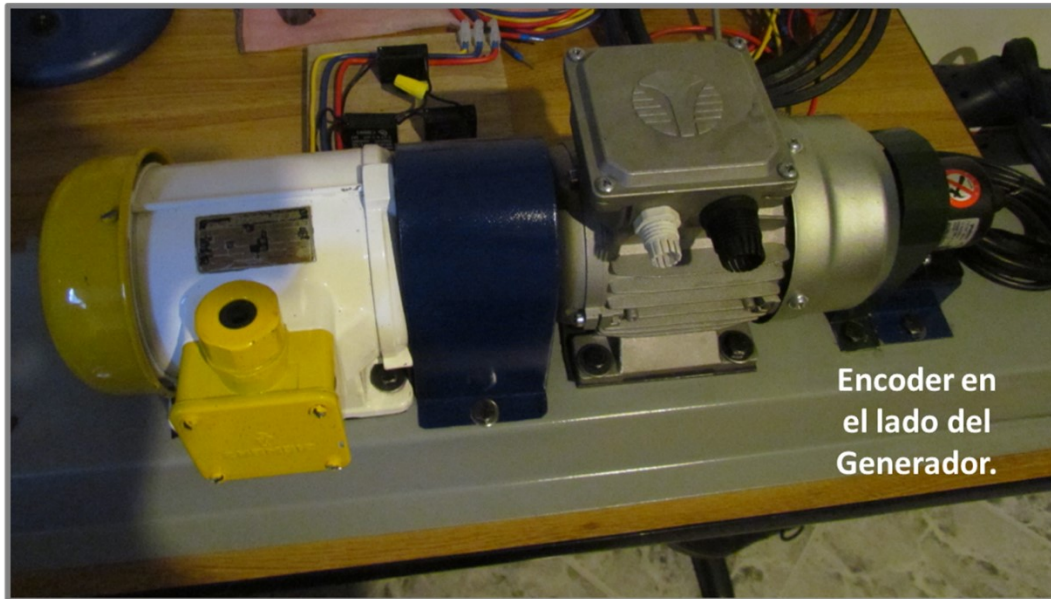


Figura 4.23. *Traslado del Encoder desde el lado Motor (M) al lado Generador (G). Se trasladó el encoder por ser mas representativo el estar ubicado en el lado Generador (G).*

En lo referente a las pruebas realizadas cabe anotar que se observó al equipo en su comportamiento ante el aumento de carga. Colocamos un grupo adicional de bombillas, también en configuración λ y observamos un incremento de la corriente, tal como lo esperábamos pero sin perturbaciones considerables en el voltaje y la frecuencia. Cabe anotar que este aumento de carga se encuentra dentro del rango de carga soportable por el generador. Ver figura 4.24.

El generador en datos de placa muestra una potencia a entregar de 105 Vatios .

La carga base del grupo de bombillas en configuración λ demanda una potencia de 21 Vatios para su optimo funcionamiento.

Y el grupo adicional del bombillas es idéntico al grupo de bombillas fijo : Demanda 21 Vatios de potencia activa.

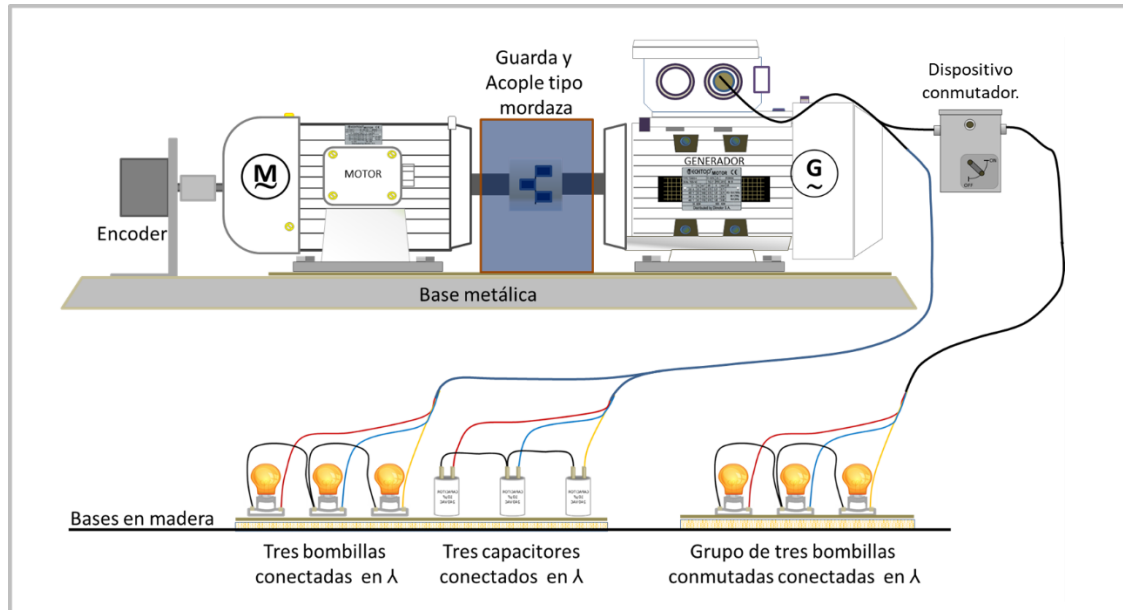


Figura 4.24. Detalle de las cargas de @ en el prototipo. Se muestra una carga trifásica de bombillas en λ adicional la cual posee un dispositivo de conmutación para encendido y apagado.

Se midieron las siguientes corrientes en el grupo de bombillas:

Medición de corriente en la carga en la carga fija y en la carga adicional.				
	Grupo de bombillas fijo 21W		Grupo de bombillas adicional 21W	
Línea	Corriente nominal (mA)	Corriente medida (mA)	Corriente nominal (mA)	Corriente medida (mA)
L ₁	60,25	60,10	60,25	58,00
L ₂	60,25	60,00	60,25	59,00
L ₃	60,25	59,60	60,25	58,00

Esquema del prototipo con una carga adicional de 21W. Ver figura 4.25

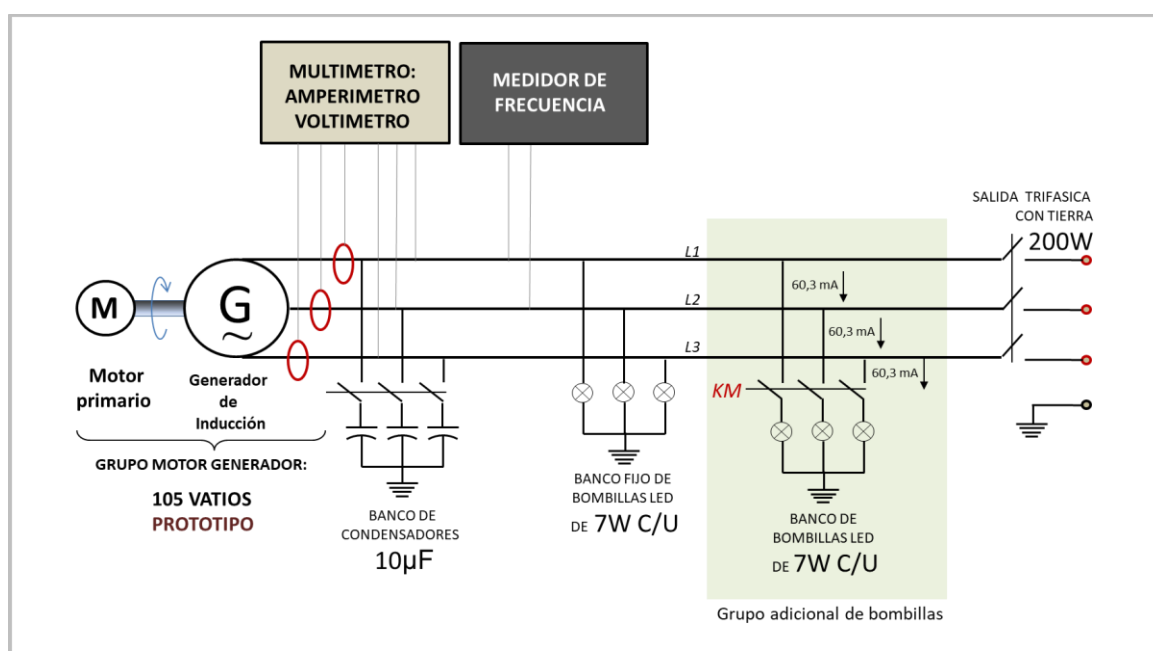


Figura 4.25. Esquema del prototipo con una carga adicional de 21W. Tres bombillas de 7 W c/u en configuración trifásica en λ . Posee un elemento de conmutación KM.

También se realizaron pruebas con un banco de condensadores en configuración Δ .

Para esto se utilizaron los calculos de las capacitancias en Δ para el grupo $\textcircled{M} - \textcircled{G}$ prototipo el cual se muestra en la siguiente hoja y que también se transcribe en el capítulo 8. Ver figura 4.28.

El banco de capacitancias en Δ (delta) es de menor valor (3.23 μf nominales) que el de la configuración en λ (9.70 μf nominales). Lo que observamos es que aún con este valor más bajo de capacitancia la salida de voltaje del generador era mayor (242 VAC) cuando para la λ el voltaje de salida era menor (231 VAC). Esto facilita que la sobre velocidad que se le esta entregando al motor primo pueda ser un poco menor, siempre cuidando tener a la frecuencia de salida dentro de valores cercanos a los 60HZ. En la practica colocamos un banco portátil de 3 μf como el que se muestra en la fotografía (ver figura 4.26) y en el esquema de la figura 4.27.

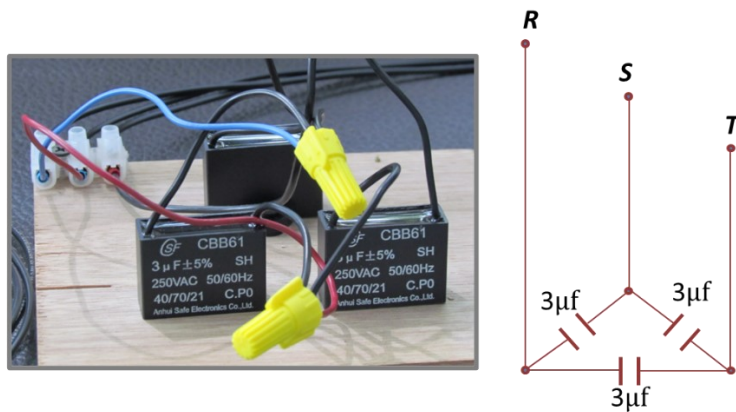


Figura 4.26. Fotografía de grupo trifásico de condensadores en delta Δ de $3\mu\text{f}$. Este grupo está aparte del grupo inicial de $10\mu\text{f}$ en configuración Δ . Se encuentra en una base de madera aparte.

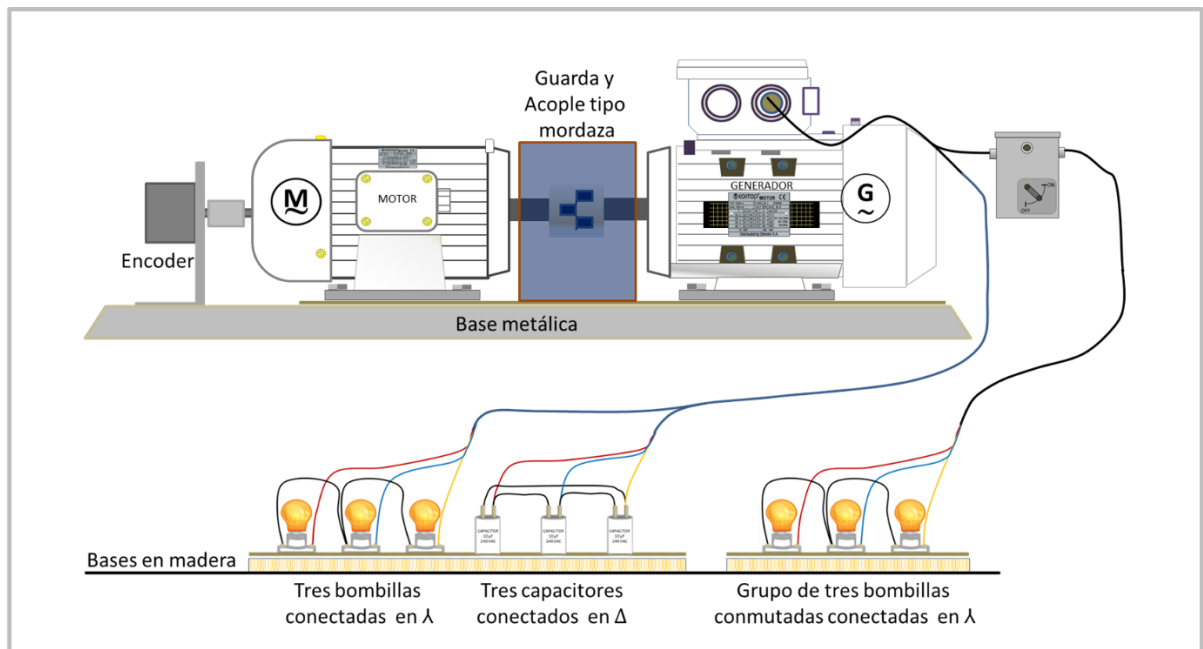


Figura 4.27. Esquema del grupo trifásico de condensadores en delta Δ de $3\mu\text{f}$. Este grupo se intercambió por el de la configuración en λ de $10\mu\text{f}$. El objetivo consistía en observar el comportamiento del voltaje de salida del generador con estas diferentes configuraciones.

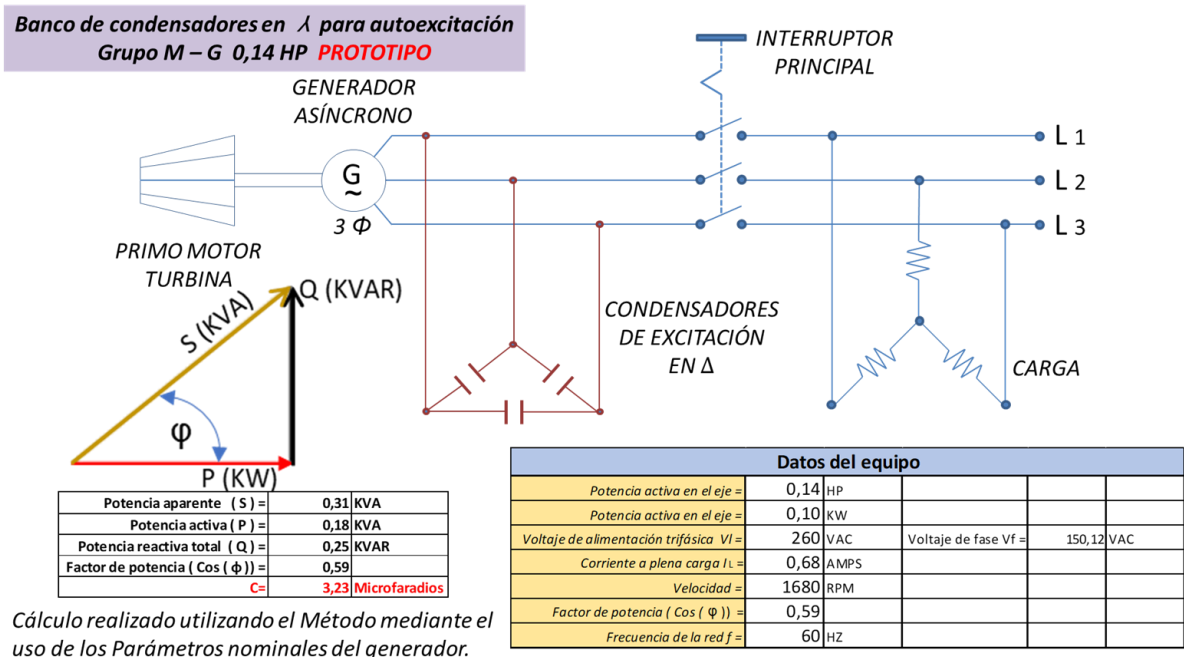


Figura 4.28. Vista del cálculo de los condensadores en paralelo en configuración Δ para el prototipo del proyecto. Estos cálculos se muestran en el capítulo 8 con más detalle. Claramente se observan condensadores de más bajo valor que en la configuración en λ .

El prototipo se ha llevado hasta este punto, pero desde acá se hace necesario implementar un sistema en donde sea posible visualizar y estudiar el fenómeno de la generación asincrónica en forma más detallada, más segura, más permanente y con posibilidad de más funciones y mayor entrega de información.

Se elaboró entonces un diseño en donde se buscaba tener un banco de pruebas para dos grupos motor generador (M) – (G) de dos diferentes potencias.

El banco puede trabajar con un grupo (M) – (G) de 1,2 HP o con un grupo (M) – (G) de 0,14 HP. Ver figura 4.29.



Figura 4.29. Vista de las placas de las potencias de los dos grupos (M) – (G) que posee el banco de trabajo construido.

Por el lado del motor (M), el tablero diseñado tiene los siguientes elementos más representativos : Ver figuras 4.30 y 4.31.

- Variador de frecuencia para asistir al motor (M) y poder variarle la velocidad para servir como motor primo. Este variador posee comunicación MODBUS para intercambio de datos con el PLC.

- Protección de corto circuito.
- Medición de parámetros eléctricos mediante un equipo de medida dedicado para el motor (M).
- Medidor de frecuencia continua para el motor (M).
- Transformadores de corriente motor (M).



Figura 4.30 Vista de los elementos eléctricos más representativos que utiliza el proyecto en su lado Motor (M).



Figura 4.31. Vista de la descripción lado Motor (M) en la puerta del tablero de control. En la vista externa del equipo.

Por el lado del generador (G), el tablero diseñado tiene los siguientes elementos más representativos : Ver figuras 4.32 y 4.33.

- Barras para el circuito de generación. (G)
- Accionamientos de potencia para el arranque como motor del generador. (G)
- Bancos de condensadores de excitación. (G)

- Medidor de parámetros eléctricos dedicado al generador. ©
- Frecuencímetro dedicado al generador. ©
- Cargas varias:
 - Grupo de bombillas fijas
 - Salida por borneras en la tapa frontal del tablero para cargas varias:
 - Grupo de bombillas LED.
 - Grupo de bombillas incandescentes.
 - Grupo de condensadores en Δ
 - Grupo de condensadores en λ
 - Motor monofásico pequeño. Ventilador de PC.
 - Motor universal pequeño para maquina de coser con pedal.
 - Transformadores de corriente para el generador ©.



Figura 4.32. Vista de los elementos eléctricos mas representativos que utiliza el proyecto en su lado Generador ©.

DESCRIPCIÓN LADO GENERADOR EN PUERTA TABLERO DE CONTROL VISTA EXTERNA DEL EQUIPO

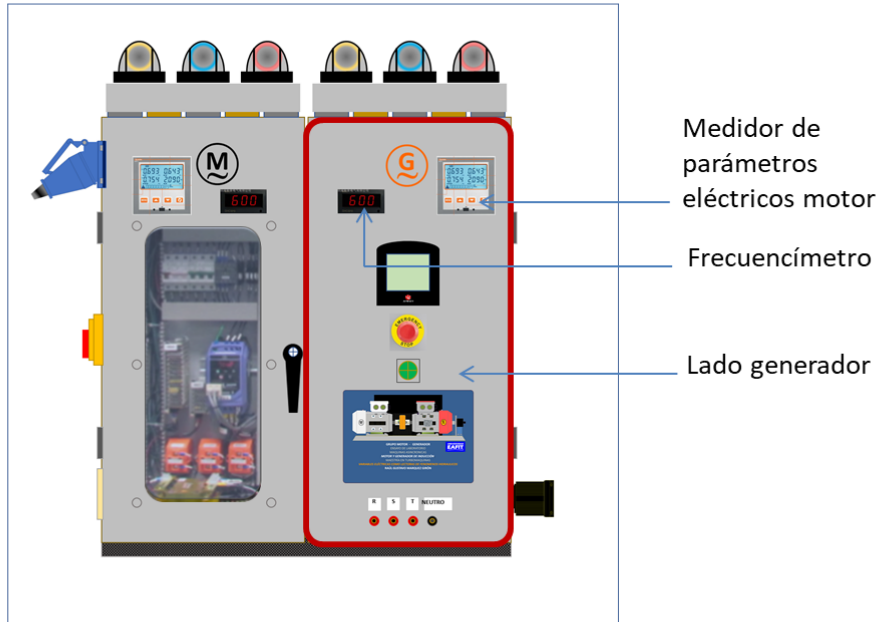


Figura 4.33. Vista de la descripción lado Generador \textcircled{G} en la puerta del tablero de control. En la vista externa del equipo.

Funcionalidades generales tanto para motor \textcircled{M} como para generador \textcircled{G} :

Ver figuras 4.34, 4.35, 4.36 y 4.37.

- Tablero con puertas abatibles y manija con llave.
- Indicador luminoso de equipo energizado.
- Parada de emergencia con llave de seguridad para su reposición.
- Suiche conmutador de encendido apagado general sistema y con candado.
- Barraje general de entrada al tablero.
- Acometida acorde al voltaje trifásico del laboratorio con toma de seguridad para la conexión con la instalación eléctrica de la zona, y en la clavija del tablero.
- Tablero multifuncional con ruedas para el control del proceso.
- Mesa de operación del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G}
- Con visión por los cuatro lados y con paradas de emergencia.
- PLC para monitoreo y control del proceso con HMI.
- Mesa alterna para el grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} no usado y para herramientas.
- Fuentes de corriente continua para monitoreo y control
- Transformador de control.

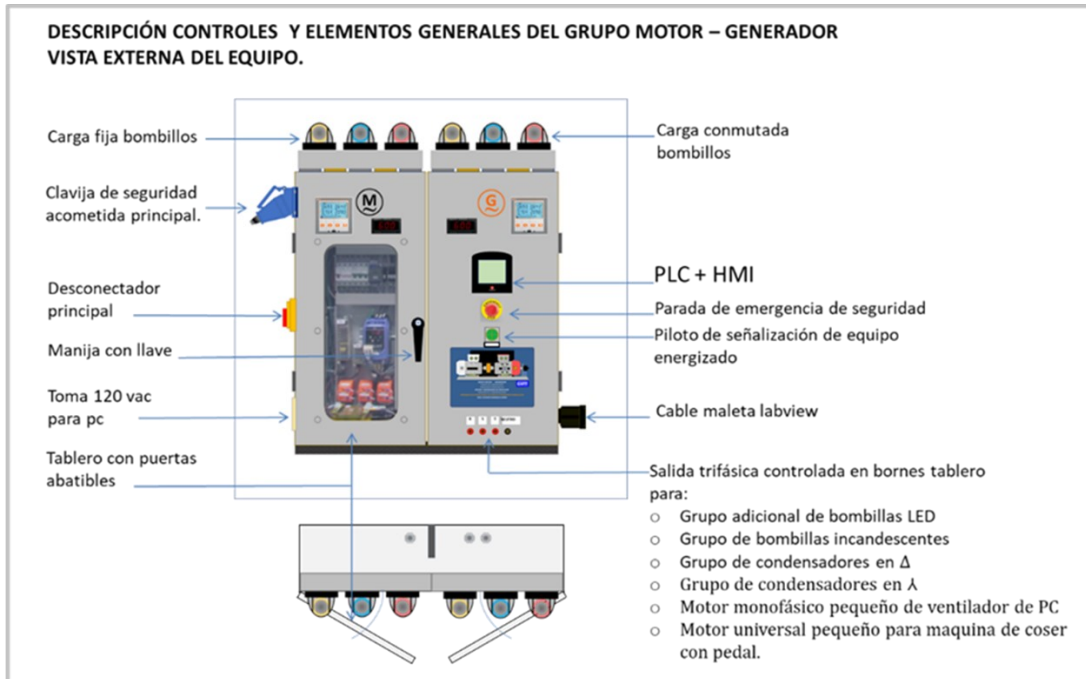


Figura 4.34. Descripción de controles y elementos generales del grupo $\text{M}-\text{G}$ en la parte externa del equipo.



Figura 4.35. Vista de algunos elementos relevantes en las puertas del tablero.

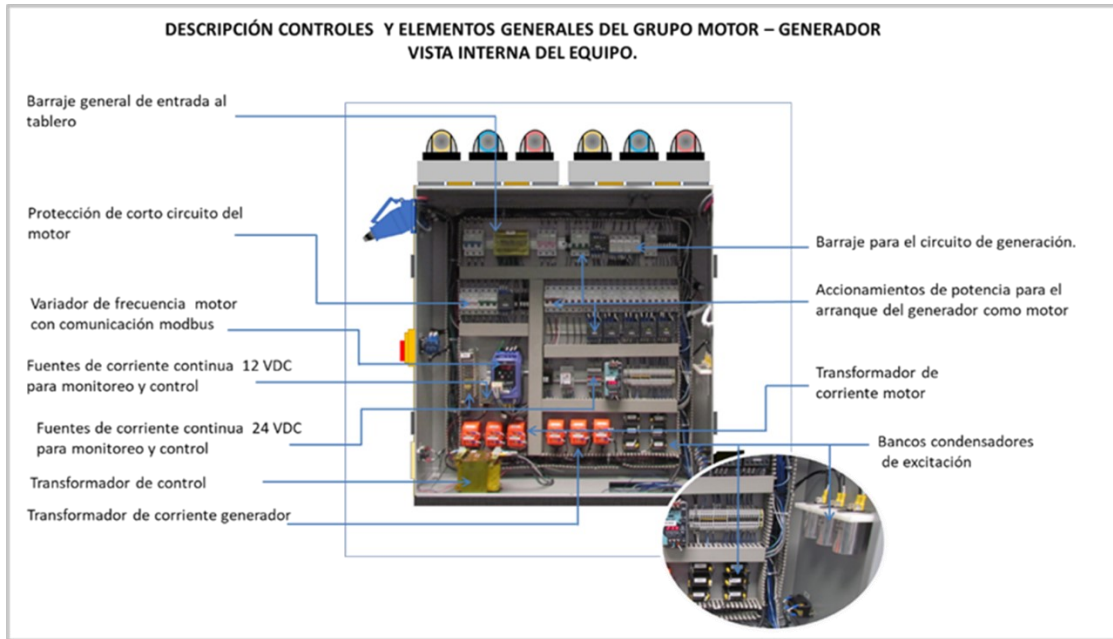


Figura 4.36. Vista de la descripción de los controles y elementos generales del grupo $\text{M} - \text{G}$ en la parte interna del equipo.



Figura 4.37. Vista de algunos elementos relevantes al interior del tablero de control.

Conclusión:

El banco experimental es el resultado de muchas pruebas, observaciones, recomendaciones de personas relacionadas (y algunas no relacionadas), fatigas, cálculos, pequeños éxitos y pequeñas derrotas, estudios variados y muchas actividades que engloban todo este trabajo. Es por esto que a veces es difícil consignar todo este devenir en un manuscrito.

Capítulo 5

Detalle del Primo Motor.

Objetivo específico:

Ahondar un poco en el concepto del Primo Motor para ligar esta idea con la parte de \textcircled{M} del banco de trabajo.

El objetivo es mostrar como \textcircled{M} en conjunto con el variador de frecuencia y el suministro de energía de la red constituyen nuestro Primo Motor.

El Primo Motor es el que moverá al Generador, ya sea un chorro de agua, un flujo de viento, la explosión controlada de un hidrocarburo y otras formas más.

Definición:

En ingeniería, el motor principal o motor primario es el motor que convierte el combustible en trabajo aprovechable.

En las locomotoras, el motor principal es en consecuencia la fuente de energía para su propulsión.

El término se usa generalmente cuando se describe cualquier locomotora equipada con un motor de combustión interna.

En una locomotora diésel-mecánica, el motor principal es un motor diésel que está unido mecánicamente a las ruedas motrices.

En una locomotora diésel-eléctrica, el motor principal es el motor diésel que acciona el generador principal responsable de producir electricidad para los motores de tracción acoplados o engranados a los ejes motores.

El motor principal puede también ser una turbina de gas o una turbina hidráulica en lugar de un motor diésel.

En estos casos, el generador, los motores de tracción y los aparatos de interconexión son considerados como parte del sistema de transmisión y no como parte del motor principal.

En una locomotora eléctrica o a baterías no hay un motor principal, ya que toman la energía de una fuente de poder externa. Tal es caso de una catenaria en corriente directa o bancos de baterías estacionarios.

Otra definición:

El elemento primo-motor (Turbinas hidráulicas, Turbinas de vapor, Turbinas de gas y Motores de combustión interna):

Este elemento se encarga de convertir *la energía de la altura o del combustible* en energía mecánica, la cual es aprovechada para generar energía eléctrica.

El elemento Primo-motor pueden ser una turbina de vapor, una turbina a gas, una turbina hidráulica, un motor diésel, un motor a gasolina, etc. El elemento primo es lo que llamamos una máquina que usa fuentes de energía no eléctricas, cuando se comporta en el modo de generador eléctrico.

Mediante el elemento servo control del gobernador se regula la admisión de más vapor, gas, caudal, combustible, etc., del elemento primo-motor para **brindar más o menos potencia activa** según se requiera.

A mayor demanda de potencia, mayor consumo del vapor, gas o combustible del primo-motor, mayor apertura de válvulas en una caída de agua, etc.

Nuestro caso:

Para nuestro caso el estudio del Primo Motor, se puede centralizar en tres aplicaciones:

- Un bomba hidráulica trabajando en el modo PAT (Pump as Turbine : Bomba como turbina).
- Un aerogenerador.
- Un motor de Inducción haciendo las veces del elemento impulsor tal como un impeler en la PAT o las hélices en el aerogenerador. Esto con miras a estudiar el comportamiento de un sistema de generación de energía eléctrica mediante la utilización de una maquina asíncrona trifásica en su modo *Generador*.

La bomba hidráulica usada como turbina. Comúnmente conocida como PAT. Del inglés Pump as turbine.

El uso de bombas como turbinas en lugar de turbinas convencionales tiene muchas ventajas.

Todo el montaje Motor - Bomba M-B se puede comprar y utilizar fácilmente como unidad generadora de electricidad, y además de lo anterior es importante anotar que las bombas hidráulicas se producen para una gran variedad de cabezales y descargas, con varias dimensiones.

Debido a que las bombas se producen en grandes series, su costo es bajo, y el tiempo de entrega es corto, la instalación y el servicio de estas pueden realizarse también en corto tiempo y están fácilmente disponibles.

El diseño simple de una bomba limita el dominio operativo de descarga en comparación con el de una turbina. Por esta razón, las bombas tienen un buen funcionamiento en los sitios donde se utilizan turbinas Pelton y las pequeñas turbinas Francis.

El uso de bombas como turbinas depende de un cierto valor de la descarga. *Por lo tanto, es importante elegir un sitio donde el agua disponible sea suficiente todo el año.* Pero, es importante anotar que la creación de embalses para el almacenamiento de agua en pequeñas centrales hidroeléctricas no es una opción viable desde el punto de vista económico y **más en nuestros** tiempos y en nuestro país.

La cabeza disponible (altura) en un sitio específico también es importante. La bomba elegida debe tener la cabeza y la descarga en el mejor punto de eficiencia tan similar como sea posible con los parámetros del sitio.

Las condiciones de funcionamiento de una bomba como turbina (descarga y cabezal) son muy diferentes de las que funcionan como una bomba, pero las eficiencias de los dos regímenes operativos son bastante similares.

En el modo turbina, el flujo aumenta con el aumento de la cabeza. En la siguiente figura 5.1 se presentan la curva de turbina y la curva característica del sitio. El cabezal disponible en la turbina es igual a la altura vertical entre la entrada y la salida de la turbina, menos las pérdidas de cabeza. La intersección entre la curva de rendimiento de la turbina y la curva del sitio, da la cabeza y el flujo en el que operará la turbina. Esto se conoce como el punto de operación.

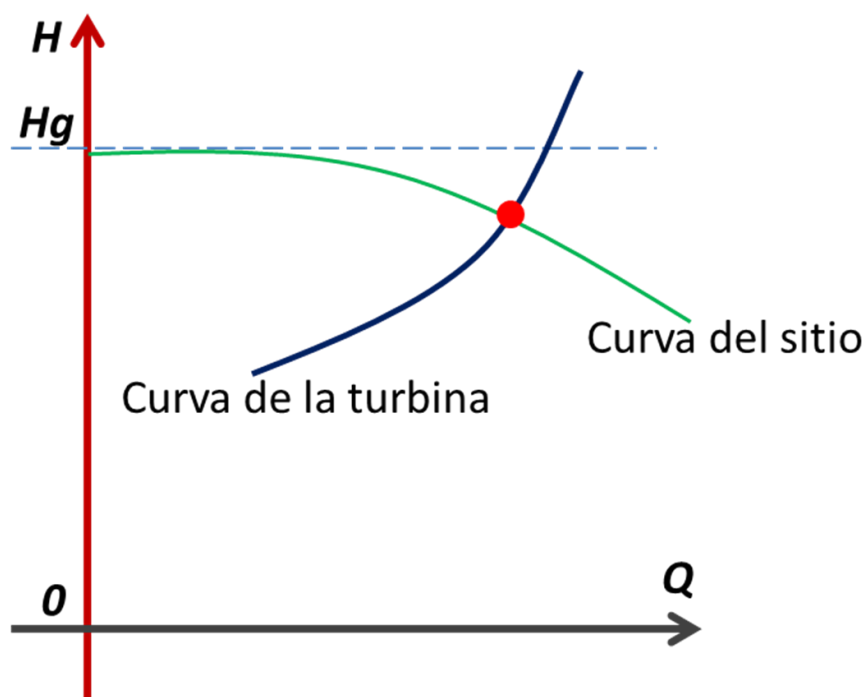


Figura 5.1. Curva de la turbina y la curva característica del sitio en un mismo gráfico.

La velocidad de rotación de la bomba es otro parámetro importante. *Las bombas con mayor velocidad de rotación son más compactas que las bombas equivalentes con una velocidad de rotación más baja, pero tienen una vida útil más corta.*

Cuando se utilizan altas velocidades de rotación, los rodamientos y los sellos necesitan cambiar a menudo. Una bomba de baja velocidad de rotación *es más cara*, pero tiene un período de operación más largo y menos servicio de mantenimiento.

La conexión de la bomba con el generador puede ser directa o por correa. Si la conexión es por correa es posible utilizar una maquina eléctrica de alta velocidad de rotación.

Si la conexión al generador es directa hay más ventajas:

- Bajas perdidas mecánicas
- Fácil configuración,
- Diseño simple :
- Bajo costo,
- Menos rodamientos,
- Mayor vida útil de los rodamientos (no hay esfuerzos axiales),
- Mantenimiento más fácil.

Apunte sobre las bombas centrífugas actuando como PAT.

Como una fuente barata y disponible de energía renovable, las bombas centrífugas regulares pueden funcionar a la inversa para actuar como turbinas en la generación hidroeléctrica.

Las bombas como turbinas (PAT) son especialmente relevantes para las zonas rurales aisladas, en donde la eficiencia no es necesariamente la prioridad más alta.

Muchas bombas centrífugas se entregan con un motor asíncrono acoplado directamente. Ver figura 5.2.



Figura 5.2. Bomba centrífuga de acople directo estimada como PAT.

Este motor de inducción se puede utilizar como generador auto excitado, ya que es una **solución más económica** comparada con una bomba separada que funciona como turbina y acoplada a un generador síncrono o asíncrono.

Los generadores asincrónicos son más fáciles de encontrar, su rotor es más robusto que el de los generadores síncronos. El generador asíncrono no se puede quemar sobrecargándolo, porque en estas condiciones pierde excitación y se detiene.

Importante anotar acá el siguiente aspecto sobre los motores asíncronos de alta velocidad:

Velocidad síncrona nominal (número de polos) de los motores asíncronos para PAT's: Como regla general, el número de pares de polos debe mantenerse tan bajo como sea posible para impactar sobre los costos, el peso y la complejidad de las máquinas. Las eficiencias adicionales y los factores de potencia de las máquinas disminuyen a medida que aumenta el número de polos.

Cuando se utiliza la máquina como generador en el plan de generación hidroeléctrica, hay que tener en cuenta un parámetro adicional: La capacidad de exceso de velocidad de la máquina.

Esto se vuelve importante porque es posible que la turbina pase al estado de embalamiento.

La velocidad de embalamiento de las turbinas puede alcanzar dos o más veces la velocidad nominal, lo que significaría unas 7200 rpm o más en este estado, para una máquina asíncrona de dos polos.

Los motores estándar rara vez soportan estas altas velocidades de rotación. Por lo tanto, **lo más recomendable** es que se seleccionen motores de cuatro o más polos (correspondientes a 1800 rpm o inferiores a una frecuencia de 60HZ).

Estos modelos suelen tener rotores y rodamientos estándar que se utilizan para todos los tipos de motores (incluidas las máquinas moduladas a velocidad con hasta un 200% de velocidad nominal) en todo. Por lo tanto, estas máquinas de inducción asíncronas serán capaces de soportar el embalamiento de la turbina sin modificaciones o daños.

Tabla sobre las principales diferencias de flujo de fluido y energía en bombas y turbinas.

	Turbina	Bomba
Flujo de energía	Entrada de energía hidráulica. (agua bajo presión). Salida de energía mecánica (torque sobre el eje)	Entrada de energía mecánica (torque sobre el eje) Salida de energía hidráulica (agua bajo presión)
Cabeza de presión hidráulica	La altura disponible disminuye al aumentar el flujo (pérdidas por fricción)	La altura dinámica total que generará la bomba aumenta al aumentar el flujo.
Dirección de rotación	La turbina rueda con sentido de giro opuesto al impeler de la bomba	
Dirección del torque	En ambos modos es en la misma dirección.	

Nota sobre las PCH:

Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

Estas centrales de energía eléctrica son las que generan energía a partir de la captación de agua de pequeños cauces de ríos y quebradas. Esta captación se aprovecha para encausarla y con esto mover turbinas o impellers adheridos a generadores eléctricos de dos tipos principalmente: Generados Síncronos y Generadores Asíncronos de inducción.

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas PCH se catalogan como fuentes de energía eléctrica renovable no convencional, por lo que son energías que generan poco impacto negativo al medio ambiente además de su *relativo* bajo costo en cuanto a la implementación (*Guarin Restrepo & Flórez Galviz, 2013*).

Las PCH son sistemas de generación con capacidad hasta de 1 MW que a partir de la energía del flujo de agua, sin necesidad de grandes represamientos, pueden abastecer

pequeños asentamientos humanos y se observa que tienen implementaciones en casi todo el mundo.

Con lo anterior y por demás, las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas se han clasificado dependiendo de la capacidad energética, como:

- Las Mini Centrales Hidroeléctrica (100 a 1000 kW),
- Las Micro Centrales Hidroeléctrica (10 a 100 kW) y
- Las Pico Centrales Hidroeléctricas (PCH) (1 a 10 kW)

Colombia cuenta con varias fuentes renovables, pero en general el desarrollo de generación de energía con el aprovechamiento de recurso hídrico ha tomado fuerza y cada vez más se observa el desarrollo de proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas en donde las PAT's presentan una alternativa de gran valor frente al modo normal de generación de energía eléctrica con turbinas y generadores síncronos.

El estudio de la bomba como turbina (PAT) en su aspecto mecánico y en su aspecto eléctrico constituyen cada mes más una alternativa confiable, segura y **más económica** frente a los costosos y particulares sistemas convencionales de generación con medios hidráulicos. (Ver figura 5.5)

A continuación se muestran varios esquemas indicando el uso de la maquina asíncrona de inducción trifásica en su modo motor \textcircled{M} (Ver figura 5.3) y en su modo generador \textcircled{G} (Ver figura 5.4) asistiendo a una turbo maquina. La maquina hidraulica su vez se encontrará trabajando en el modo bomba \textcircled{B} y en el modo turbina \textcircled{T} .

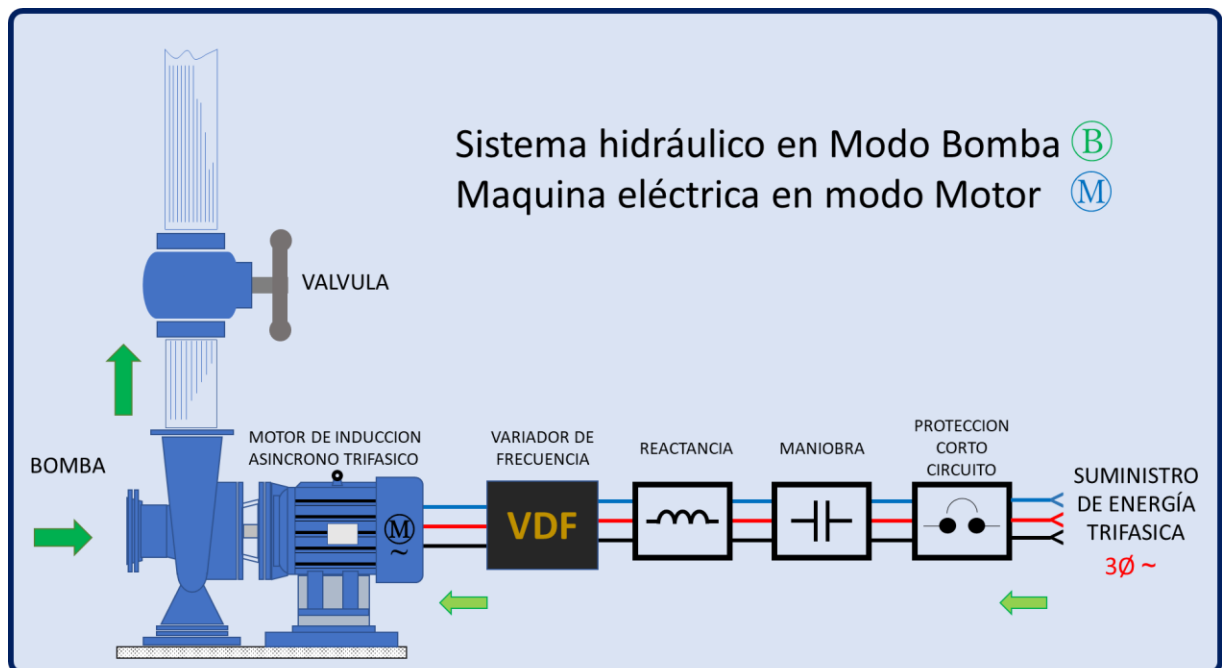


Figura 5.3. ESQUEMA ELECTRICO INICIAL DE LA BOMBA IMPULSADA POR UN MOTOR DE INDUCCION ASINCRONO ELECTRICO

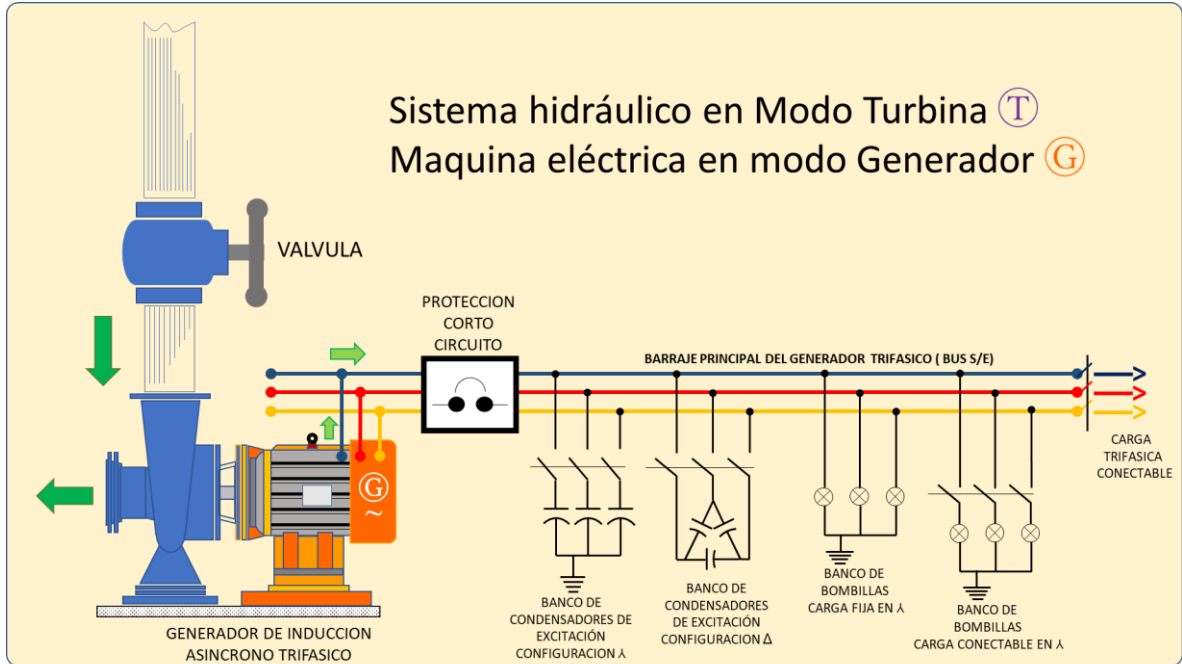


Figura 5.4. ESQUEMA ELECTRICO INICIAL DE LA BOMBA COMO TURBINA (PAT) IMPULSANDO UN GENERADOR ASINCRONO

**Ejemplo PAT .
Bomba como turbina.**

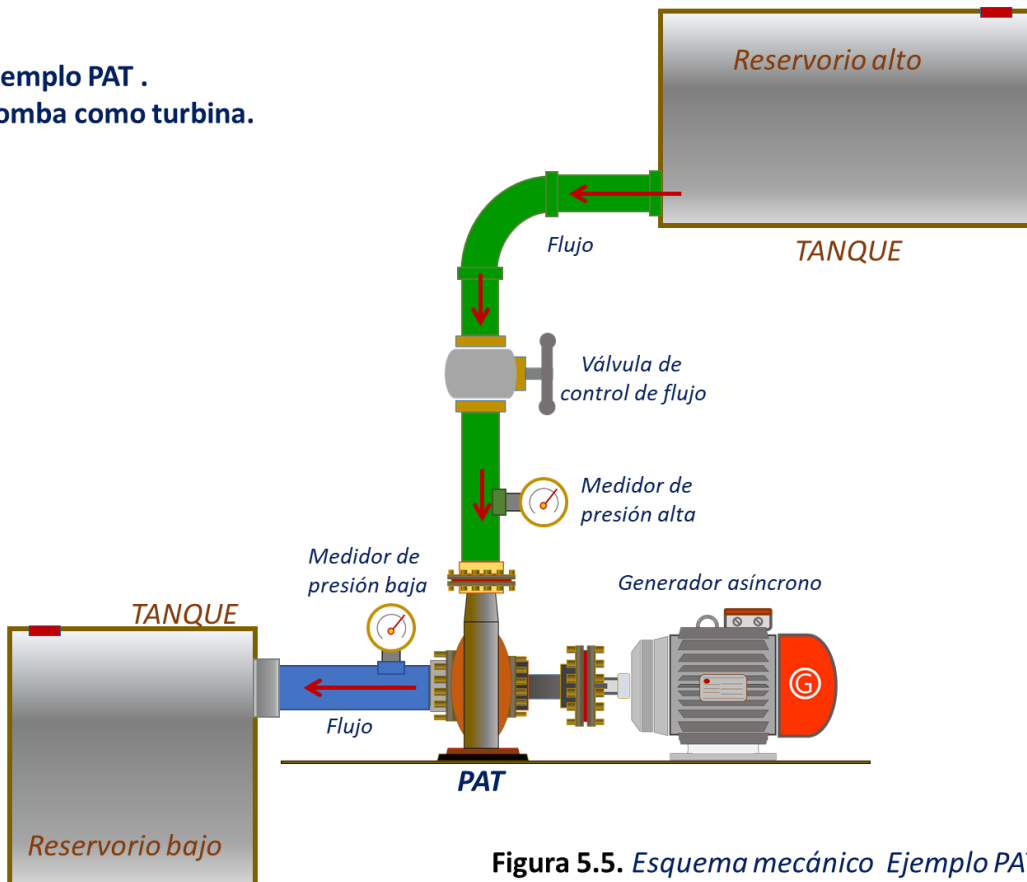


Figura 5.5. Esquema mecánico Ejemplo PAT.

Referencia útil: Ver figura 5.6.

Recomiendo este libro el cual es altamente especializado en PAT's y además es muy fácil de leer y entender.

MANUAL ON PUMPS USED AS TURBINES

Por:

J. M. Chapallaz

P. Eiechenberger

G. Fischer.

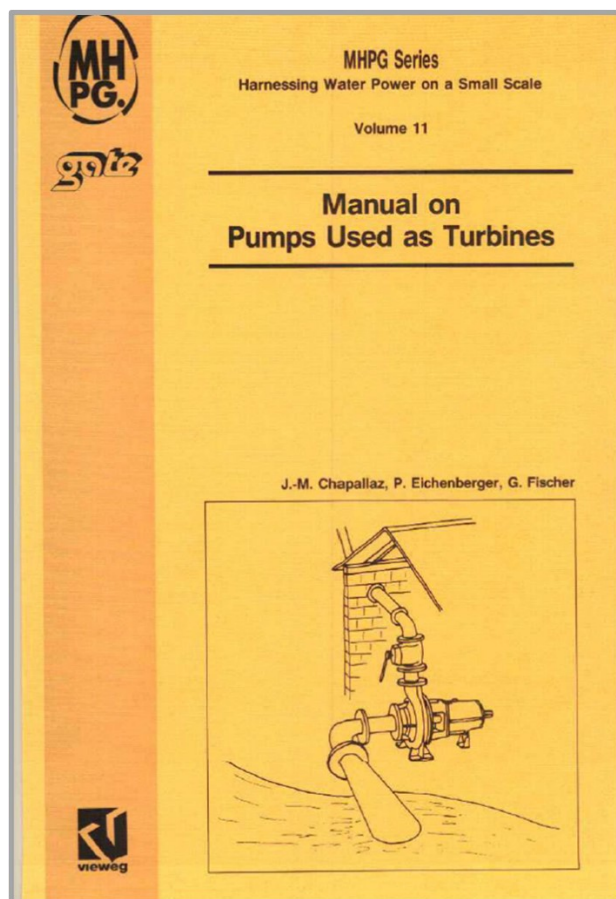


Figura 5.6. Libro de referencia recomendado.

En lo concerniente al Generador como tal, observamos que el voltaje en sus terminales de salida depende de tres factores.

- 1) La velocidad del *primo motor*
- 2) El tamaño de los capacitores y de su estado.
- 3) La carga conectada.

Una máquina de inducción trifásica puede funcionar como un generador auto excitado, cuando un primo motor hace girar su rotor a una velocidad apropiada, y la excitación necesaria para establecer el campo magnético giratorio en el entrehierro es suministrada conectando a las terminales del estator un banco trifásico de capacitores (previamente cargado) (operación de la máquina en estado aislado “stand alone”).

La fuerza electromotriz f.e.m. y las corrientes inducidas en los devanados se incrementarán hasta alcanzar un punto de equilibrio debido a la saturación magnética en la máquina. El magnetismo residual en el rotor establece el voltaje inicial, el cual se

incrementa con la corriente del capacitor lo que provoca un incremento continuo del voltaje.
 Como resultado de esta acción y de la saturación magnética, se establece un voltaje de estado estacionario en las terminales del generador. Ver figura 5.7.

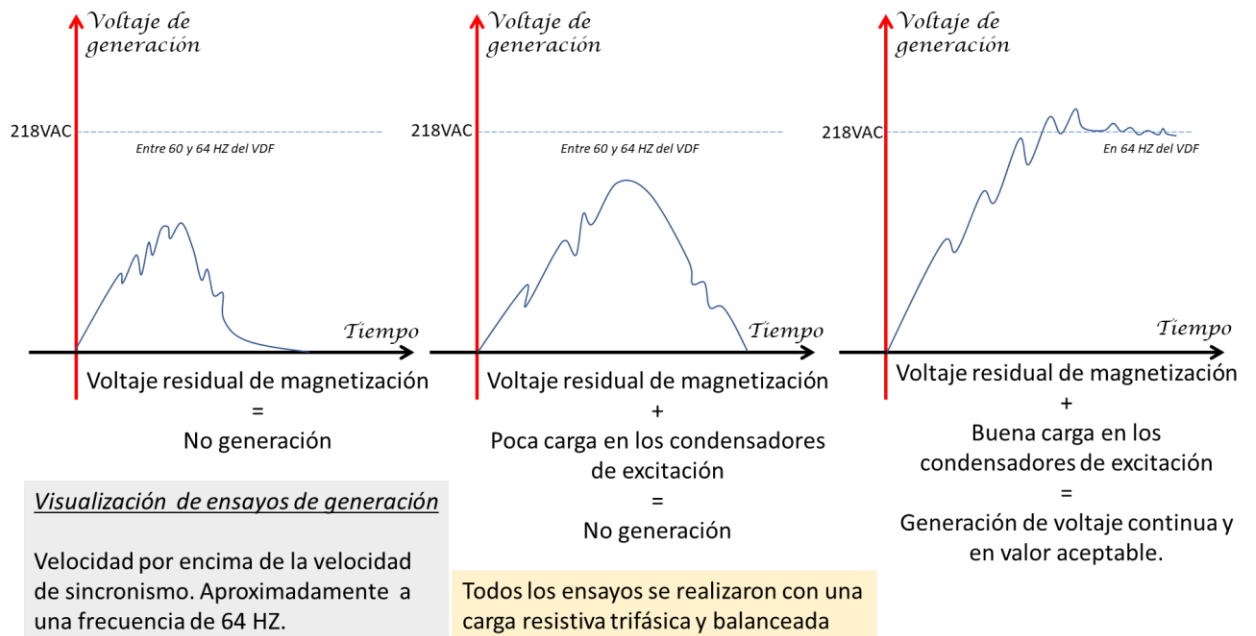
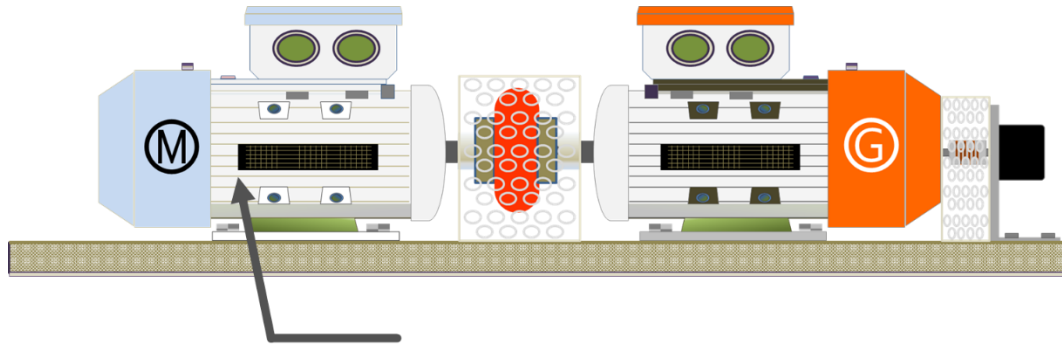


Figura 5.7. Visualización de ensayos de generación.

En ingeniería, un primo motor es un motor que convierte el combustible en trabajo útil.

En las locomotoras, el motor primario es, pues, la fuente de energía para su propulsión.

En un conjunto motor-generador $\text{M} - \text{G}$ (como el de nuestro estudio), el motor de inducción M es el motor primario, a diferencia del generador que es la máquina que se impulsa. Ver figura 5.8.



En el banco de trabajo que apoya esta tesis este equipo M es el que hace la veces del MOTOR PRIMO. Puede representar un impeler que es movido por un chorro de agua así como la hélice de un aerogenerador que es movida por el viento, etc..

Figura 5.8. El Motor primo en esta tesis es un motor de inducción trifásico. Con este equipo se facilitan los estudios de generación. Se encuentra asistido por un VDF (variador de frecuencia).

El significado real de Motor Primo es que es una fuente primaria de poder.

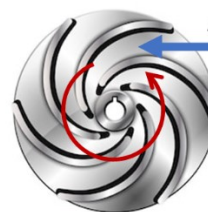
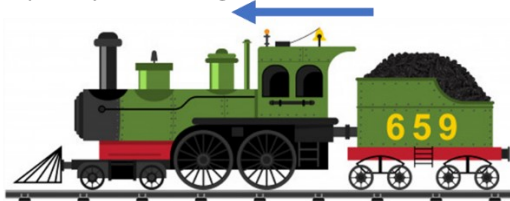
Significa toda la maquinaria que proporciona energía para realizar diferentes trabajos mecánicos.

Técnicamente, es un grupo de máquinas que transforman la energía de térmica, eléctrica o de presión en forma mecánica para su uso en diferentes fuentes para algunos trabajos mecánicos.

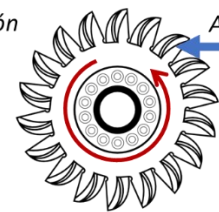
Los motores y turbinas son ejemplos.

Los motores son el motor principal de un generador eléctrico. Si el generador es de una central hidroeléctrica, la turbina será su motor principal en conjunto con el chorro de agua que la impulsa. Ver figura 5.9

Vapor a presión, luego de la combustión del carbón.



Agua a presión



Agua a presión

Figura 5.9. El concepto de motor primo. Aquel que tiene el poder de impulsar un rodete para lograr energía cinética capaz de la acción generativa de la maquina eléctrica.

Los tipos más comunes de recursos energéticos utilizados para generar electricidad y sus motores principales asociados, incluyen:

- Turbinas de vapor. Ver figura 5.9.
- Combustibles fósiles (carbón, gas, petróleo)
- Nuclear. Para generar calor y así producir vapor.
- Geotérmica

- Vapor calentado por energía solar
- Turbinas hidráulicas
- Presas y ríos. Turbinas o PAT's. Ver figuras 5.9 y 5.11.
- Turbinas de combustión
- Combustible Diésel
- Gas natural
- Ciclo combinado
- Turbinas de viento. Ver figura 5.10.
- Solar directo (fotovoltaico)

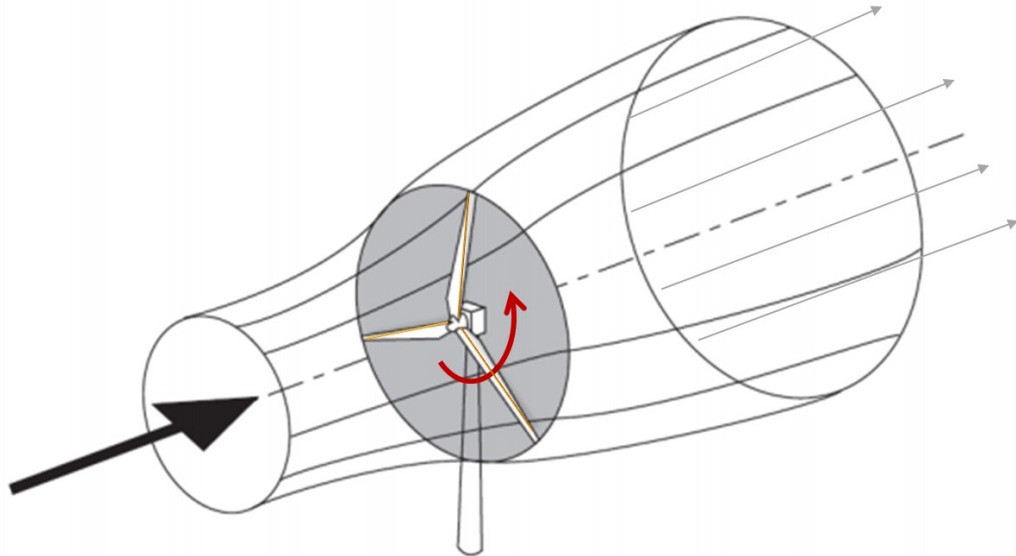


Figura 5.10: Turbina de viento que mueve un generador de inducción de rotor bobinado

En ingeniería, un motor Primo es un motor que convierte el combustible en trabajo útil.

En las locomotoras, el motor principal es por lo tanto la fuente de energía para su propulsión. Generalmente es cualquier locomotora alimentada por un motor de combustión interna.

En un conjunto de generador de motor, el motor es el motor principal, tan distinto del generador.

En una locomotora Diésel-mecánica, el motor principal es el motor diésel que está acoplado mecánicamente a las ruedas motrices (conductores). En una locomotora diésel-eléctrica, el motor principal es el motor diésel que gira el generador principal responsable de producir electricidad para alimentar los motores de tracción que están orientados a los conductores.

El motor principal también puede ser una turbina de gas en lugar de un motor Diésel.

En cualquier caso, el generador, los motores de tracción y el aparato de interconexión se consideran el sistema de transmisión de potencia y *no parte del motor principal*.

Una locomotora eléctrica con cable o con batería no tiene un motor principal a bordo, sino que depende de una central eléctrica externa.

Los Primo motores son las máquinas que *convierten algún tipo de energía en energía motriz*. Las rotatorias y las que pulsan linealmente hacia adelante y hacia atrás.

Los Primo motores se utilizan en las Industrias de Procesamiento se dividen en dos categorías ya hoy históricas, *Motores eléctricos* y *Motores de explosión*.

La potencia de rotación generada por un Primo motor es transferida desde el Eje del Conductor al Eje del Equipo Giratorio al que está acoplado.

El eje del equipo giratorio gira la carga que realiza el trabajo que se debe realizar.

Un motor eléctrico es un dispositivo que convierte la energía eléctrica (o hidráulica) en movimiento (también conocido como potencia motriz).

Un motor de explosión o adiabático es un dispositivo que utiliza combustión o calor para producir movimiento (también conocido como potencia motriz).

Es probable que la definición de Motor se amplíe por mucho tiempo, ya que cada vez más se utilizan formas alternativas de energía para convertir la energía en movimiento.

Otra diferencia general entre Motores eléctricos y Motores de explosión es el *hardware* identificativo que se encontrará en cada tipo de dispositivo:

El motor de explosión tiene un pistón que se mueve hacia arriba y hacia abajo en un cilindro debido a la fuerza motriz proporcionada por la quema un combustible.

Los motores eléctricos tienen rotores y estatores.

Los motores de explosión tienen pistones y cilindros y están conectados a un cigüeñal.

Los motores primo a menudo se llaman "equipos de conducción" porque son la fuente principal de energía mecánica o potencia.

La energía mecánica producida por el motor principal es transmitido a otra máquina o mecanismo, como una bomba o compresor de aire, para hacer alguna forma de trabajo útil.

El mecanismo, o vinculación, que transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor principal se llama el manejador (en inglés el DRIVE).

Los motores eléctricos y los motores de combustión interna se utilizan comúnmente como motores primo en una aplicación determinada.

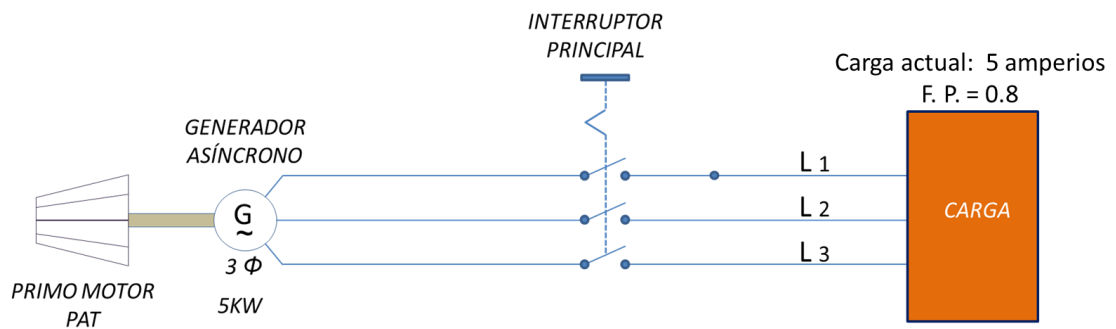
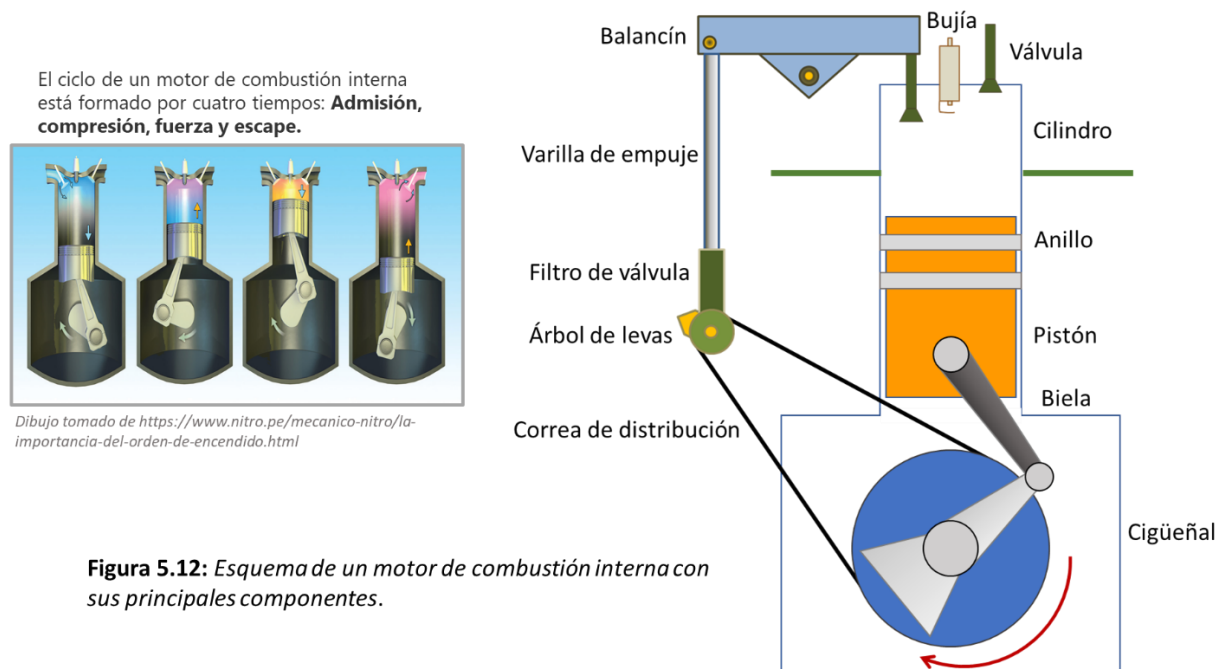


Figura 5.11: Sistema eléctrico de generación de energía. El Motor primo en una PAT es un chorro de agua chocando contra los alabes de un impeler de una bomba, dándoles impulsión asemejando una turbina. La potencia se calcula de acuerdo al valor del caudal y la presión posibles en el chorro de agua. Prima su altura y su caudal. La potencia del generador se estima con estos datos iniciales usando las ecuaciones de Bernoulli en conjunto con las otras leyes de la hidráulica. El generador luego debe tratarse y diseñarse como una subestación de energía eléctrica en donde prima la generación, la transformación y el despacho de potencia eléctrica.

Motor de Pistón de combustión.

Este motor de combustión tiene un pistón que se mueve hacia arriba y hacia abajo en un cilindro, debido a la fuerza motriz proporcionada por la quema un combustible. No es un motor eléctrico. Ver figura 5.12.



Conclusión:

El primo Motor puede ser una turbina de vapor, una turbina a gas, una turbina hidráulica, un motor diésel, un motor a gasolina, un flujo considerable de viento, etc. Mediante unidades de control es posible regular la admisión de más vapor, gas, caudal, combustible, etc, del primo-motor para brindar más o menos potencia activa según se requiera. A mayor demanda de potencia, mayor consumo del vapor, gas o combustible del primo-motor.

Nuestro Primo Motor pretende asemejarse a las ideas anteriores ya que es un elemento impulsor del Generador ©.

El banco de trabajo busca entonces hacer que en conjunto con el VDF, el PLC y el suministro de energía de la red, constituyan un motor Primo válido para el estudio del grupo ℳ - ©.

El Motor Primo implementado se programó en su aspecto más básico para impulsar a la máquina asíncrona y llevarla hasta la generación, pero puesto que esta asistido por un PLC, es factible programarle tareas que pueden llevarlo a simular algunos comportamientos propios de cada Motor Primo tales como la cavitación y el golpe de ariete en un propulsor hidraulico. Estas proyecciones no están detalladas en este trabajo de tesis.

Capítulo 6

Mejoras en el Tránsito del trabajo.

Objetivo específico:

Mostrar cambios relevantes en el desarrollo del proyecto y marcaron pautas para tener el trabajo final actual.

Estos cambios están muy relacionados con el resultado final de la generación de electricidad trifásica.

Observar también el mejoramiento de algunos aspectos de seguridad eléctrica en el hardware final es otro de los objetivos de este capítulo.

En este capítulo se muestran los diferentes cambios realizados al prototipo M - G a lo largo del desarrollo del trabajo. El trabajo ha contemplado varios cambios desde la elaboración del prototipo inicial. Los cambios se realizaron buscando optimizar el funcionamiento de las partes y están basados en la observación del prototipo funcionando con la carga básica y con carga adicional. También el diseño final contempló los requerimientos necesarios como para que este prototipo llegase a ser un banco de trabajo seguro y práctico en el laboratorio.

Como ya hemos relatado, basados en la observación, se comenzó con la construcción de un prototipo con maquinas asincronas de inducción buscando obtener energía eléctrica trifásica de una de estas maquinas la cual sería impulsada por la otra. La figura 6.1 muestra un esquema sencillo de este prototipo.

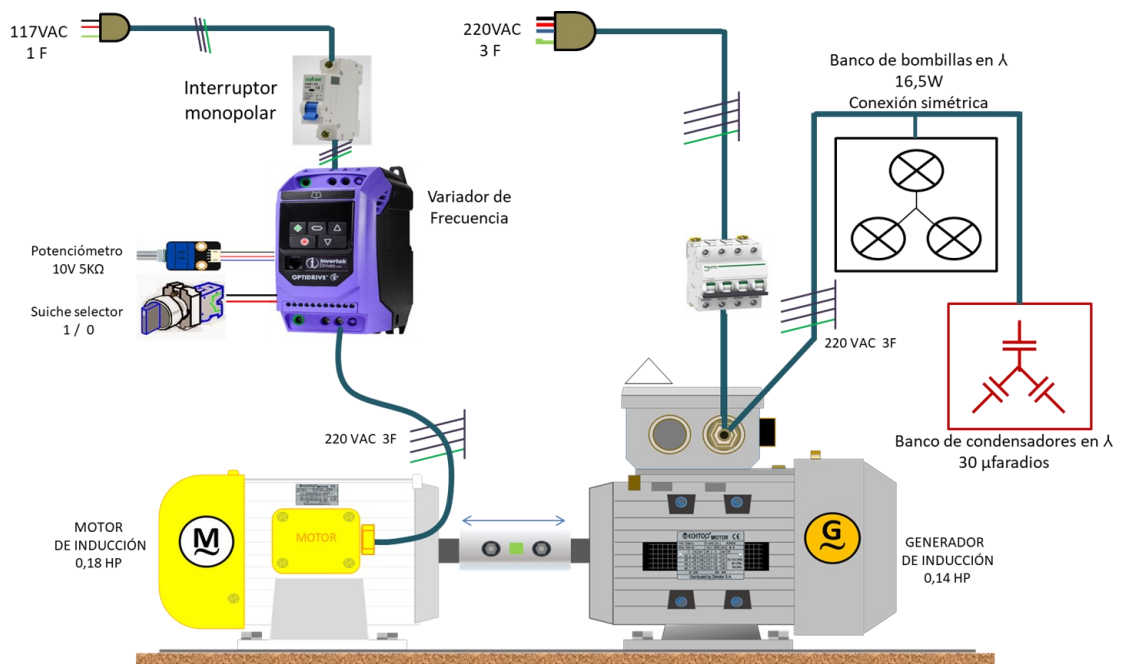


Figura 6.1. Esquema del prototipo M - G del trabajo con sus elementos de conexión básicos. Se destacan el VDF del Motor con su potenciómetro para la consigna de velocidad, la carga de las bombillas en configuración 3ϕ en Δ y el banco de capacitores trifásico en Δ en paralelo con los bornes de salida de voltaje del Generador G . También se observa el interruptor para el arranque de G como M para excitar los devanados del Generador.

A continuación, se expone un registro cambios importantes que tuvo el hardware de este trabajo a medida que se iban perfeccionando las diferentes operaciones que se ejecutan en el proceso de la generación de la energía con máquinas trifásicas asíncronas. Las figuras 6.2 hasta 6.7 exponen cambios significativos realizados al banco prototipo y tienen como objetivo mejorar el grupo Motor – Generador M - G para lograr una generación aceptable desde el punto de vista del estudio y comprensión del generador asíncrono.



Figura 6.2. Registro fotográfico del prototipo M - G inicial del trabajo. 1/7 HP. 230Vac de generación. El motor se asistió con un VDF con salida 3 ϕ pero con una alimentación 1 ϕ a 117Vac. Esto facilitó el poder realizar los primeros ensayos mientras se iban adquiriendo los elementos eléctricos para colocar a funcionar al generador asíncrono.

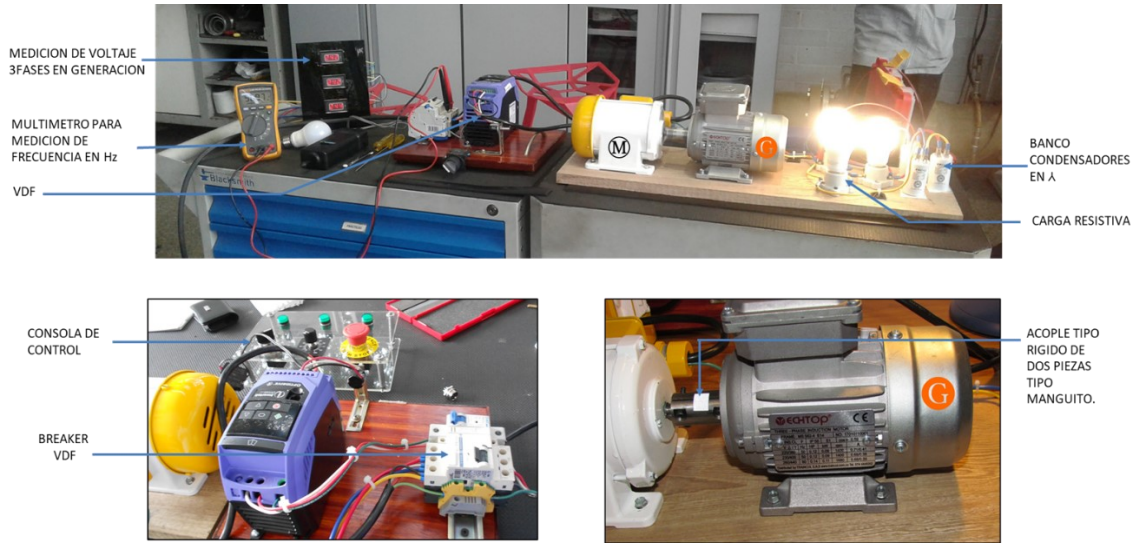


Figura 6.3. Registro fotográfico del prototipo M - G inicial del trabajo. 1/7 HP. 230Vac de generación. Se muestra el prototipo en operación, Generando. Diseño inicial de banco con sus aparatos de medición. Se observa la marca reflectiva en el manguito rígido para la toma de la velocidad angular con un tacómetro óptico.

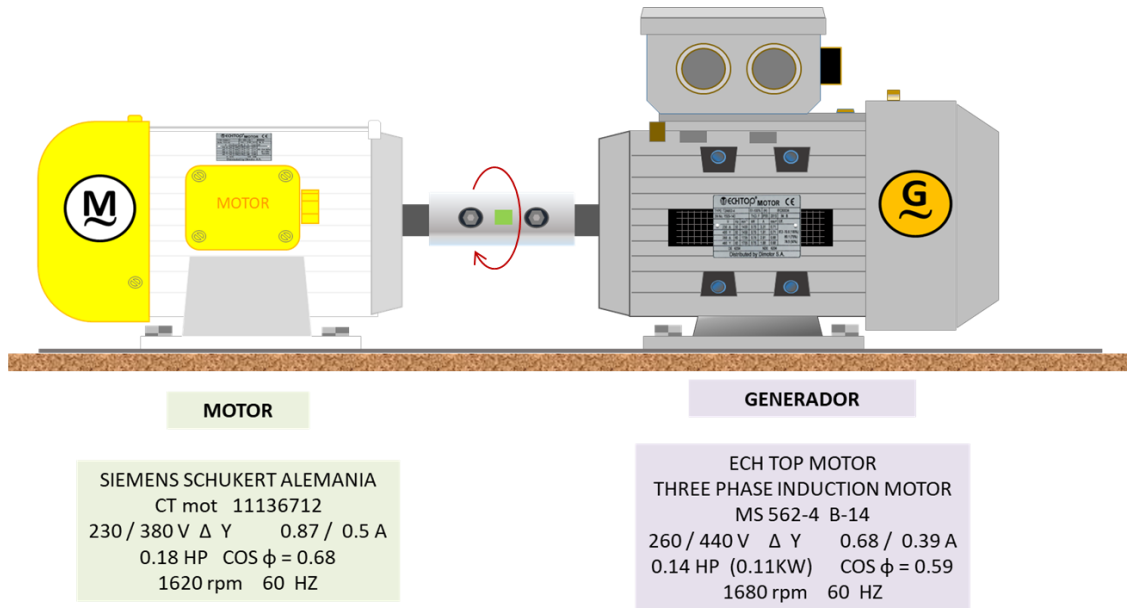


Figura 6.4. Esquema del prototipo M - G del trabajo. Se utilizaron 2 motores de inducción de baja potencia ensamblados sobre una base de madera. El equipo se llevo por encima de 60Hz (64Hz) y generó luego de haber cargado los condensadores.



Figura 6.5. Vistas del prototipo M - G del trabajo. Mejoras en el banco de trabajo. Acople entre los motores, colocación de guarda en el acople central e instalación de Encoder el lado del motor..

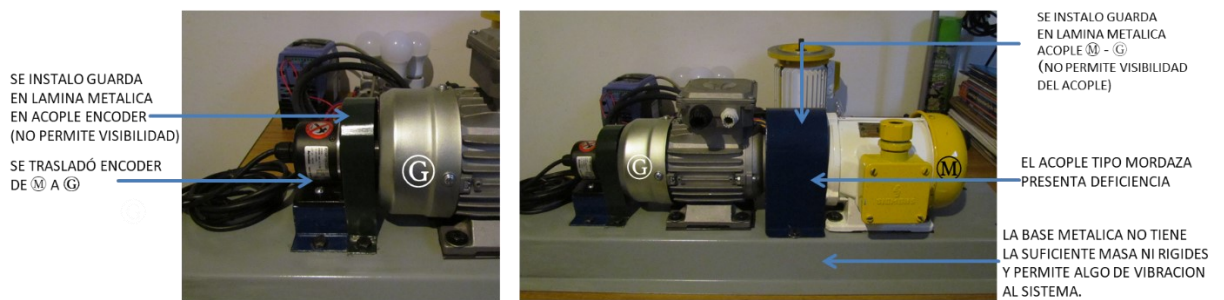


Figura 6.6. Vistas del prototipo M - G del trabajo. Mejoras en el banco de trabajo. Izquierda: se trasladó el encoder al lado del generador por ser más representativa la toma de velocidad angular en este lugar. Derecha: Se colocaron guardas protectoras de elementos móviles en el acople principal del grupo M - G y en el acople del encoder con el generador por el lado del ventilador.

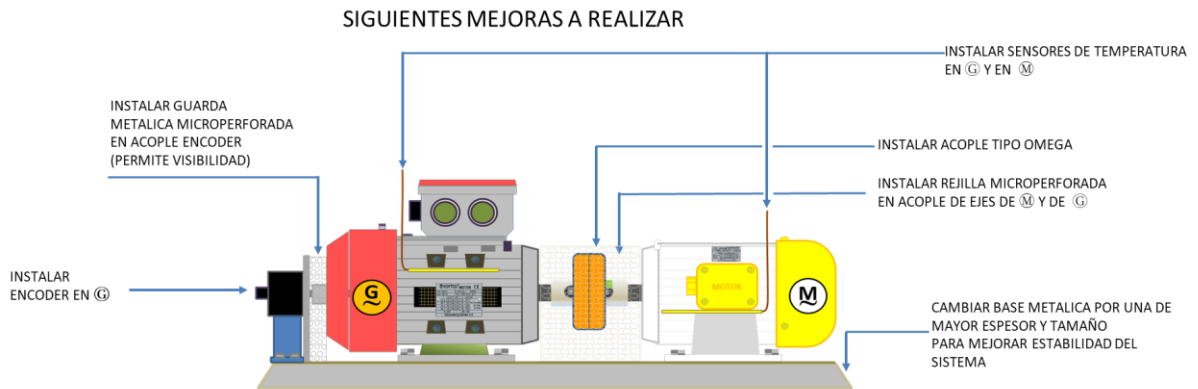


Figura 6.7. Vistas del prototipo \odot - \odot del trabajo. Siguientes mejoras realizadas al banco de trabajo de 1/7 HP. Este ensamble presenta muchas mejoras con respecto al anterior: Posee una base metálica mas robusta y mas fácil de levantar. Se le colocaron guardas visibles microperforadas al acople central y al acople del encoder para poder verlos en funcionamiento. Y se le colocaron sensores de temperatura superficial (PT100) tanto al motor \odot como al generador \odot .

Ahora, las figuras desde la 6.8 hasta la 6.20 exponen las mejoras realizadas al banco de trabajo diseñado y construido para ser usado en un ambiente estudiantil, y es por esto que estas mejoras apuntan a un equipo amigable, seguro y fácil de operar.

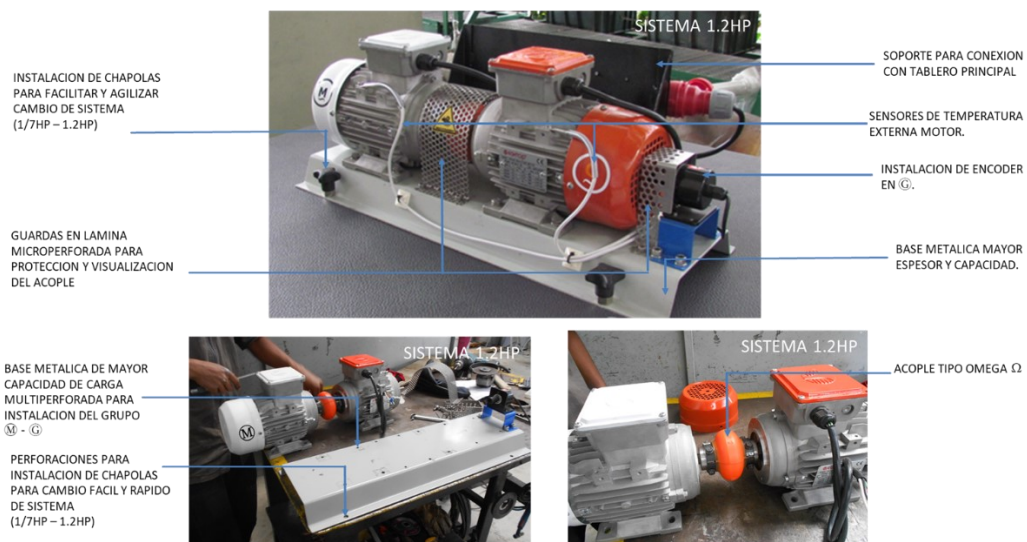


Figura 6.8. Vistas del GRUPO \odot - \odot de 1,2 HP. Vistas del ensamble del grupo. Se observan las guardas de protección contra partes móviles, las ondas de temperatura superficial, la base metálica, el motor, el generador y el encoder. Este montaje es similar al de grupo \odot - \odot de 1/7 HP.

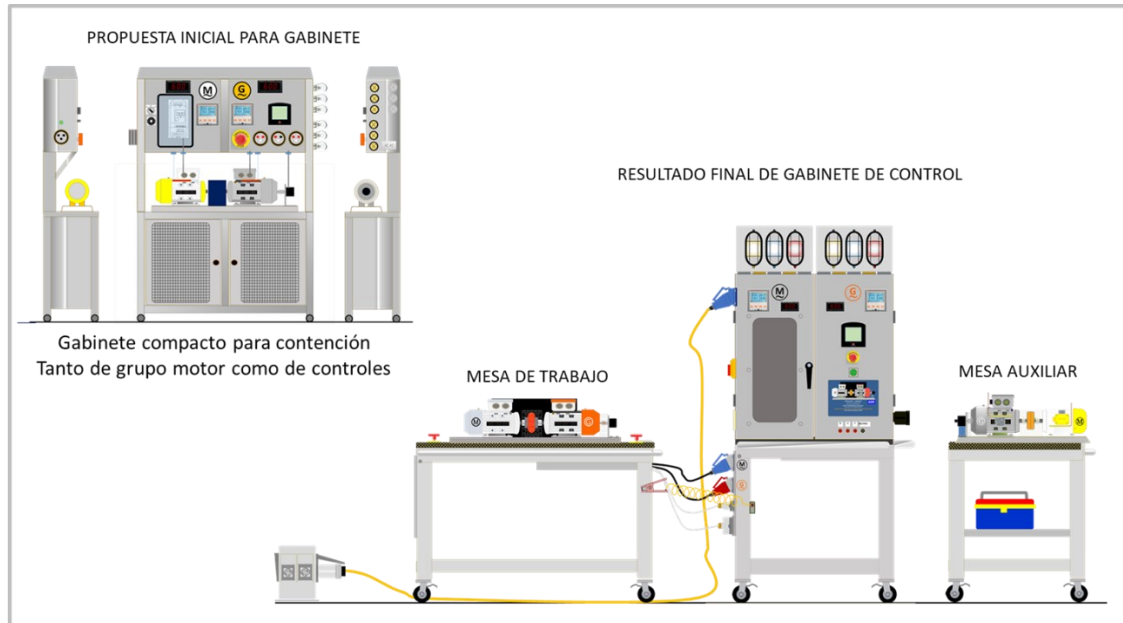


Figura 6.9. Vistas del diseño gabinete de control y de la mesa de trabajo. Arriba a la izquierda se observa un diseño compacto que no se ejecutó. Abajo a la derecha aparece el diseño ejecutado y con el que se trabaja actualmente.

Inicialmente las luces de carga del generador estaban fijas y presentaron problemas de seguridad por posible electrocución al tacto.

También presentaban inconvenientes en la instalación del forro plástico protector por posible rotura del mismo debido al contacto con las aristas de la base de los sockets de los bombillos.

La mesa inferior del gabinete no fue suficiente para albergar los equipos que no estaban en uso y mostraban desorden.

Debido a lo anterior se construyó una mesa auxiliar ergonómica para su resguardo ordenado y facilitó el intercambio de los bancos 1/7 HP y 1.2 HP.



Figura 6.10. Vistas del diseño gabinete de control evidencia de mejoras durante el proceso de construcción.

La base de bombillas que se muestra en la foto resulto ser peligrosa debido a que los terminales de los sockets quedaban expuestos y presentaban muchas posibilidades de contacto con ellos. Además los sockets resultaron ser de baja calidad. Por esta razón y por la del plástico protector se optó por el nuevo diseño con luminarias tipo tortuga.



Figura 6.11. Vistas de evidencias de mejoras realizadas al equipo durante el proceso de pruebas al gabinete de control. Se impactó sobre todo en el aspecto de la seguridad operativa del equipo. Recomendaciones del personal del laboratorio.



Figura 6.12. Vistas de evidencias de mejoras realizadas al equipo durante el proceso de pruebas al gabinete de control. Se observa el cambio realizado a los dos grupos de bombillas LED del banco de trabajo. Los grupos de bombillas son abatibles tal como se ilustra en la figura.

Los bombillos LED se encuentran encerrados en lámparas tipo tortuga en vidrio con rejilla para evitar el contacto accidental con los bornes de los sockets de las bombillas y el quiebre de las mismas.

Las dos tapas superiores que contiene las bombillas son batientes de accionamiento manual con el fin de facilitar la puesta (y el retiro) del plástico protector del equipo en el momento en que este ya no se va usar (o, al contrario).

Estos batientes también mejoran considerablemente la visualización de las luces.



Figura 6.13. Vistas del resultado final del banco de trabajo. Se observan la mesa de trabajo con uno de los grupos M - G en posición, el tablero de potencia y control y la mesa auxiliar de ubicación de accesorios y del grupo M - G no utilizado.

A continuación, se exponen algunas mejoras que se realizaron en los pantallazos del HMI del PLC con miras a tener una mejor operación con menos acciones manuales sobre en el arranque del generador como motor.



Figura 6.14. Vista del Pantallazo HMI inicial para el arranque de G como M . Este pantallazo se reformo debido a que involucraba muchas acciones manuales.

Este pantallazo (**ARRANQUE DE G COMO M**) inicial involucraba varias maniobras manuales:

Pasar de 1 a 0 el selector de encendido del variador del motor y luego el interruptor de la derecha pasarlo de rojo a verde para el arranque de G como M , y luego devolverse hasta habilitar nuevamente el variador del motor M , pasando por el apagado de G como M .

El pantallazo se modificó por uno más sencillo y con más operaciones automáticas que el anterior, mejorando con ello el arranque de G como M.

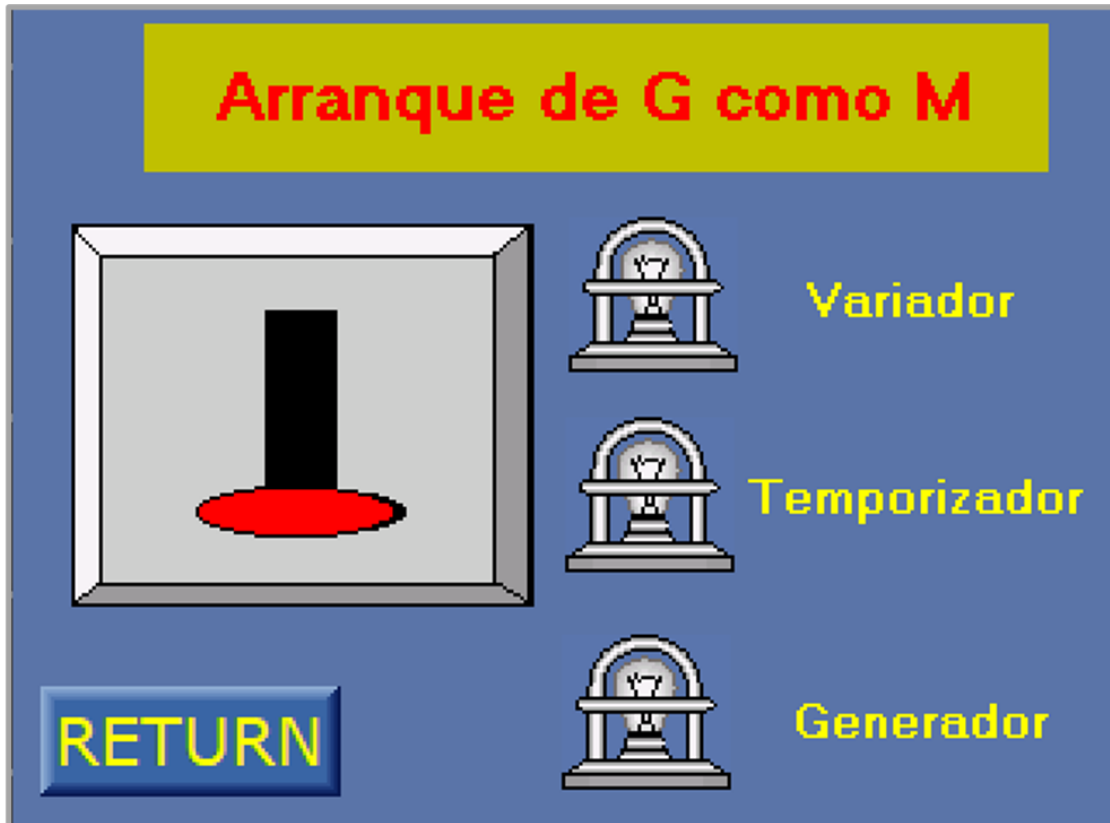


Figura 6.15. Vista del nuevo Pantallazo HMI para el arranque de \textcircled{G} como \textcircled{M} . Se suprimieron acciones manuales.



Figura 6.16. Vista del nuevo Pantallazo HMI para el arranque de \textcircled{G} como \textcircled{M} .

Se muestra la parte en que el interruptor principal se accionó manualmente y paso de rojo a verde y con esto todo lo que se sigue en el arranque es automático.

Este pantallazo involucra muy pocas acciones manuales para el arranque del generador como motor con el objetivo de lograr la magnetización de los devanados para cuando vaya al trabajo normal como generador.

Se observa como las bombillas del pantallazo van encendiendo automáticamente a medida que se desarrolla el arranque de \textcircled{G} como \textcircled{M} .

Este pantallazo simplifica el proceso anterior realizando una secuencia automática de encendido solo con subir el interruptor de la izquierda iniciando el proceso automático de \textcircled{G} como \textcircled{M} y al pasar de verde a rojo procede al apagado de \textcircled{G} como \textcircled{M} y a la habilitación del VDF del motor \textcircled{M} .

Mejoras en la parametrización y monitorización de los equipos medidores de variables eléctricas tanto en el lado motor como en el lado generador.



Figura 6.17. Vista de la llave USB usada para comunicar el software xPRESS marca LOVATO desde una PC con los medidores de variables eléctricas DMG610 marca LOVATO. Esta llave en conjunto con el software facilitan la parametrización de los equipos (uno para M y otro para G) y además cuenta con la monitorización en línea del equipo que se desee analizar en mas detalle en los ensayos.

Se adquirió la llave de programación IR-USB código CX01 con la cual se logró realizar una mejor configuración de los parámetros a través del programa Xpress de LOVATO Ver figuras 6.18 y 6.19.

Este programa permite lo siguiente:

Monitoreo de las principales variables

Realizar la parametrización del dispositivo

Realizar curvas de tendencias de variables

Posibilidad de registro de variables de varios dispositivos

Los medidores de parámetros eléctricos en M y G son marca LOVATO con el modelo DMG 610.



Figura 6.18. Vista del Pantallazo inicial del software Xpress de LOVATO

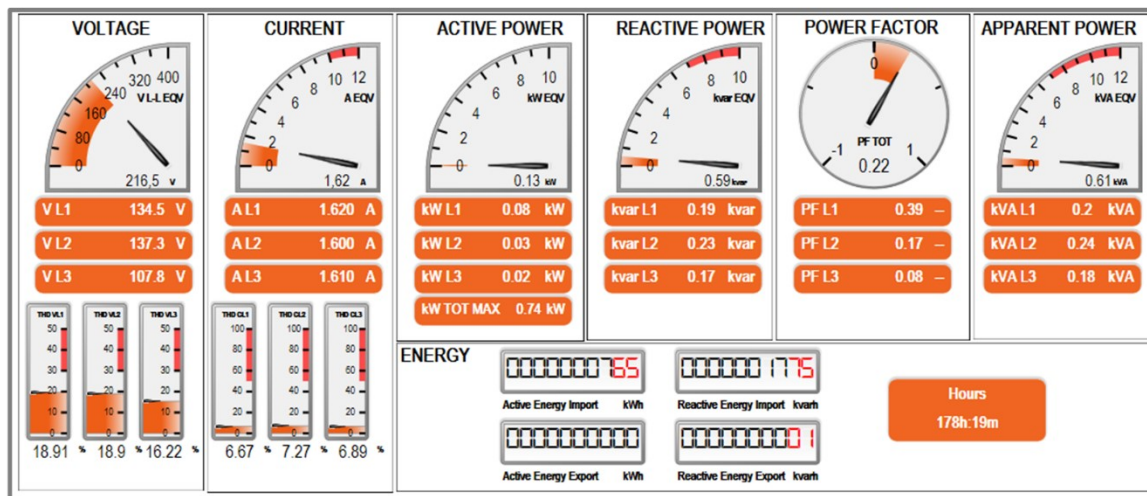


Figura 6.19. Ejemplo de monitorización de datos en el motor \mathcal{M} del programa Xpress de LOVATO. Ver capítulo 10. Las variables más representativas se muestran en indicadores análogos: Voltaje, Corriente eléctrica, Potencia Activa, Potencia Reactiva, Factor de Potencia, Potencia Aparente y Armónicos en Voltaje y Corriente. Existe otra multiplicidad de lecturas de variables que se muestran en otras páginas activas del software xPRESS.

Vista del banco de trabajo M - G final.



Figura 6.20. *Vistas del resultado final del trabajo. Izquierda: Equipo generando y con los dos grupos de bombillas LED activos. Derecha: El equipo final con los grupos de bombillas apagado y replegados.*

Conclusión:

El estudio de los grupos motor M - Generador G asíncronos de inducción es factible intensificarlo con el montaje de un banco de trabajo como el que se muestra, el cual es el resultado final de los varios cambios efectuados a un prototipo inicial buscando un mejor desempeño y una mejor más segura operación del mismo.

Capítulo 7

Detalle de un grupo Motor M Generador G .

Objetivo específico:

Detallar los componentes principales de un grupo Motor Generador M - G , ver su definición y sus aspectos más relevantes con miras a integrarlo al banco de trabajo.

El generador de inducción G está acoplado al motor de inducción trifásico de jaula de ardilla M para simular diferentes velocidades del motor primo tal como lo haría una turbina (agua), o el impeler de una bomba (PAT), o la hélice de un aerogenerador (viento), o el motor de explosión de un **generador Diésel etc.**

Para variar la velocidad del motor primo, el motor de inducción trifásico se controla a través de un variador de frecuencia.

De esta forma, podremos simular diferentes velocidades de del motor primo y observar la respuesta del generador eléctrico acoplado a la red.

Definiciones.

Un grupo motor generador es aquel que está integrado por uno o más motores mecánicamente acoplados a uno o más generadores.

- Más información en: [Grupo motor generador \(Electricidad\)](https://glosarios.servidor-alicante.com) © <https://glosarios.servidor-alicante.com>

Grupo convertidor rotativo que consta de un motor alimentado por C.A., que va aplicado mecánica o directamente, a un generador, dinamo, que proporciona C.C. o C. A.

También se le llama grupo convertidor.

- Más información en: [Grupo motor generador \(Electricidad\)](https://glosarios.servidor-alicante.com) © <https://glosarios.servidor-alicante.com>

Un motor-generador es la combinación de un generador eléctrico y un motor (motor primario) montados juntos para formar una sola pieza de equipo. Esta combinación también se llama un conjunto motor-generador o de un grupo electrógeno . En muchos contextos, el motor se da por sentado y la unidad combinada simplemente se llama generador . Un motor-generador puede ser una instalación fija, parte de un vehículo o lo suficientemente pequeño para ser portátil. Motor-generador - <https://es.qaz.wiki/wiki/Engine-generator>

Componentes

Además del motor y el generador, los motores-generadores generalmente incluyen un suministro de combustible, un regulador de velocidad constante del motor (gobernador) y un regulador de voltaje del generador, sistemas de enfriamiento y escape, y sistema de lubricación, etc.

Las unidades de más de 1 kW de potencia (aproximadamente) suelen tener una batería y un motor de arranque eléctrico. Las unidades muy grandes pueden arrancar con aire comprimido a un motor de arranque impulsado por aire o introducirse directamente en los cilindros del motor para iniciar la rotación del motor.

Las unidades de generación de energía de reserva a menudo incluyen un sistema de arranque automático y un interruptor de transferencia para desconectar la carga de la fuente de energía de la red pública cuando hay un corte de energía y conectarla al generador.

<https://es.qaz.wiki/wiki/Engine-generator>

Variación de la frecuencia (velocidad) del motor primo:

El motor de inducción trifásico se controla a través de un variador de frecuencia.

Ver figura 7.1.

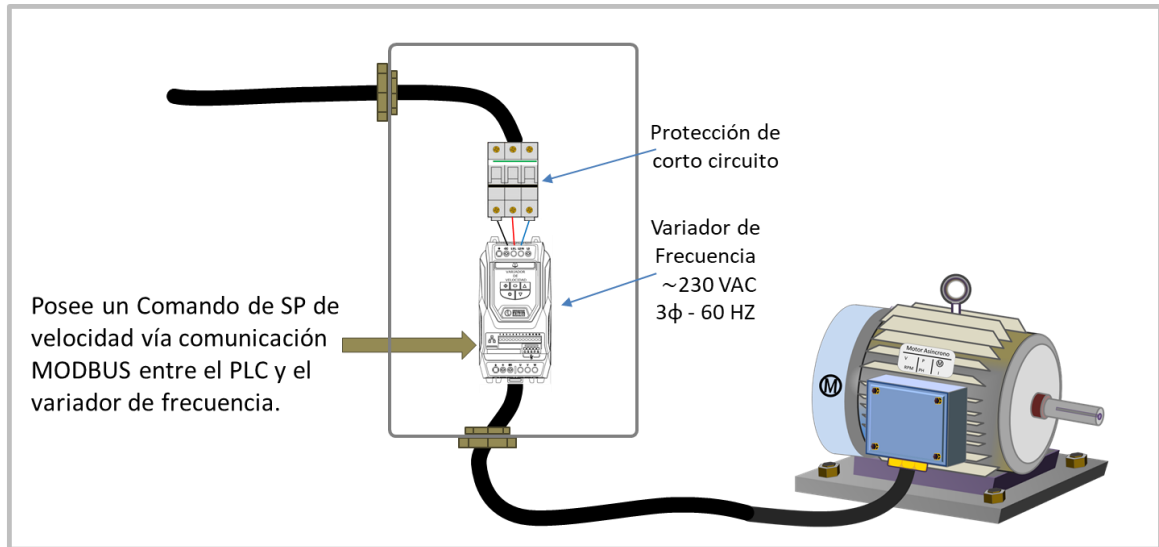


Figura 7.1. El motor M del banco de trabajo se encuentra asistido por un variador de frecuencia para que este pueda variar su velocidad por encima y por debajo de su “velocidad” nominal dentro de unos rangos seguros.

Con esta opción el motor posee un rango de velocidad continuo desde 0Hz hasta más menos 75Hz.

Y con esta configuración se simula el motor primo con sus diferentes velocidades. Además, puede llevarse a la maquina asincrónica a su punto de generación el cual se encuentra por encima de la velocidad de rotación del campo magnético del estator, también llamada la velocidad de sincronismo.

El banco de trabajo cuenta con todos los elementos de seguridad eléctrica y mecánicos, requeridos para un trabajo seguro.

El banco grupo Motor Generador M - G de Inducción está formado por los siguientes elementos:

- Alimentación principal industrial.
- 3 Bancos de condensadores conmutables trifásicos.
- 1 Variador de Velocidad electrónico 1,5 KW.
- 2 Analizadores de Redes trifásicos. Uno para el Motor y otro para el Generador
- Protección del motor (1,6 A – 2,5 A).
- 1 Contactor trifásico para un grupo de bombillas. Carga adicional.
- 1 Grupo Motor - Generador de 0,90 KW. Ver figura 7.3.
- 1 Grupo Motor - Generador de 0,11 KW. Ver figura 7.4
- 1 PLC Unitronics con HMI. Ver figura 7.2.
- 1 Software de programación del PLC con SCADA incluido.
- 1 Red MODBUS con el PLC como maestro y con tres esclavos (dos medidores de parámetros eléctricos y un variador de velocidad).
- Todo el sistema está debidamente montado en mesas separadas y con ruedas para fácil desplazamiento.
- Cables y Accesorios, para un funcionamiento normal.

Veremos a continuación algunas de las partes más importantes que componen el grupo M - G :

- Detalle físico del grupo M - G . Ver figuras 7,3, 7,4 y 7,5
- Detalle eléctrico del grupo M - G . Ver figuras 7,6 y 7,7
- Incorporación en el montaje General del banco de pruebas. Ver figura 7,8
- Registro fotográfico. Ver figuras 7,9 y 7,10



Figura 7.2. Vista Pantalla en el HMI del PLC con el grupo M - G .

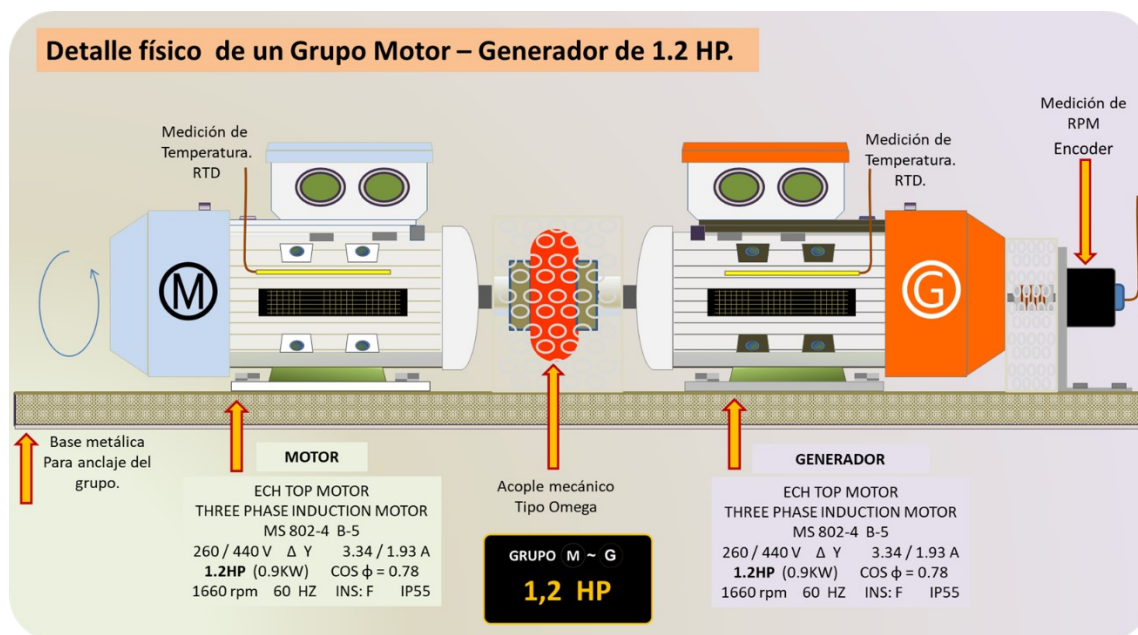


Figura 7.3. Vista del detalle físico del grupo M - G de 1,2 HP.

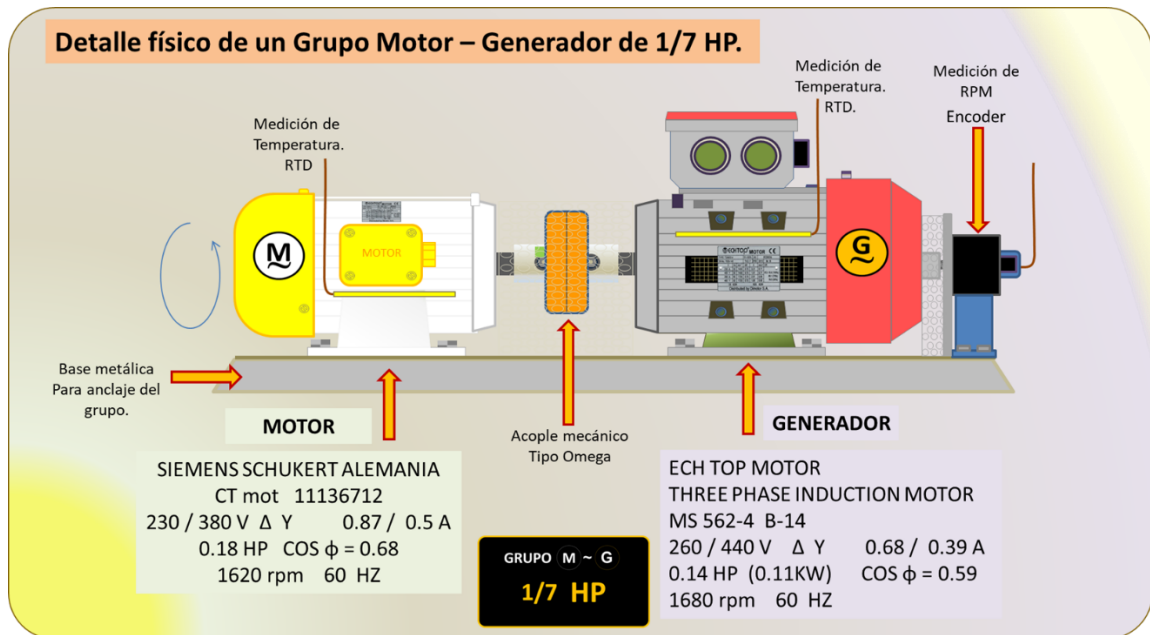


Figura 7.4. Vista del detalle físico del grupo $\text{M} - \text{G}$ de 1/7 HP.

Detalle físico de un Grupo Motor – Generador Vista superior de la mesa de trabajo con un grupo $\text{M} - \text{G}$

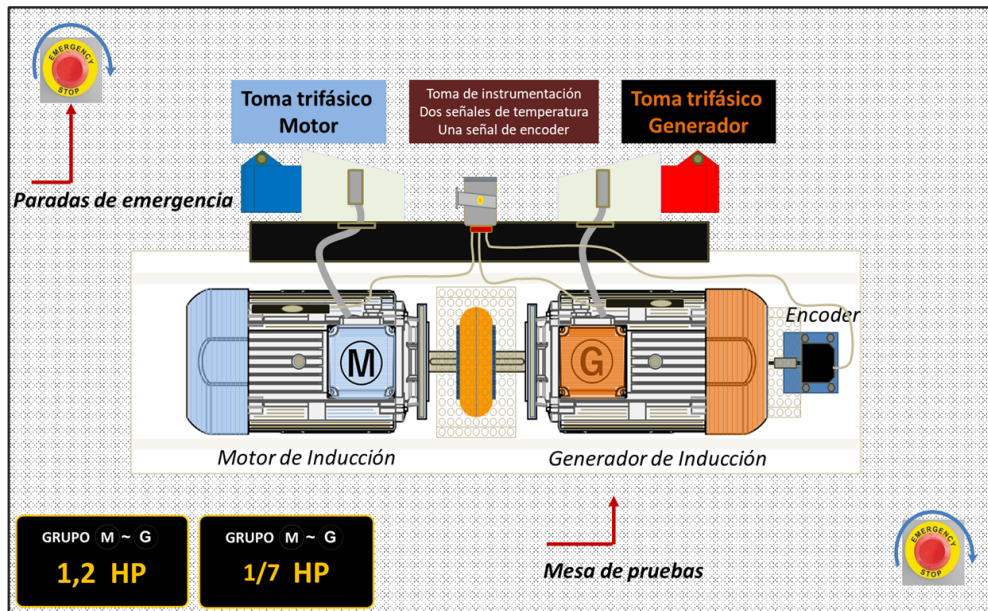


Figura 7.5. Vista del detalle físico de un grupo $\text{M} - \text{G}$ en su vista superior montado en la mesa de trabajo en donde se observan las paradas de emergencia y parte del cableado de potencia y control que se maneja en las operación de los grupos..

Detalle eléctrico de un Grupo Motor – Generador.

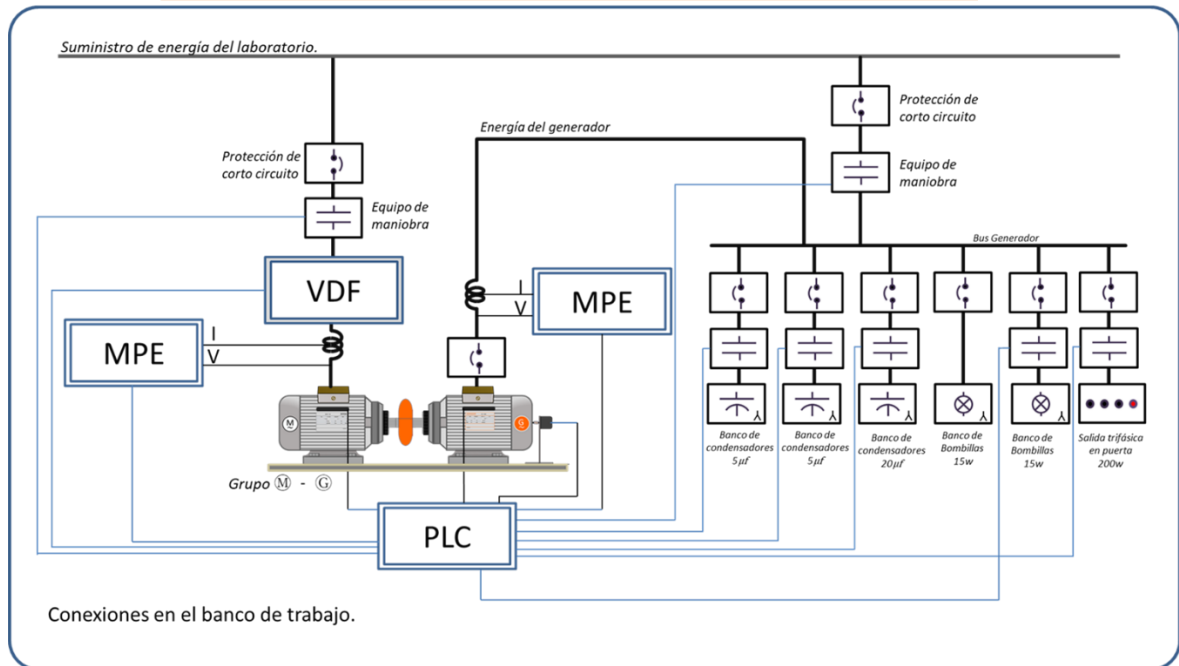


Figura 7.6. Vista del detalle eléctrico de un grupo M - G.

Detalle eléctrico de un Grupo Motor – Generador.

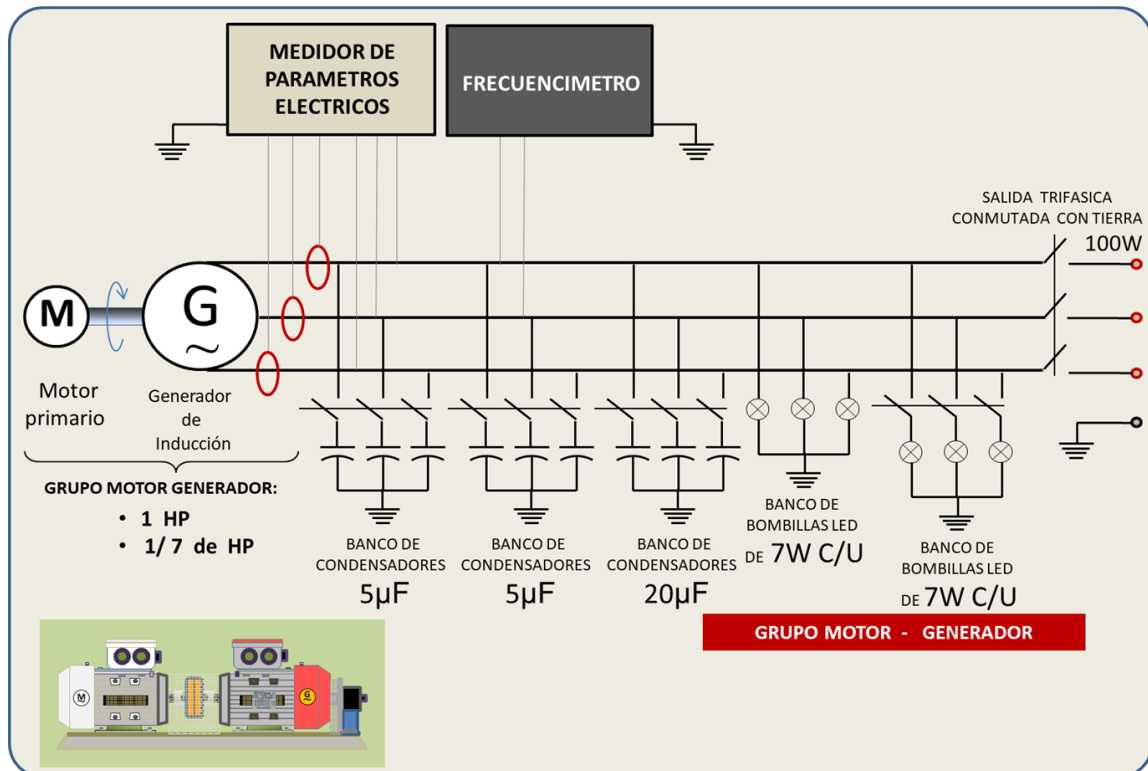


Figura 7.7. Vista del detalle eléctrico de un grupo M - G. Vista a 3 hilos.

Incorporación en el montaje General del banco de pruebas.

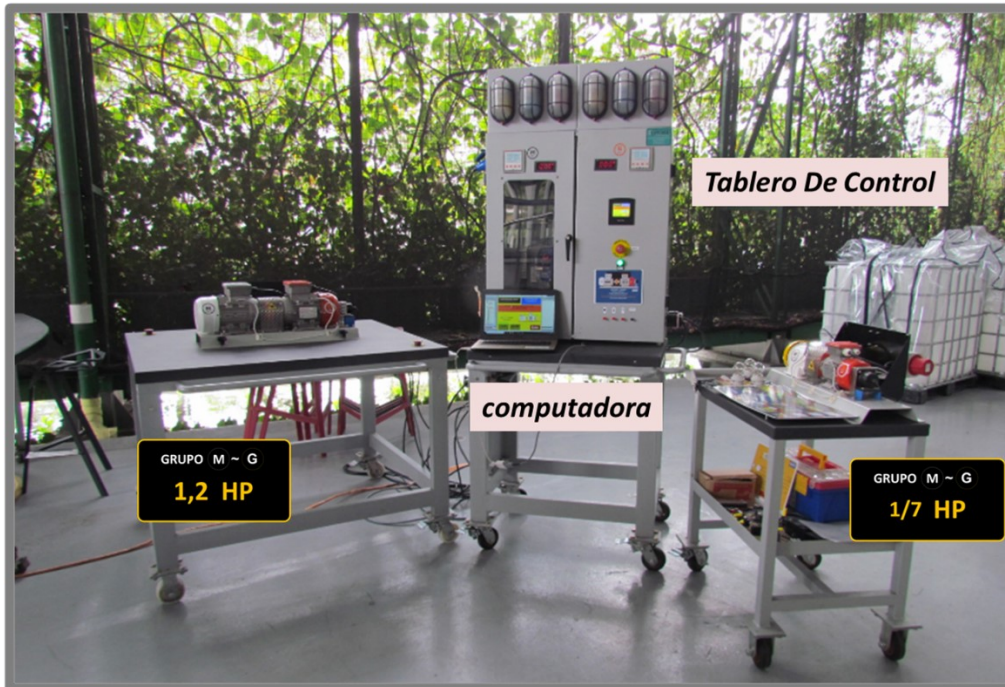


Figura 7.8. Vista de la incorporación en el montaje general del banco de pruebas.

Registro fotográfico de un Grupo Motor – Generador.

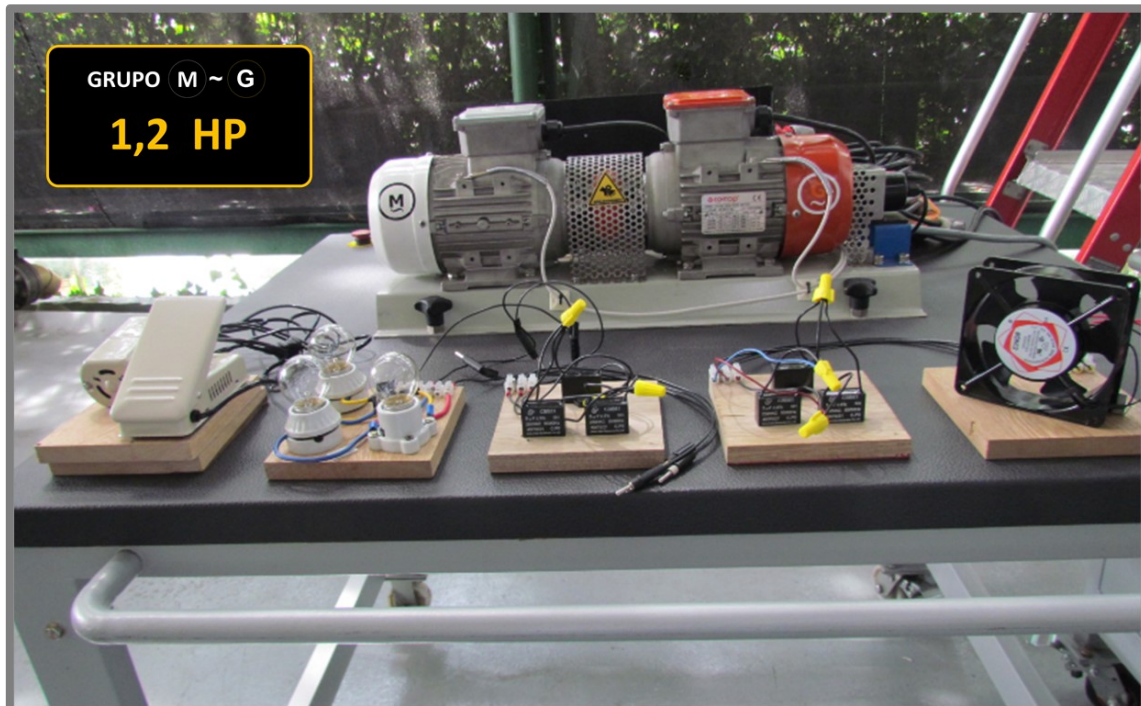


Figura 7.9. Vista registro fotográfico de un grupo $\text{M} - \text{G}$. Montaje final.

Registro fotográfico de los Grupos Motor – Generador que se ensamblaron en este banco de pruebas

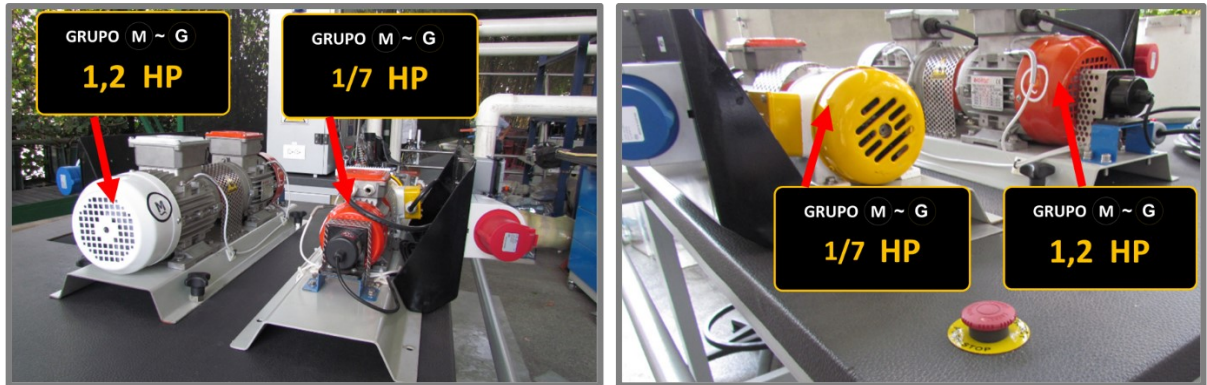


Figura 7.10. Vista registro fotográfico de un grupo $\text{M} - \text{G}$. Montaje final.

Conclusión:

El grupo $\text{M} - \text{G}$ se utiliza en este trabajo para el estudio del proceso de generación eléctrica obtenida a través de una máquina asincrónica.

Se procuró en este trabajo ensamblar dos grupos $\text{M} - \text{G}$ compactos, robustos y con buena instrumentación.

El diseño también se contempló para poder ser usado en un ambiente estudiantil con sus respectivas medidas de seguridad y concebido de tal forma que fuese simple usarlo como medio didáctico.

Capítulo 8

Cálculo de condensadores.

Objetivo específico:

Realizar el cálculo de las capacitancias requeridas para la autoexcitación del generador asincrono cuando este trabaja en solitario, es decir trabajando aparte de la red e energía local.

Saber diferenciar entre un banco trifásico de capacitancias en Δ y un banco trifásico de capacitancias en λ .

Mencionar algunas de las metodologías usadas para el cálculo de estas unidades cuando se utilizan para excitar generadores asíncronos en funcionamiento en solitario (stand alone).

Cálculos óptimos para los grupos de condensadores.

Un banco de condensadores debe suministrar energía reactiva al generador cuando este se usa en modo independiente. Ver figura 8.1.

La potencia reactiva suministrada debe ser igual o mayor que la potencia reactiva que normalmente consume la máquina cuando funciona como motor.

Es decir, siempre se requiere de una fuente de corriente de excitación para obtener el flujo de magnetización (potencia reactiva) para el estator, para inducir la corriente del rotor.

Esto puede suministrarse desde la red eléctrica o, una vez que se comienza a producir energía, desde el propio generador.

El modo de generación para los motores de inducción se complica por la necesidad de excitar el rotor, que comienza con solo la magnetización residual. Solo en algunos casos, esa magnetización residual es suficiente para auto excitar el motor bajo carga. De lo contrario, es necesario ajustar el motor y conectarlo momentáneamente a una red activa o agregar condensadores, cargados inicialmente por magnetismo residual y proporcionar la potencia reactiva requerida durante la operación.

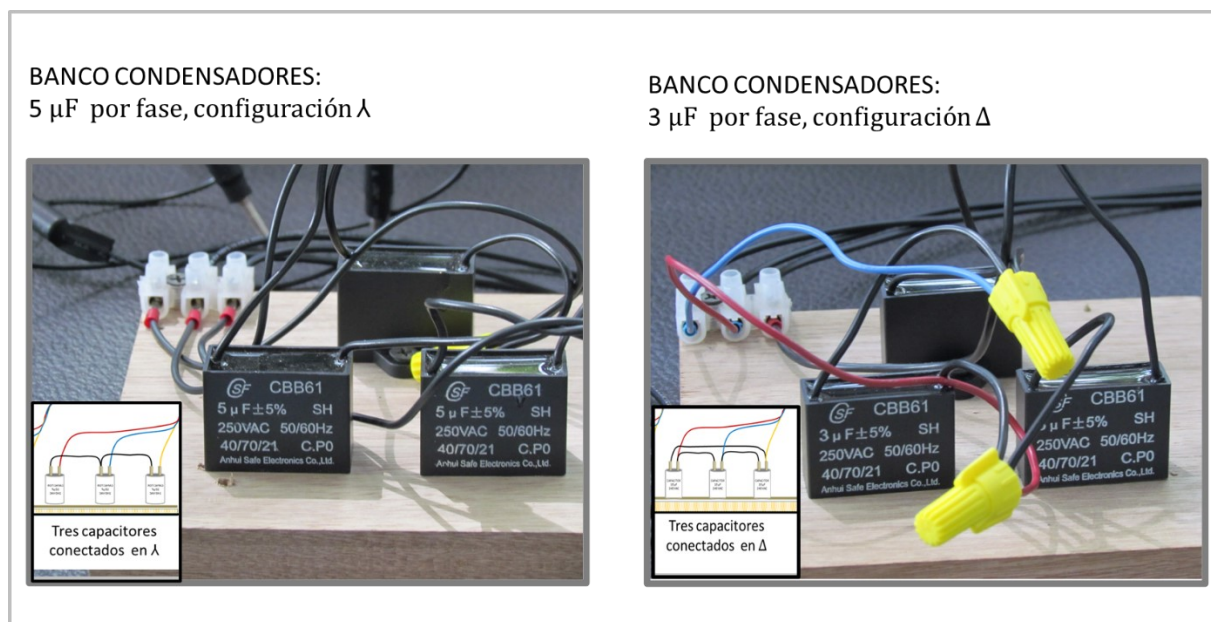


Figura 8.1. Vista de grupos trifásicos de condensadores de excitación en paralelo en configuración en λ y en Δ

Similar es el funcionamiento del motor de inducción en paralelo con un motor síncrono que sirve como compensador del factor de potencia. Una característica en el modo generador en paralelo a la red es que la velocidad del rotor es más alta que en el modo de conducción. Entonces, se está dando energía activa a la red. Otra desventaja del generador de motor de inducción es que consume una corriente de magnetización significativa $I_{mag} = (20-35)\%$.

También es posible iniciar una máquina de inducción cargando los condensadores, con una fuente de Corriente Continua (CC), mientras el generador gira típicamente a velocidades de generación o superiores. Una vez que se elimina la fuente de CC, los condensadores proporcionarán la corriente de magnetización requerida para comenzar a producir voltaje.

Una máquina de inducción que ha estado funcionando recientemente también puede producir espontáneamente voltaje y corriente debido al magnetismo residual que queda en el núcleo.

El análisis anterior indica que la máquina asíncrona en régimen de generador exige el suministro externo de potencia reactiva capacitiva para su excitación.

Esta puede ser suministrada, bien sea con un banco de condensadores y/o por la red de suministro de energía eléctrica.

Determinar el valor de la potencia reactiva capacitiva o del condensador de excitación, es un factor importante en este proceso. Este se puede calcular por métodos desarrollados y validados analíticamente y/o experimentalmente por diferentes escuelas e investigadores.

Estos métodos, en función de la información necesaria de la máquina asincrónica y de la carga, al igual que de los procesos matemáticos requeridos, se pueden considerar como sencillos o complejos

Los **métodos más relevantes** se dividen en dos grupos: Métodos Directos y Métodos Analíticos.

Método Directo:

Método directo experimental

Este método exige a la vez la conexión mecánica del generador asíncrono a un primo motor de velocidad variable y la conexión a la red.

Apoyados en este montaje, se procede a llevar el motor hasta una velocidad cercana a la nominal; instante en el que se conecta a la red como motor.

Una vez se tiene esta condición, se procede a aumentar progresivamente la velocidad en el primo motor hasta llevar el motor a la condición de generador asíncrono (velocidad mayor a la nominal) .

Al seguir aumentando la velocidad en el primo motor, consecuentemente aumenta el deslizamiento en el generador, al igual que la potencia activa entregada a la red.

Este proceso exige un consumo proporcional de reactivos, que son suministrados por la red y registrados por el equipo de medida.

Con esto reactivos registrados se procede a derivar de allí las capacitancias requeridas para el sistema trifásico.

Método Directo:

Método mediante la Conexión a una fuente externa de reactivos . Conexión a un banco de condensadores de los del tipo trifásico.

Un método similar al anterior, consiste en realizar la conexión mecánica del generador asíncrono a un primo motor de velocidad variable; sin embargo, este no se conecta eléctricamente a la red, y, por tanto, es necesaria la conexión a un banco de condensadores variable y a una carga eléctrica externa.

El montaje y el procedimiento es similar al descrito en el método anterior; no obstante, la condición de estar aislado exige la “ *excitación independiente* ” del banco de condensadores, es decir estos deben estar cargados y con carga cercana al valor nominal.

Método mediante el uso de los Parámetros nominales del motor.

Este es un método bastante sencillo, cuyo funcionamiento radica en utilizar los parámetros nominales de placa del motor, a través de los cuales se infiere la potencia reactiva absorbida por el motor en condiciones nominales.

Con base en esta información, se determina el capacitor por fase que requiere la maquina asíncrona en modo reversible o en modo generador.

Igual que en el caso anterior los condensadores deben cargarse previamente para contribuir a la excitación del rotor.

Métodos analíticos:

A. Método analítico para el cálculo de capacitores de autoexcitación.

Este método corresponde al desarrollado por los investigadores: Murty, Nagamani y Satyanarayana (en 1988) quienes determinan el valor de los capacitores de

autoexcitación, basándose en el circuito equivalente en estado estacionario de un generador de inducción auto excitado, con una carga en sus terminales (como se indica en la siguiente figura 8.2).

Para determinar el valor del condensador de excitación, los investigadores en su análisis llegan a dos ecuaciones lineales simultáneas, en las cuales X_c (reactancia capacitiva) y F (frecuencia) son las variables desconocidas.

Requiere iteraciones Newton Raphson.

Con esto:

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c}$$

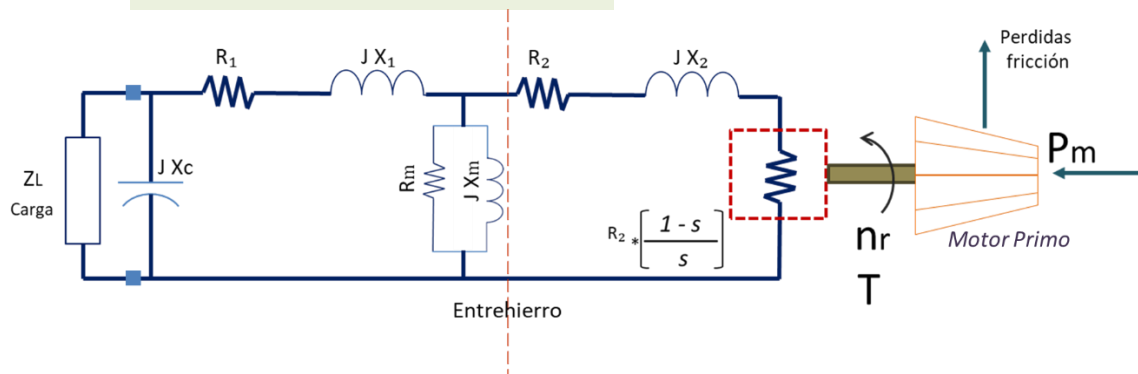


Figura 8.2. Vista del circuito equivalente de la máquina asíncrona en su modo de Generador ©. Vista de una sola fase.

Métodos analíticos:

B. Método analítico para el cálculo de capacitores de autoexcitación, según los autores Al Jabri y Alolah (en 1990).

En esta sección se propone un método para determinar el capacitor mínimo C_{min} para una carga RL .

Por la forma como Al Jabri y Alolah abordaron el problema la solución matemática se caracteriza por no exigir el manejo de métodos numéricos para el cálculo del banco de capacitores necesarios para la autoexcitación, ya que se usan expresiones exactas para cada caso:

Operación en vacío, carga resistiva e inductiva.

El método en extenso se presenta en un artículo de los autores antes mencionados.

C. Método analítico para el cálculo de capacitores de autoexcitación, según los autores Kumar, Kumaresan y Karthigaivel (en 2010).

Este método también utiliza como información base el circuito equivalente de la máquina de inducción. Ver figura 8.2.

El método es extenso y se expone en el artículo de los autores antes referidos.

Otros metodos se pueden encontrar en la siguiente referencia bibliografica: Ver figura 8.3

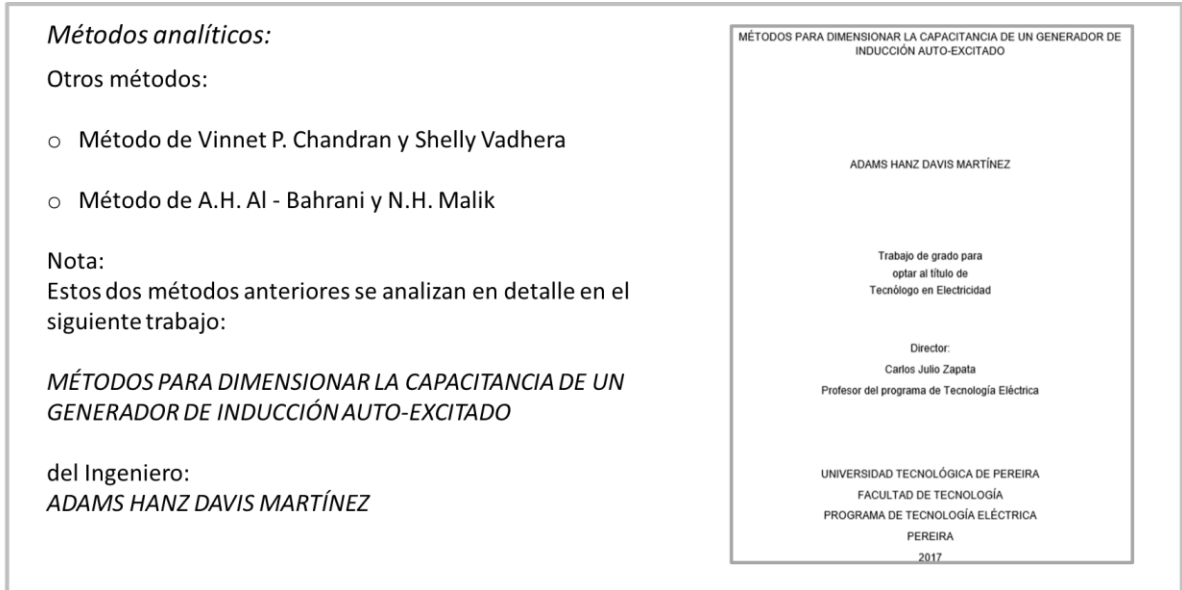


Figura 8.3. Vista de trabajo de grado en donde se explican de una forma detallada los métodos para dimensionar la capacitancia de un Generador © asíncrono de inducción auto excitado.

Utilizaremos el método directo en el que se realiza el cálculo mediante el uso de los Parámetros nominales del motor.

A continuación mostraremos 4 ejemplos relacionados con el banco de trabajo físico en el que se apoya este trabajo.

Los cálculos también se encuentran en tablas de Excel adjuntas. Ver figuras desde la 8.4 hasta la 8.11 en donde se muestra un detalle de estos cálculos.

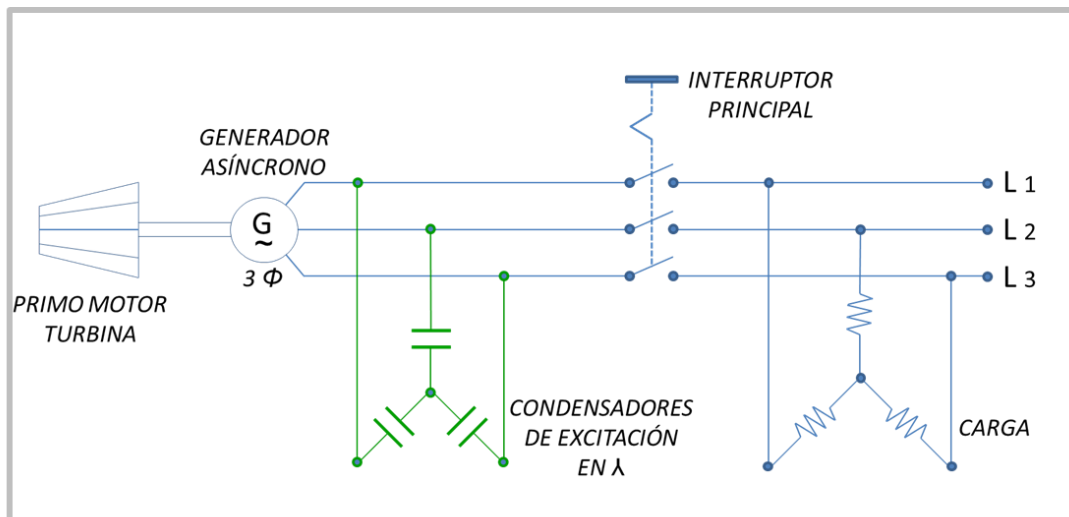


Figura 8.4. Vista del diagrama a tres hilos de los condensadores de excitación en Δ en paralelo a los bornes del Generador ©. Se observa también la carga resistiva trifásica conectada en bornes del Generador a través de un interruptor .

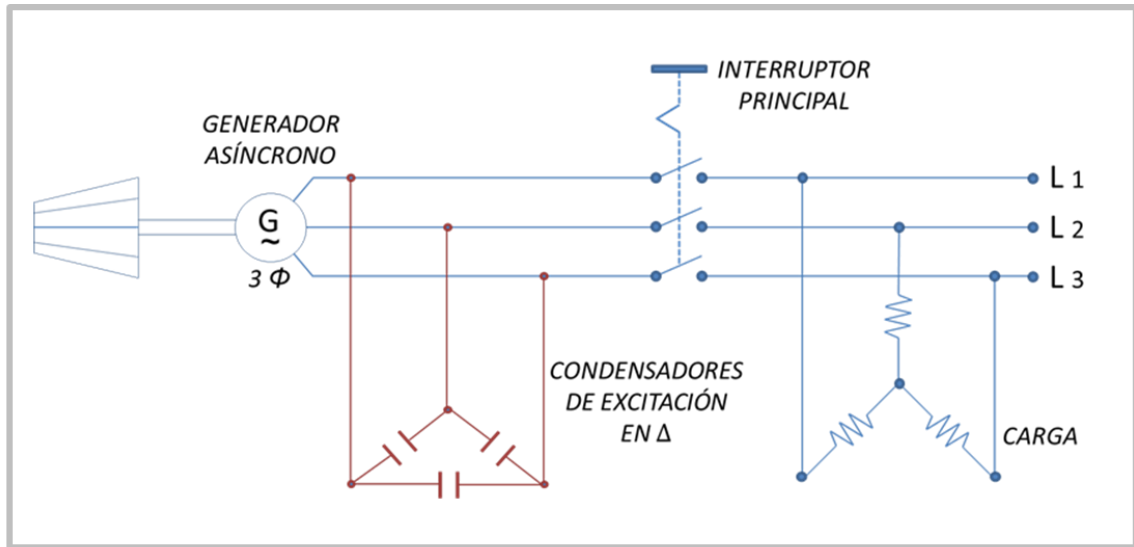
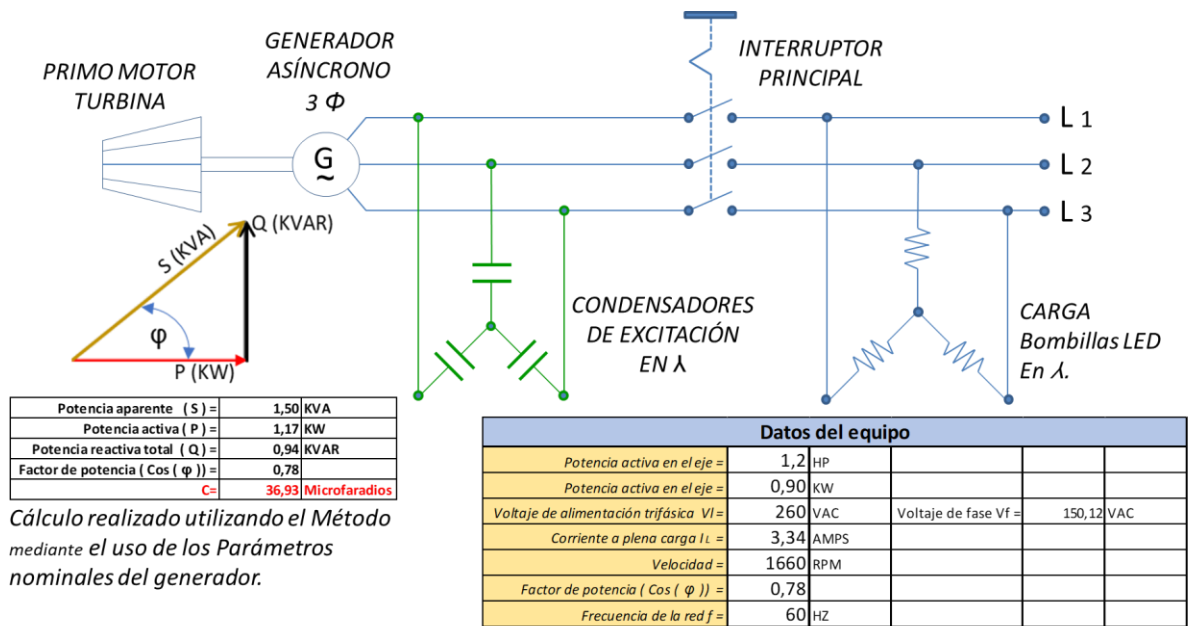


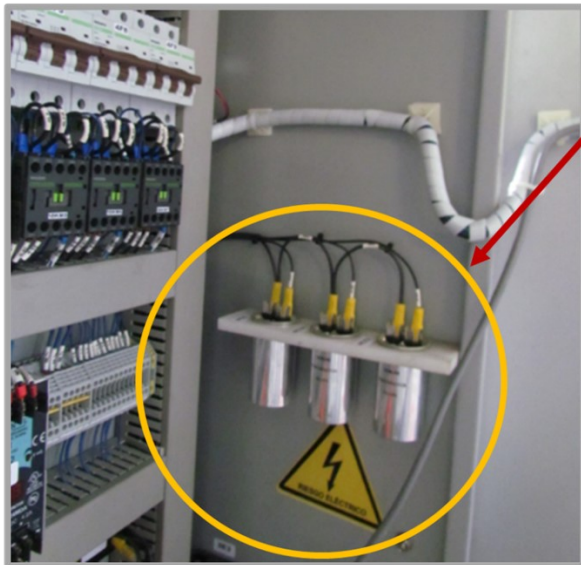
Figura 8.5. Vista del diagrama a tres hilos de los condensadores de excitación en Δ en paralelo a los bornes del Generador ©. Se observa también la carga resistiva trifásica conectada en bornes del Generador a través de un interruptor.



Cálculo realizado utilizando el Método mediante el uso de los Parámetros nominales del generador.

Figura 8.6. Vista del diagrama a tres hilos de los condensadores de excitación en λ en paralelo a los bornes del Generador © de 1,2 HP de potencia activa nominal. Se observa también la carga resistiva trifásica conectada en bornes del Generador a través de un interruptor. Ver capítulo 8 al respecto.

**Banco de condensadores en λ para autoexcitación
Grupo M – G 1,2 HP**



Tres condensadores de 20 μ F cada uno. Configuración λ

Calculados para el banco de trabajo de 1,2 HP en los que se apoya este trabajo.

Se encuentran ubicados en el gabinete eléctrico principal de este trabajo.

Figura 8.7. Vista de uno de los grupos de capacitores que posee el banco de trabajo. Se trata de un grupo de capacitores de 20 μ f cada uno conectados formando un sistema trifásico en configuración en λ

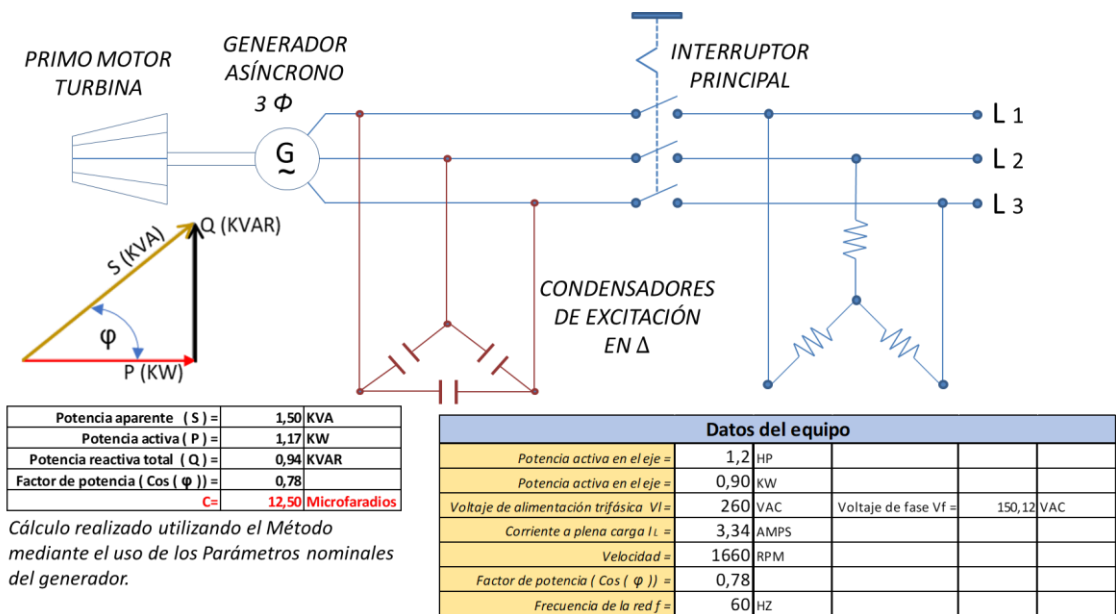


Figura 8.8. Vista del diagrama a tres hilos de los condensadores de excitación en Δ en paralelo a los bornes del Generador G de 1,2 HP de potencia activa nominal. Se observa también la carga resistiva trifásica conectada en bornes del Generador a través de un interruptor. Ver capítulo 8 al respecto.

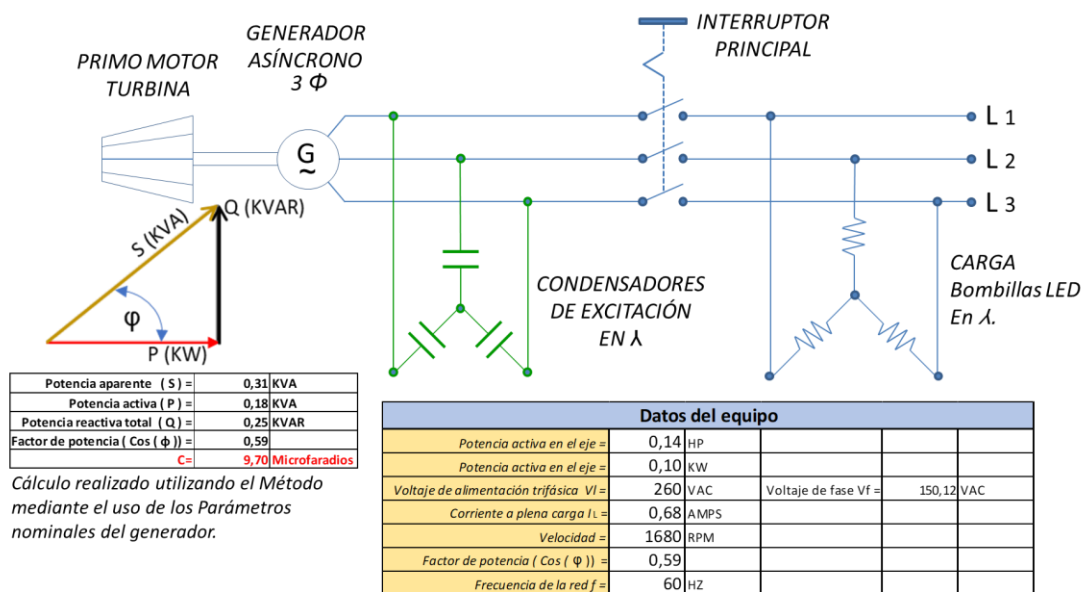


Figura 8.9. Vista del diagrama a tres hilos de los condensadores de excitación en λ en paralelo a los bornes del Generador © de 0,14 HP de potencia activa nominal. Se observa también la carga resistiva trifásica conectada en bornes del Generador a través de un interruptor. Ver capítulo 8 al respecto.

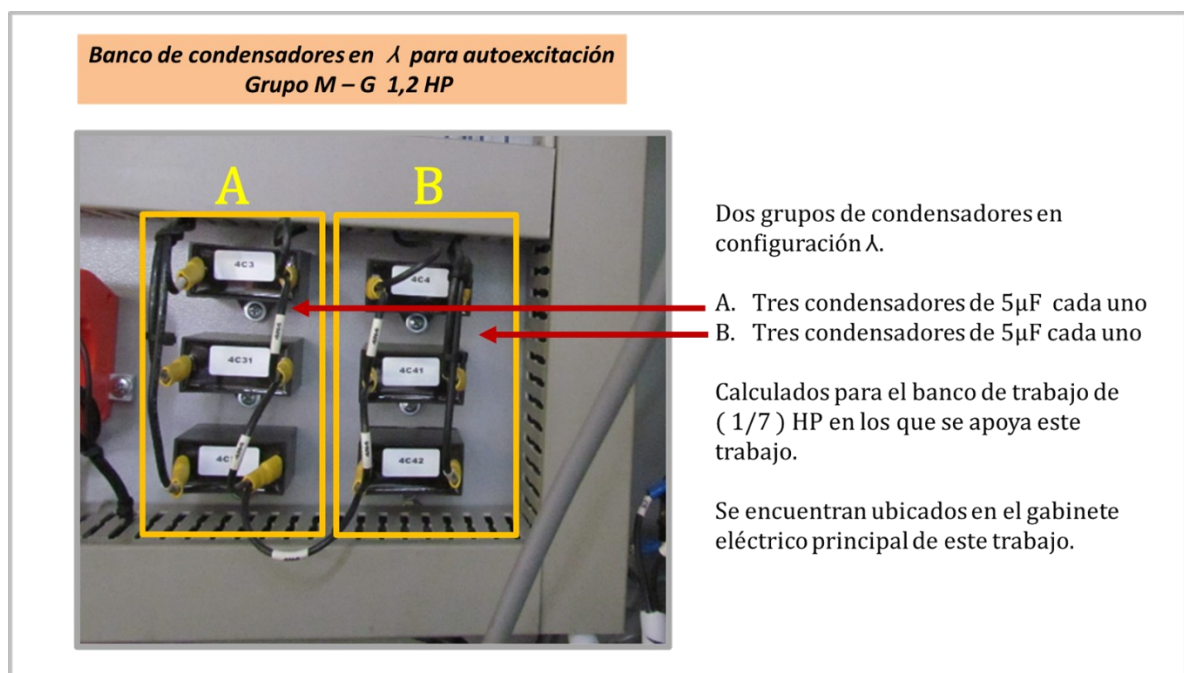


Figura 8.10. Vista de dos de los grupos de capacitores que posee el banco de trabajo. Se trata de dos grupos de capacitores de $5\mu\text{F}$ cada uno. Cada grupo se encuentra conectado formando un sistema trifásico en configuración en λ .

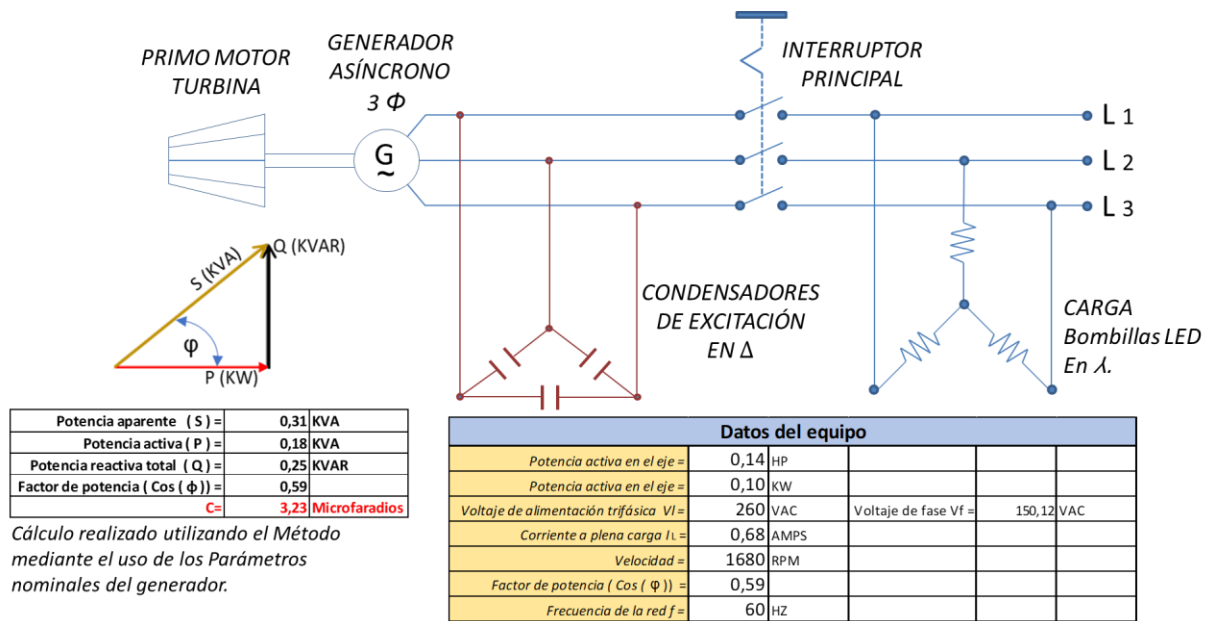


Figura 8.11. Vista del diagrama a tres hilos de los condensadores de excitación en Δ en paralelo a los bornes del Generador © de 0,14 HP de potencia activa nominal. Se observa también la carga resistiva trifásica conectada en bornes del Generador a través de un interruptor. Ver capítulo 8 al respecto.

Conclusión:

El método utilizado en este trabajo es el más sencillo, pero ha resultado ser muy efectivo desde el inicio con el prototipo y en otros trabajos consultados. Se utilizó el método directo en el que se realiza el cálculo mediante el uso de los Parámetros nominales del motor.

Cabe anotar que la configuración utilizada será determinante en el nivel de voltaje entregado por el generador. La configuración en Δ paralelo ocasiona que la salida de voltaje sea más alta que la configuración λ paralelo. Esto es importante considerarlo cuando se realiza el diseño del control del voltaje de salida del generador ante variaciones en la carga y ante variaciones en la velocidad del motor Primo.

Como experiencia durante el desarrollo de este trabajo observo que es importante comenzar con un cálculo de capacitores en λ paralelo, con un voltaje de salida no muy alto y estudiar con él variaciones en la carga y variaciones en el VDF del motor primo. Ya luego es bueno tratar con un banco en Δ paralelo y observar que ocurre cuando se realizan variaciones en la carga y variaciones de frecuencia con el VDF. El banco actual explora varios aspectos con la configuración en λ paralelo mediante un cuadro PID que regula el voltaje de salida realizando variaciones al Motor Primo en su frecuencia eléctrica.

Observamos también que el valor de la capacitancia debe igual o superior (moderadamente) al valor calculado ya que valores menores hacen inestable a la máquina con variaciones en la carga de muy bajo valor.

Capítulo 9

Funcionamiento General del Equipo

Objetivo específico:

El objetivo de este capítulo es mostrar la secuencia operativa del equipo partiendo desde su forma adecuada de conexión hasta llegar al momento en donde se observa la máquina asincrónica funcionando en su modo Generador. También busca que su correcta utilización prolongue la vida del equipo y muestre también sus posibles errores (con miras a corregirlos) y también revele sus posibles averías antes de que estas se conviertan en daños reales.

A continuación observaremos los detalles de la puesta en operación del equipo.

Secuencia operativa del equipo.

Actividad de *Preencendido*.

1. Retirar el forro plástico de la mesa principal en donde va el grupo (M)-(G) a estudiar. Ver figura 9.1.
2. Retirar el forro plástico de la mesa del tablero de control.

Comentarios:

Importante limpiar los forros con un trapo ligeramente húmedo para retirarles la energía estática acumulada.

Revise que estos forros no estén deteriorados ni rotos.

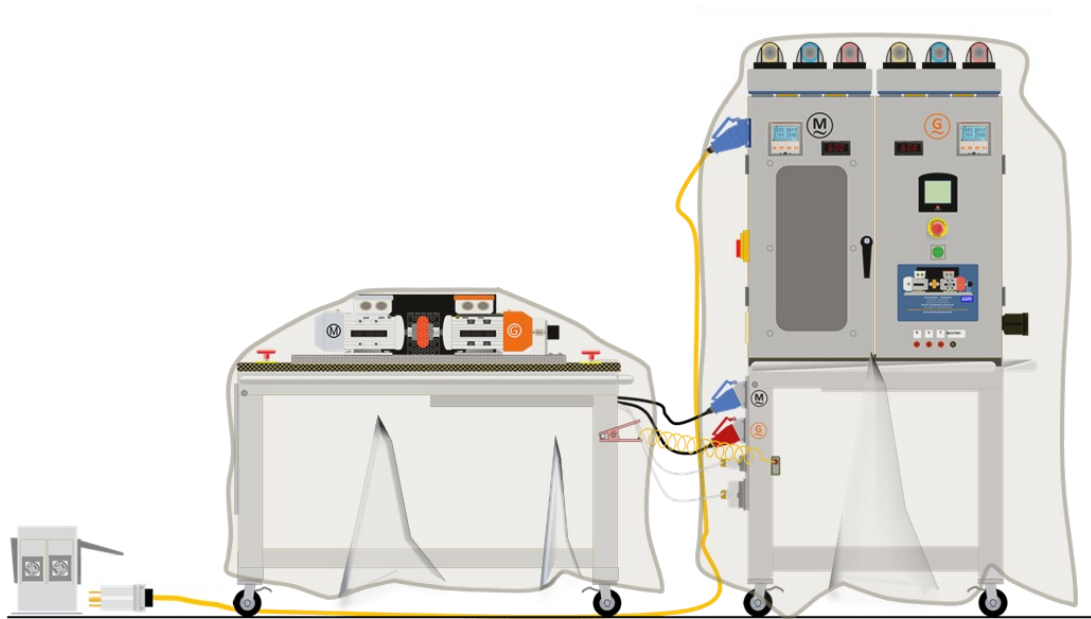


Figura 9.1. Cubierta plástica protectora del banco de trabajo para cuando este no está en uso.

3. Limpiar con un trapo seco y limpio el equipo. Ver figura 9.2.
Esto para quitar el polvo acumulado y observar el estado del equipo.

Comentarios

Reporte anomalías encontradas tales como abolladuras, golpes, piezas sueltas, bombillos averiados, etc.



Figura 9.2. Limpieza del equipo previo a su uso.

Conecte la pinza de equipotencialidad entre las dos mesas: La de los motores y la del tablero de control. Ver figura 9.3.

Comentarios

Revise el estado de la pinza y conecte la pinza en uno de los tornillos de la mesa de los motores destinados para tal fin.

La conexión de la pinza en este tipo de equipos garantiza un sistema de puesta a tierra común entre las dos mesas. Esto hace que las protecciones y la toma de datos sea más confiable y segura.

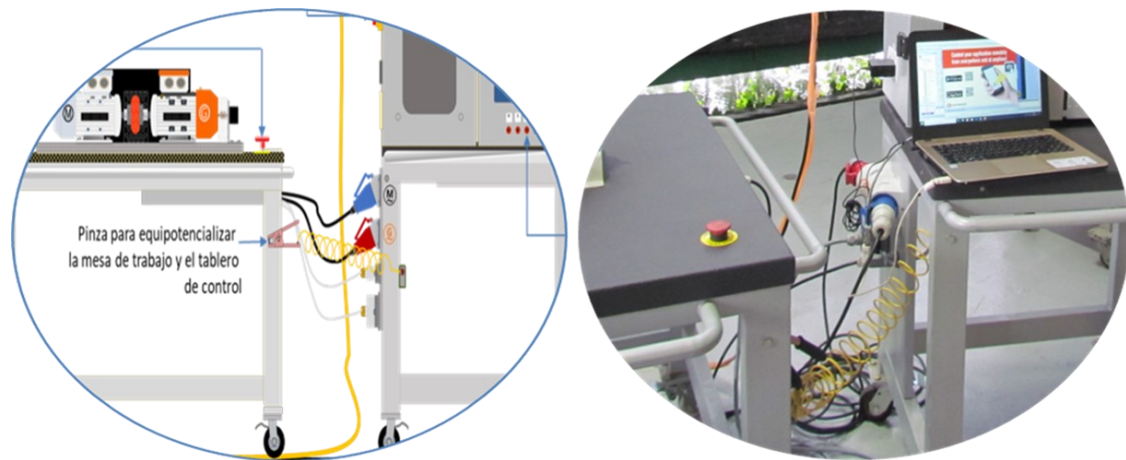


Figura 9.3. Conecte la pinza de equipotencialidad entre las mesas.

4. Escoja el grupo M-G con el cual trabajará. Refiérase a la guía de trabajo del Laboratorio.

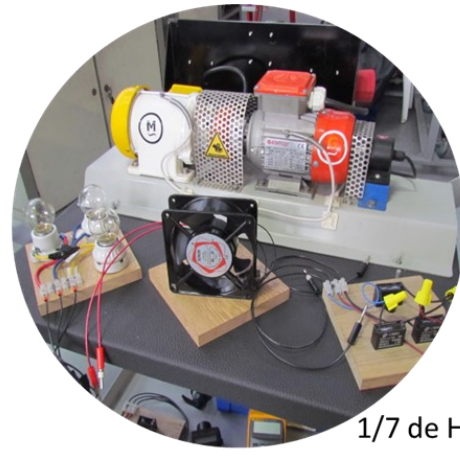
Comentarios

Hay dos grupos M-G que se planearon para este equipo. Ver figura 9.4.

- Grupo M-G de 1/7 de HP.
- Grupo M-G de 1,2 HP



1,2 HP



1/7 de HP

Figura 9.4. Grupos Motor - Generador $\text{M} - \text{G}$

El equipo posee dos grupos.

- *Un Grupo $\text{M} - \text{G}$ de 1.2 HP.*
- *Un Grupo $\text{M} - \text{G}$ de 1/7 HP.*

5. Coloque el Grupo $\text{M}-\text{G}$ escogido sobre la mesa principal del equipo y asegúrelo con las chapolas que trae la mesa. Ver figura 9.5.
Revise que la mesa quede bien nivelada.
Realice también la inspección de nivel para la mesa de control.

Comentarios

Inspeccione anomalías visuales tales como partes sueltas, falta de chapolas, problemas con las ruedas de las mesas, etc.



Figura 9.5. Colocar sobre la mesa el Grupos Motor - Generador $\text{M} - \text{G}$ que se vaya a estudiar. Asegure de que quede bien situado ayudándose de los pines guías para ubicar el equipo que hay sobre la mesa.

6. Revise el acople Omega que une los dos motores. Retire la guarda que cubre el acople Omega y gire suavemente con la mano el acople. Ver figura 9.6. Coloque nuevamente la guarda y asegúrela.

Comentarios

Verifique que gire suave y que no presenta atascamiento.

Observe que no se presenten piezas sueltas y que no se escuchen ruidos extraños.

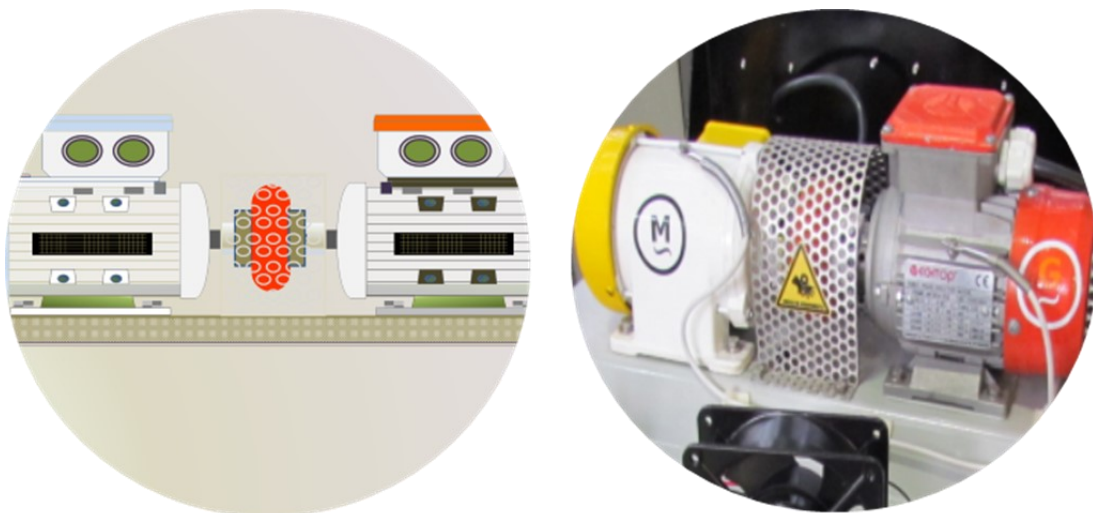


Figura 9.6. Acople Omega que une mecánicamente las dos máquinas asíncronas. Formado el grupo $\text{M} - \text{G}$.

7. Verifique que el Encoder asociado al Generador se encuentre bien asegurado y no presente partes sueltas. Ver figura 9.7.

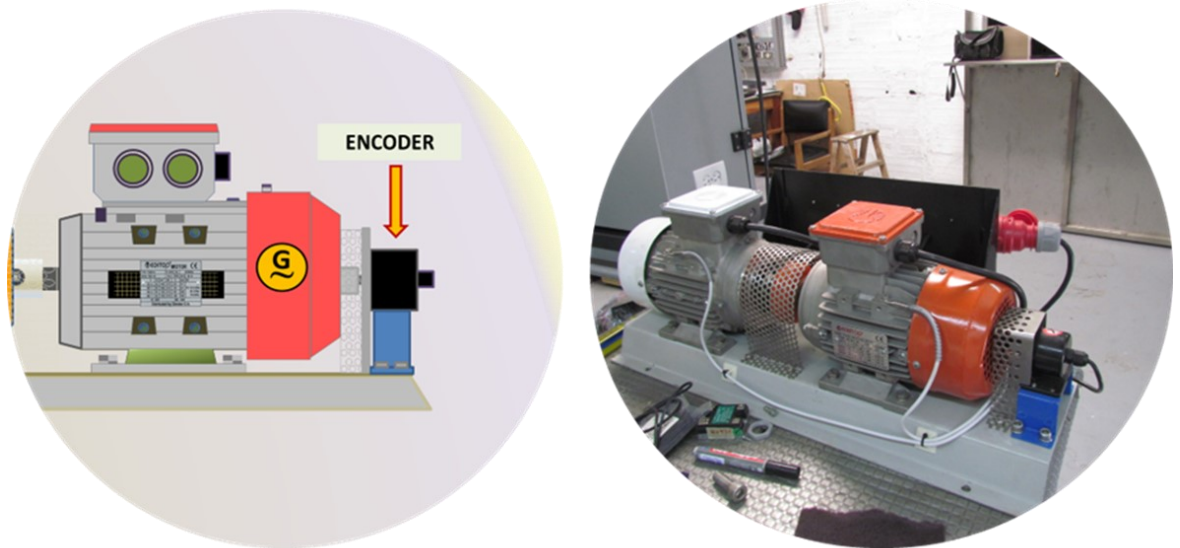


Figura 9.7. *Ubicación del Encoder en el grupo $\text{M} - \text{G}$
Realizar una inspección visual buscando que todo los
elementos se encuentren bien sujetos y sin roturas.*

Comentarios

Reporte anomalías.

Recuerde revisar que el cableado no se encuentre averiado.

8. Revise las clavijas de seguridad ubicadas en la placa cercana al Grupo $\text{M} - \text{G}$.
Ver figura 9.8.

Clavija azul: Para el Motor.

Clavija rojo: para el Generador.

Revise el toma industrial de múltiples señales de color gris que se encuentra ubicado entre los dos tomas industriales de potencia de sobreponer de la mesa de trabajo.
Revise el toma de señales de paro de emergencia ubicado en uno de los lados laterales de la mesa del grupo $\text{M} - \text{G}$ de estudio. Ver capítulo 3 Seguridad eléctrica y ergonomía

Comentarios

Reporte anomalías.

Recuerde revisar que el cableado no se encuentre averiado.

Revise que los pines de contacto de los tomas no se encuentren sulfatados.

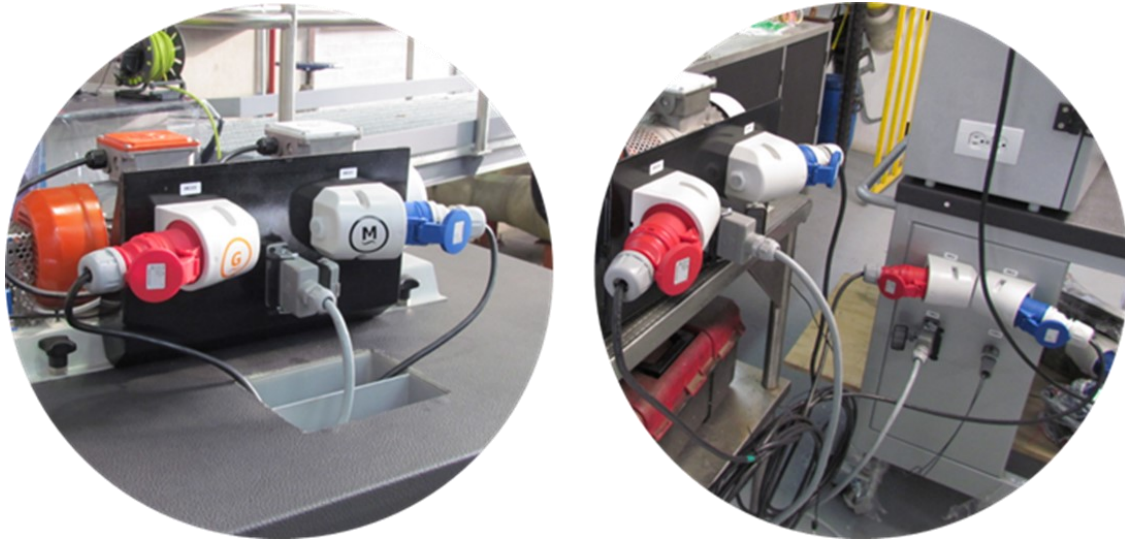


Figura 9.8. *Clavijas de potencia y control en la placa de conexiones de cada grupo M - G .
Las clavijas de potencia se identifican en color azul para el Motor M y en color rojo para el Generador G , y la clavija de control se identifica en color gris.
Revisar visualmente su correcta conexión y que no se observen partes defectuosas, cables sueltos y/o cables pelados.*

9. Conexión del cableado entre la mesa de control y la mesa del grupo M - G
Tome los cables de potencia y de control que trae el equipo, revíselos y páselos con un trapo para retirar el polvo y la energía estática acumulada.

Comentarios

Reporte anomalías.

Recuerde revisar que el cableado no se encuentre averiado.

Detalles de la conexión:

Conecte las clavijas de potencia y control entre la mesa de trabajo y el tablero de control.

El equipo comprende los siguientes elementos para la conexión: Ver figuras 9.9, 9.10 y 9.11.

- Cableado de potencia general del equipo.
- Cables de potencia y control que van entre el tablero de control y la mesa del grupo M - G . Clavijas azules van al motor. Clavijas rojas van al generador y las clavijas cuadradas color gris son la parte del cableado de control.
- Cableado con clavijas cuadradas pequeñas van al sistema de paradas de emergencia del equipo.

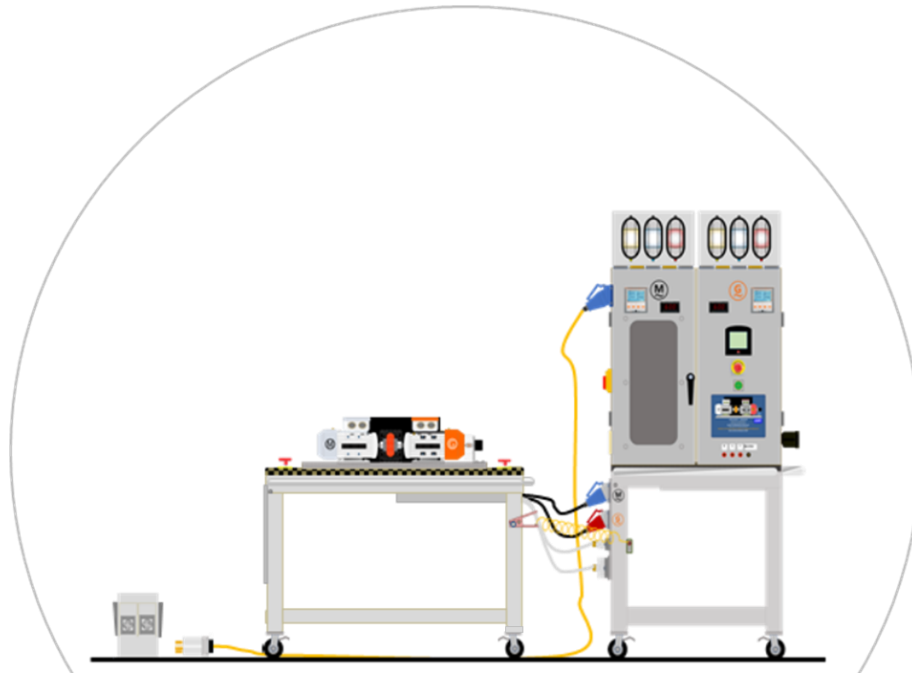


Figura 9.9. Clavijas de potencia y control en la placa de conexiones de cada grupo M - G . Las clavijas de potencia se identifican en color azul para el Motor M y en color rojo para el Generador G , y la clavija de control se identifica en color gris. Se observa además la extensión de la acometida general del equipo en color amarillo. Esta usa una clavija industrial para conexión al tablero de control y una clavija de seguridad de giro para la conexión a la toma del laboratorio. Revisar visualmente su correcta conexión y que no se observen partes defectuosas, cables sueltos y/o cables pelados.

Hay un cable de potencia adicional. El cable de la conexión general del equipo es un cable con clavija azul en un lado (que va al tablero de control de la maquina) y en el otro lado tiene una clavija de las del tipo LEVITON de Media vuelta 3P-4H para 30AMP, adecuada para conectar todo el sistema al sistema eléctrico del laboratorio de hidráulica. Ver figuras 9.9, 9.10 y 9.11.

Comentarios

Recuerde también no enredar este cableado. Importante colocar las mesas de tal forma que sea fácil ejecutar la conexión y que el cable de acometida alcance hasta una de los tomas del laboratorio de hidráulica.

Procure que no quede sobre las vías de transito de las personas.

EL CABLE DE POTENCIA GENERAL DEL EQUIPO SE CONECTARÁ AL FINAL DEL PROCESO DE PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO.

**Cableado de potencia , control y pinza de equipotencialidad entre la mesa de control y la mesa de trabajo.
Vista A**

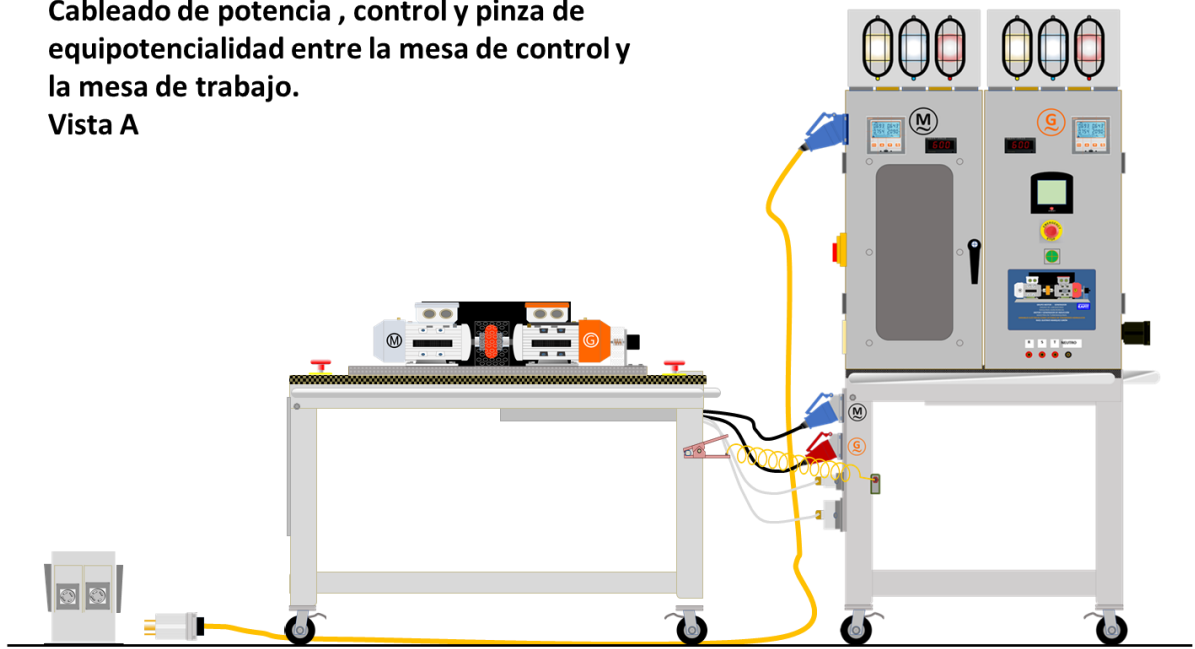


Figura 9.10. Cableado de potencia, de control y vista de la conexión de la pinza de equipotencialidad. Estas conexiones se realizan entre la mesa de trabajo y el tablero de control del equipo.

Se observa la conexión con la vista frontal del tablero de control.

**Cableado de potencia , control y pinza de equipotencialidad entre la mesa de control y la mesa de trabajo.
Vista B**

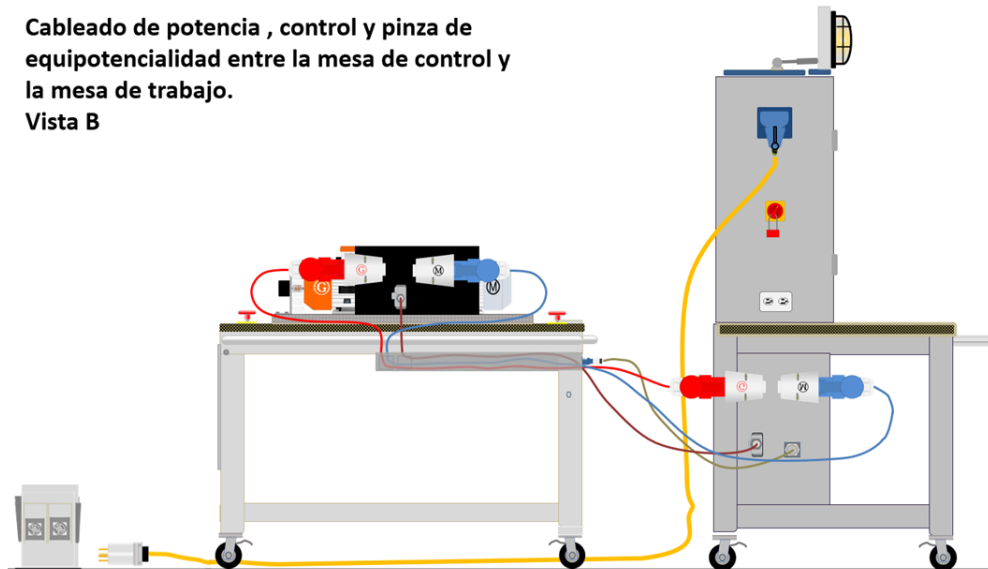


Figura 9.11. Cableado de potencia, de control y vista de la conexión de la pinza de equipotencialidad. Estas conexiones se realizan entre la mesa de trabajo y el tablero de control del equipo.

Se observa la conexión en la vista lateral del tablero de control.

10. Es muy importante que el equipo tenga una buena visual entre la parte frontal de tablero de control y la mesa del grupo (M)-G. Ver figura 9.12.

Comentarios

Procuré colocar el equipo de tal forma que el cableado no interfiera con la circulación peatonal del salón del laboratorio de Hidráulica.



Figura 9.12. *Es muy importante que el equipo tenga una buena visual entre la parte frontal de tablero de control y la mesa del grupo (M)-G. Importante colocar la mesa de trabajo y el tablero de control de tal forma que se observe muy bien el equipo trabajando y a su vez también que se observen los datos que entregan los medidores y el PLC que se encuentran en la parte frontal del tablero de control.*

11. Conecte ahora todos los cables de potencia y control entre la mesa del grupo (M)-G y el tablero de control

Comentarios

No conecte aún el cable de potencia general del equipo.

Actividad de Encendido.

1. Conecte el el toma tipo clavija de media vuelta LEVITON al toma del laboratorio. Ver figura 9.13.

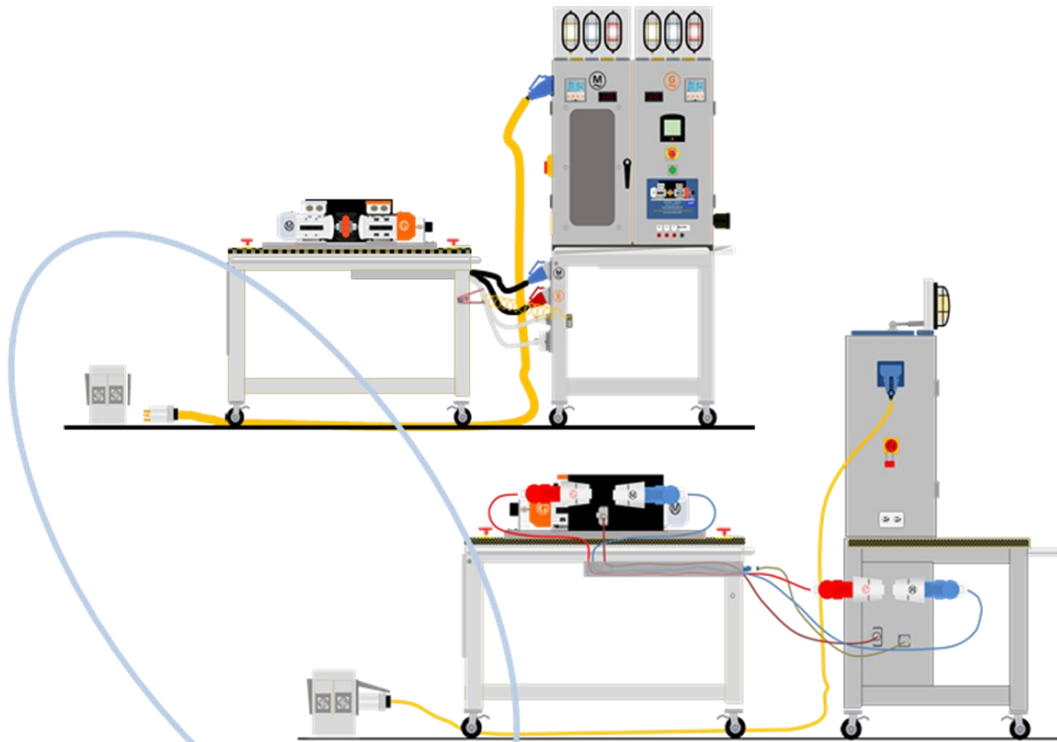


Figura 9.13. *Conexión eléctrica a la toma del laboratorio de Hidráulica.
Se trata de una conexión a una toma trifásica 230VAC + tierra, de las del tipo isla ubicada medio del salón cerca al andamio peatonal al fondo del salón.
La toma es de las del tipo trifásico con giro de seguridad.*

2. Coloque en encendido el interruptor principal del tablero, retirando el candado de seguridad y girando la manija a la posición de encendido. Ver figura 9.14.

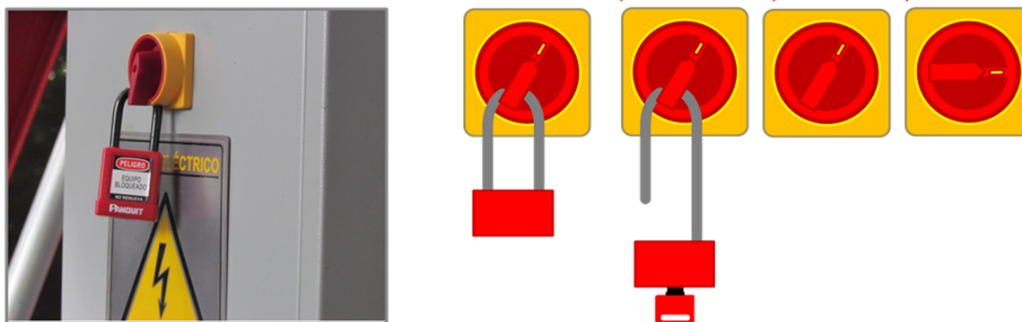


Figura 9.14. El interruptor-seccionador del tablero fue desarrollado de acuerdo con la norma IEC 60947-3/ UL 508 y posibilita las conexiones de motores, máquinas y otros equipos. Se utiliza también para accionamiento e interrupción de circuitos eléctricos bajo condiciones de carga.

Su montaje se realizó en uno de los laterales del tablero de control.

El interruptor-seccionador está fijado en el lateral izquierdo del tablero de potencia y control (parte superior) por medio de tornillos.

El seccionador-interruptor y la manija permanecen siempre acoplados.

La manija del interruptor – seccionador tiene los colores rojo y amarillo para su fácil identificación.

El interruptor-seccionador presenta la capacidad de corriente nominal igual o mayor a la corriente nominal del circuito o de la carga de todo el tablero de control y potencia.

La manija del interruptor-seccionador, está desarrollada con grado de protección IP65 y permiten el uso de hasta 3 candados, cuando está en la posición de apagado, ofreciendo seguridad durante el mantenimiento y la NO operación.

En la gráfica de la derecha se observa la apertura del candado, su desmonte y la activación del interruptor- seccionador.

3. Verifique que el piloto de encendido, la pantalla del PLC, los medidores de parámetros eléctricos de motor y generador y los frecuencímetros de motor y generador se encuentren encendidos. Ver figura 9.15.

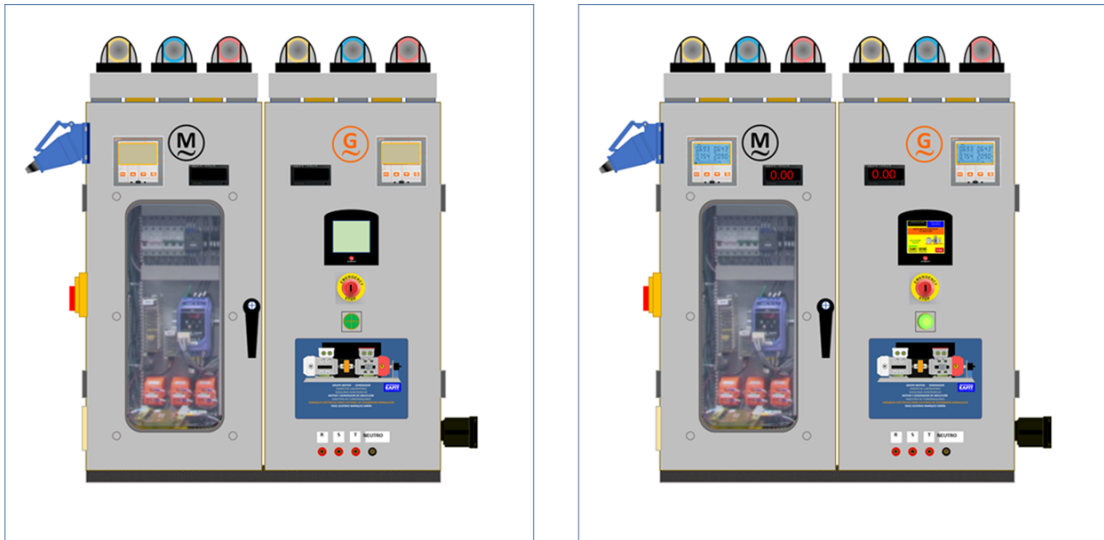


Figura 9.15. Cuando se energiza el tablero de potencia y control:

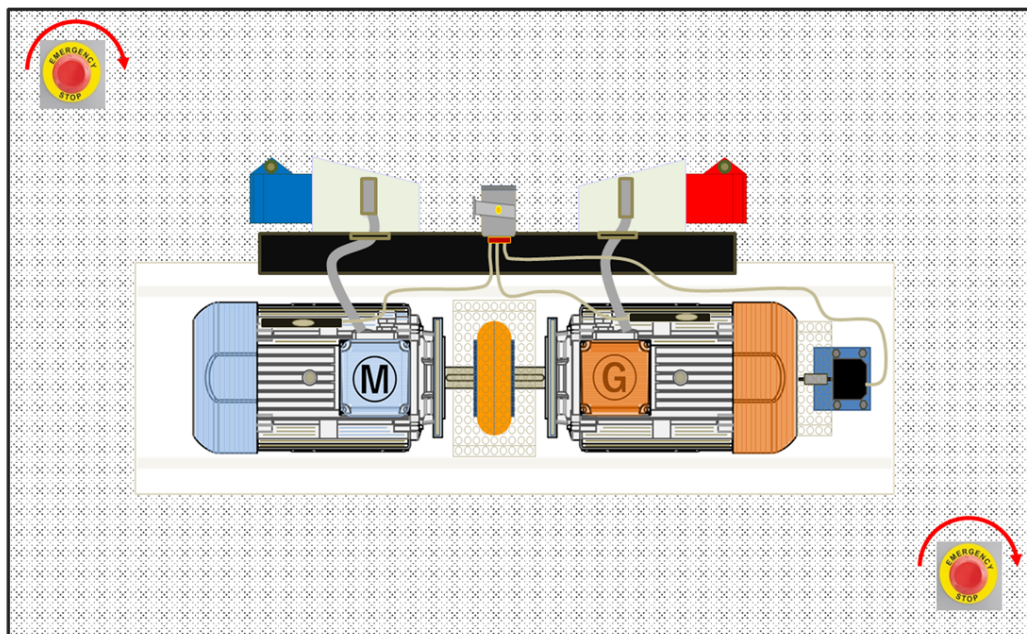
- Se energiza el bombillo piloto de indicación de Tablero energizado.
- Se energizan los medidores de variables eléctricas, tanto el del Motor (M) como el del Generador (G).
- Se energizan los frecuencímetros, tanto el del Motor (M) como el del Generador (G).
- Se enciende el PLC y muestra el pantallazo HMI Principal.

Estos equipos se encuentran ubicados en la parte frontal del tablero de potencia y control del equipo.

4. Verifique que las paradas de emergencias se encuentren liberadas así:

En la mesa de trabajo del grupo (M)- (G). Ver figura 9.16

Giro a la derecha y suelto para liberar



Giro a la derecha y suelto para liberar

Figura 9.16. Vista superior de la mesa de trabajo.

En esta mesa se ubica el grupo (M)- (G) que se va a estudiar.

Esta mesa posee dos paradas de emergencia enlazadas con la parada de emergencia ubicada en el tablero de potencia y control del equipo.

En el tablero de control se introduce la llave de la parada de emergencia, se gira a la derecha y se suelta el botón de parada de emergencia para liberar. Ver figura 9.17. Con esta acción el variador de frecuencia del motor se energiza y queda listo para recibir las señales de control.

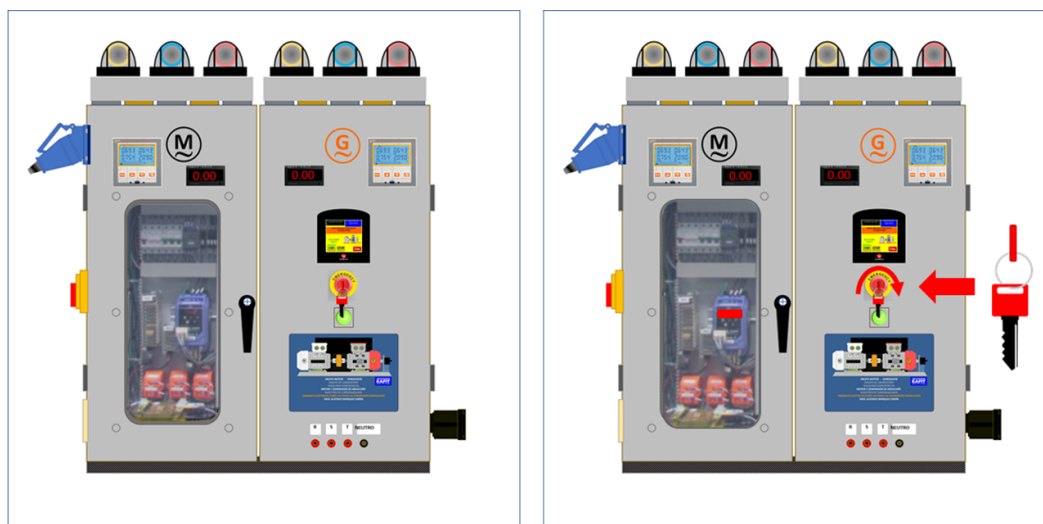


Figura 9.17. Vista de la parada de emergencia ubicada en la parte frontal del tablero de potencia y control del equipo.

Esta parada de emergencia posee una llave externa de desbloqueo. Quiere decir que se requiere de una llave externa para desbloquear la parada de emergencia la cual requirió ser bloqueada por alguna razón de falla o evento por algún evento programado.



Figura 9.18. Vista del pantallazo inicial con que arranca el PLC luego de haberse energizado el equipo.

El pantallazo Muestra el nombre de la Universidad, el tipo de maestría, el nombre del equipo, la selección del grupo M - G con que se va a trabajar y el botón de ENTER para llegar al pantallazo Principal de operación.

La figura anterior 9.18 muestra el pantallazo que aparece siempre luego de que el PLC se energiza y hace referencia a la maestría en ingeniería relacionada con el estudio del Grupo (M)-(G) de inducción la cual se realiza en la Universidad EAFIT.

Con estos pasos anteriores el equipo esta preparado para arrancar.

En el pantallazo !Start up display seleccionamos con la mano el grupo motor a utilizar. Ver figura 9.19.

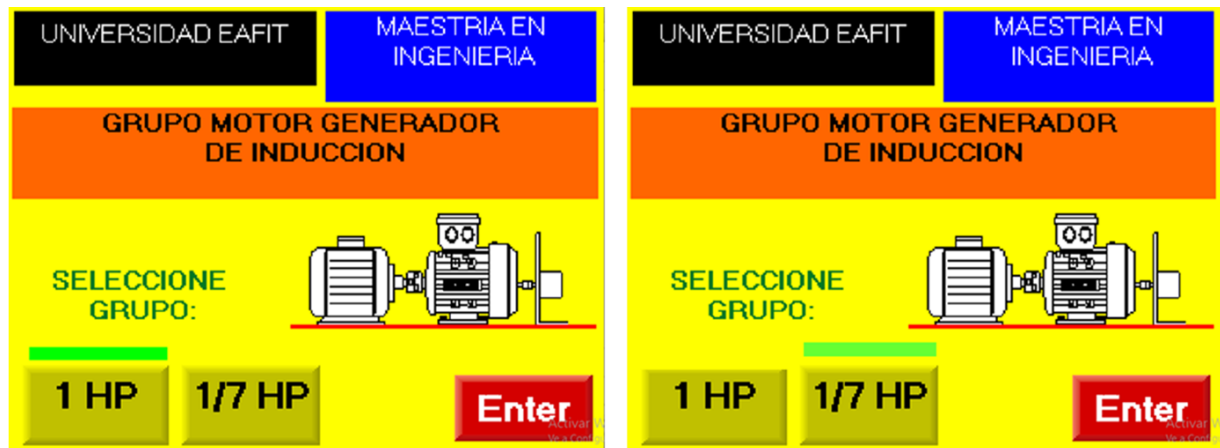


Figura 9.19. Vista del pantallazo inicial en donde se observa la selección de los grupos (M)-(G). Se observa la marca verde que señala el grupo seleccionado. La selección se hace tocando uno de los botones que muestra la pantalla y con la tecnología touch screen se selecciona el grupo deseado.

Toque con el dedo el botón correspondiente al grupo (M)-(G) con el que se desea trabajar y este quedará seleccionado con una franja verde encima del botón, tal como se muestra en la grafica.

Nota: La pantalla del PLC es con tecnología touch screen.

Con esta selección del grupo (M)-(G) realizada en esta pantalla se está realizando la siguiente selección en el PLC:

Valor de las capacitancias adecuadas por fase para cada grupo Motor Generador así:

- Grupo (M)-(G) de 1.2HP = 30µf
- Grupo (M)-(G) de 1/7 HP = 10µf

Desde esta parte del capítulo, en adelante, la operación de los grupos motor generador es similar. Luego de seleccionar el grupo motor generador en la pantalla principal se toca el botón ENTER y con esta acción vamos al siguiente pantallazo.

Inicialmente lo que buscamos es garantizar la carga completa de los condensadores de excitación del generador tal como se observa en el esquema del grupo (M)-(G) de 1/7 de HP en la siguiente figura 9.20.

Este procedimiento en el PLC se lleva a cabo en la función arranque de \textcircled{G} como \textcircled{M} la cual se encuentra en el siguiente pantallazo del HMI del PLC.

Esquema de condensadores de excitación y de cargas básicas del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} de 1/7 de HP.

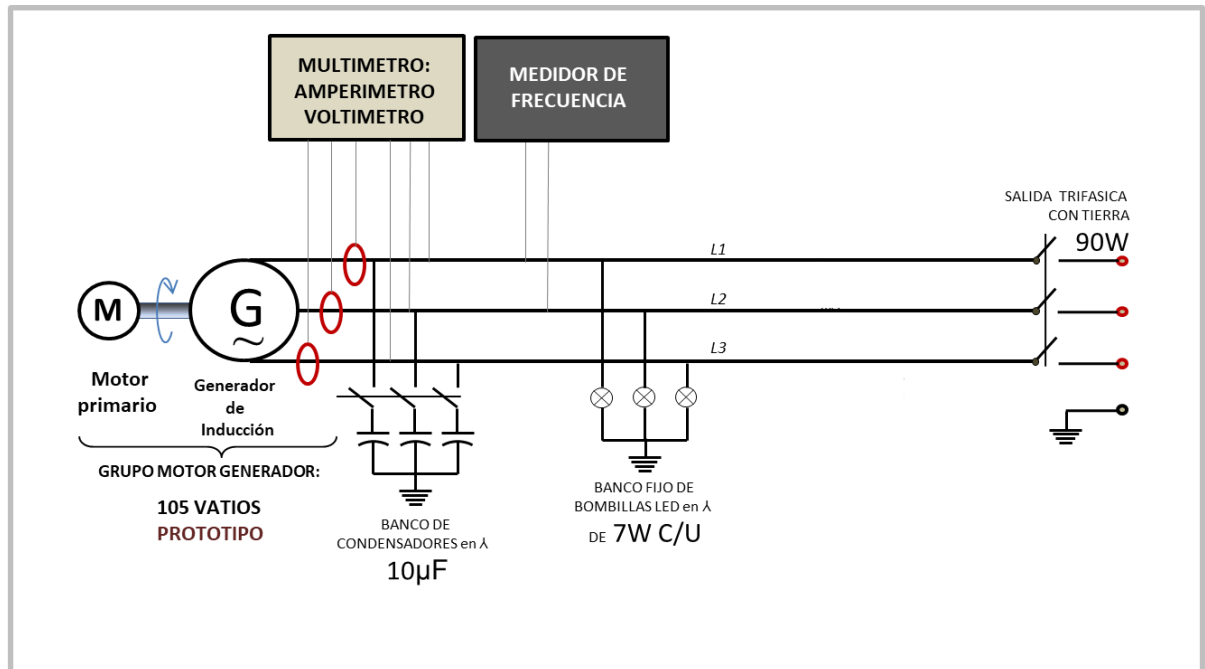


Figura 9.20. Vista del esquema eléctrico a tres hilos de la configuración básica del generador del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} de 1/7 de HP. Se observa el banco de condensadores de 10µf trifásico en configuración en Δ . Al igual se observa el grupo trifásico de bombillas en configuración en Δ . Este grupo no posee un conmutable de control ya que lo ideal es que cada vez que el generador funcione exista una carga básica que muestre el funcionamiento del mismo y además para observar la estabilidad de la generación en frecuencia y en voltaje.

El siguiente es el pantallazo Principal del HMI del PLC donde aparece la función arranque de ④ como ⑤. Ver figura 9.21.



Figura 9.21. Vista del pantallazo principal en donde se observa el arranque del sistema y otras funciones que posee el banco de trabajo. Se observa también el botón de volver al pantallazo de inicio. Todo mediante el sistema Touch Screen

Al presionar arranque de ④ como ⑤ con el dedo en el pantallazo principal llegamos al siguiente pantallazo llamado Arranque de ④ como ⑤. Ver figura 9.22.

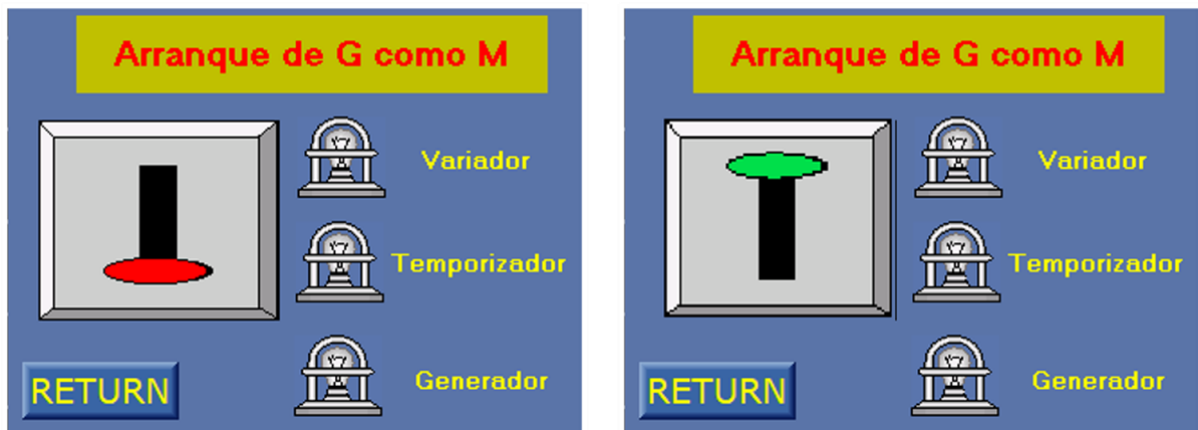


Figura 9.22. Vista del inicio del proceso de arranque del Generador como Motor. Este proceso es muy automático y solo requiere tocar el botón en la pantalla y pasarlo de rojo a verde. Posee también el botón de RETURN para regresar al pantallazo principal.

Luego deslice el dedo por el botón rojo de abajo hacia arriba y note que este pasa de rojo a verde, con esta acción se desenergiza el variador del motor (M), y esta acción se visualiza con el primer bombillo pasando a color azul.

A su vez se energiza un temporizador de espera de 6 segundos (TD 2) para arranque del generador. Ver figura 9.23.

A los 6 segundos el tercer bombillo (Generador) pasa a verde y también el contactor que acciona a (G) como (M) 18KM3. También se energizan los bancos de condensadores 18KM4 y 18KM8 y se energiza el banco de bombillas fijo en λ.

Dejamos el sistema trabajando por 5 segundos y luego deslizamos con el dedo el botón que esta en verde a la posición rojo, con esto se apagan (G) como (M), las bombillas y los condensadores los cuales ya quedaron cargados, luego se presiona el botón RETURN y con esto regresamos al pantallazo principal.

Ver figura 9.24.



Figura 9.23. Vista de la secuencia del proceso automático del arranque de (G) como (M). Se muestra el proceso desde cuando se desconecta el variador de frecuencia del motor (M) hasta llegar al encendido de (G) como (M) pasando por una temporización momentánea de 5 segundos de duración.

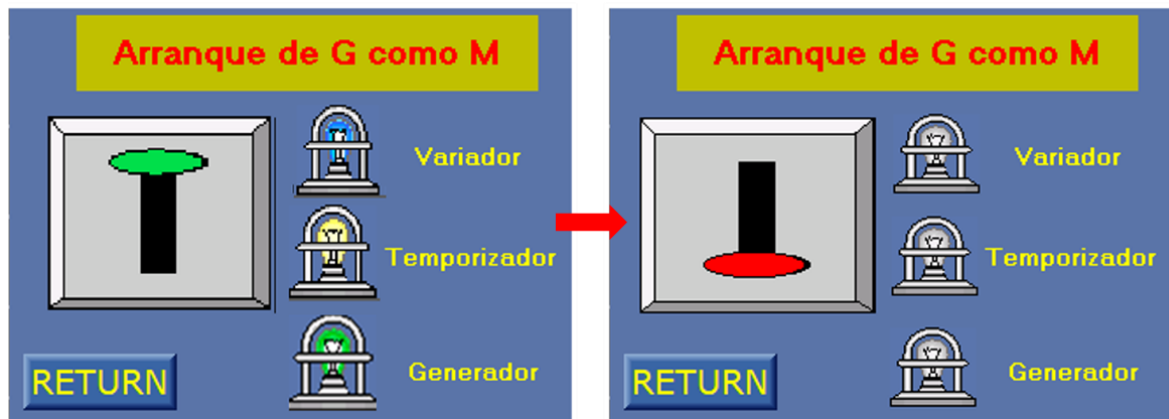


Figura 9.24. Finalización del proceso .

Una vez arrancado \textcircled{G} como \textcircled{M} este se deja en este estado durante unos pocos segundos y luego se apaga garantizando así la excitación de los devanados de la máquina, para hacer así posible el enganche de la generación con los capacitores de autoexcitación cuando este se lleva por encima de la velocidad de sincronismo n_s .

En este pantallazo hay otros botones activos:

El botón de INICIO nos lleva de nuevo al pantallazo de arranque llamado !STAR UP

Display por si es necesario cambiar de grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} .

Ahora el botón verde ARRANQUE MOTOR nos lleva al pantallazo ARRANQUE MOTOR, el cual es el siguiente que pasaremos a explicar.



Figura 9.25. Volvemos al Pantallazo Principal y tocamos el botón ARRANQUE MOTOR.

Esta acción nos lleva al Pantallazo Arranque Motor.

Allí encontramos varias etiquetas y varios botones para realizar las acciones del set point de la frecuencia del VDF de \textcircled{M} , el arranque de \textcircled{M} , la parada de \textcircled{M} y la visualización de las RPM del grupo \textcircled{G} - \textcircled{M} .

También se muestra la etiqueta de la visualización del estado de la red MODBUS y la etiqueta que muestra el valor de la frecuencia eléctrica real de \textcircled{M} dada por el VDF.



MODBUS Error Table	
Error #	Error Message
0	No errors
1	Illegal Function
2	Illegal Data Address
3	Illegal Data Value
4	Master - - Time out
5	No Communication
6	Mismatched Unit ID
7	Mismatched Command
8	Lenght of message
9	Function not supported
10	Illegal format
11	Mismatched received data

Figura 9.26. Etiqueta de señalización del estado de la red MODBUS. Cuando aparece el cero significa que las comunicaciones están correctas y que hay cero errores. Los otros errores se muestran en la lista adjunta.

El sistema para la operación de arranque y parada del equipo trabaja a través de una red MODBUS entre el PLC, el variador de frecuencia, el medidor de parámetros eléctricos del motor y el medidor de parámetros eléctricos del generador. Ver figura 9.27.

El PLC muestra en el HMI ARRANQUE MOTOR, el estado de esta red. La red se encuentra operativa siempre y cuando marque O (no hay errores) en el recuadro al frente de RED MODBUS, de lo contrario, la red no operara y marcará un número de error según se muestra en la figura 9.26. Por ejemplo:
 El #5 marca que no hay comunicación en la red.
 El #6 muestra fallas en la longitud del mensaje.
 El #11 muestra errores en la recepción de los datos.
 Etc.

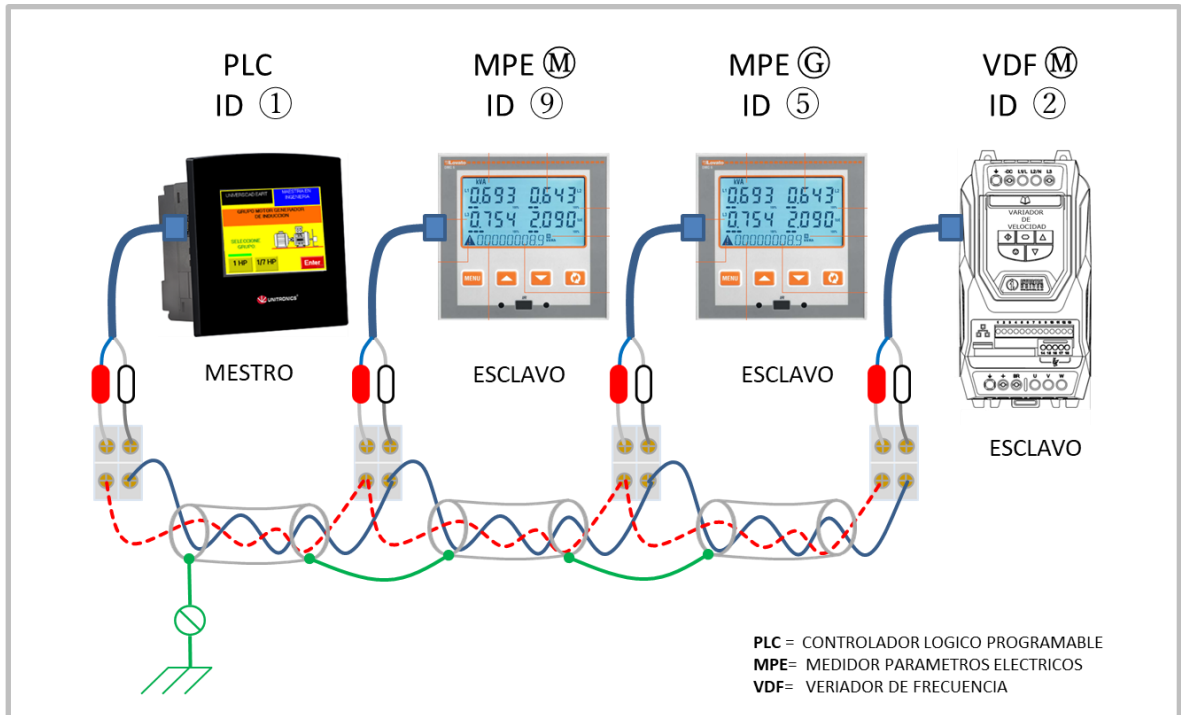


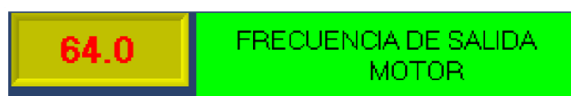
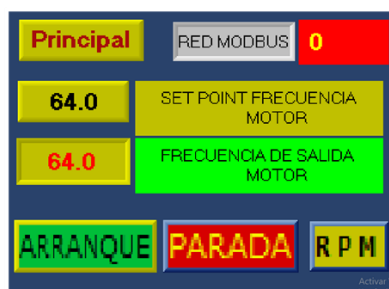
Figura 9.27. Esquema de la Red MODBUS RS485 del banco de trabajo.

64.0	SET POINT FRECUENCIA MOTOR	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td colspan="12">Variable 3</td> </tr> <tr> <td colspan="6">64.0</td> <td colspan="2">(Dec)</td> <td>▲</td> <td colspan="3">Esc</td> </tr> <tr> <td>←</td> <td>Home</td> <td>End</td> <td>Del</td> <td>▶</td> <td>▼</td> <td>▶</td> <td colspan="5"></td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>+/-</td> <td colspan="5">←</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>7</td> <td>8</td> <td>9</td> <td>0</td> <td>.</td> <td colspan="5"></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> <td>D</td> <td>E</td> <td>F</td> <td>Exp</td> <td colspan="5">Base</td> </tr> </table>	Variable 3												64.0						(Dec)		▲	Esc			←	Home	End	Del	▶	▼	▶						1	2	3	4	5	+/-	←					6	7	8	9	0	.						A	B	C	D	E	F	Exp	Base				
Variable 3																																																																								
64.0						(Dec)		▲	Esc																																																															
←	Home		End	Del	▶	▼	▶																																																																	
1	2	3	4	5	+/-	←																																																																		
6	7	8	9	0	.																																																																			
A	B	C	D	E	F	Exp	Base																																																																	

El botón SET POINT FRECUENCIA MOTOR nos lleva a un teclado alfanumérico en el cual se digita la frecuencia del variador de velocidad de (M). El número máximo a digitar es 70 Hz. Se teclea el valor de la frecuencia de trabajo y se oprime la tecla ENTER, la cual retorna al pantallazo de ARRANQUE MOTOR con el nuevo valor del SP de la frecuencia cargado..

Figura 9.28. Consigna de frecuencia para el VDF del motor (M).

En el pantallazo de ARRANQUE MOTOR



FRECUENCIA DE SALIDA DEL MOTOR Es solo una lectura del estado actual de la frecuencia Del motor.



Estos son los botones de arranque y Parada del Motor (M). Son un comando directo al variador de velocidad del Motor para que arranque o se detenga a través de la red Modbus



Este botón lleva al pantallazo en donde se observa el tacómetro que muestra la velocidad angular del equipo en RPM.

Figura 9.29. *Desglose de la funcionalidad del pantallazo ARRANQUE MOTOR adicional a la del SP de velocidad.*

Nota: el generador asincrónico posee la característica de entregar energía cuando su velocidad angular mecánica se encuentra por encima de la velocidad de sincronismo del estator. Esta velocidad es ligeramente mayor a la del sincronismo (entre 50 y 100RPM, para motores de 4 polos a 1.800RPM) Lo anterior significa llevar la maquina impulsora por encima de 1.800RPM o lo que es lo mismo unos pocos Hertz por encima de la frecuencia nominal.

Dependiendo del tipo de motor, de su eficiencia y de sus perdidas la frecuencia de la sobrevelocidad puede darse entre 63 y 66Hz, El variador de frecuencia se programó para pasar de cero a la frecuencia de set point en 10 segundos, siendo esta una rampa de aceleración programable.

Al presionar el botón de ARRANQUE el equipo entonces partirá desde cero Hz hasta el set point, buscando que el generador entregue electricidad a un grupo de bombillas en Δ que se encuentra fijo para hacer una señal de indicación de trabajo del generador.

Por lo general en los grupos (M)-(G) de este banco la frecuencia de generación oscila alrededor de 64Hz. Ver figuras 9.28 y 9.29.

Con el equipo generando lo siguiente es evaluar sus prestaciones como generador con aumento y disminución de carga, variando las condiciones de excitación de la maquina (energía reactiva) variando las condiciones de velocidad del motor de impulsión, etc. El botón de PARADA lleva a cero la velocidad del motor de impulsión y un paro programado y con una pequeña rampa de desaceleración de 5 segundos (programable en el variador)



Figura 9.30. Tacómetro para visualizar la velocidad angular del grupo $\text{M} - \text{G}$ en RPM. Presenta varios botones para diferentes datos del sistema y además el botón de retorno al pantallazo ARRANQUE MOTOR. El tacómetro es un pantallazo realizado en el HMI del PLC con señal del encoder que viene desde el generador G

El pantallazo RPM muestra la velocidad mecánica del grupo $\text{M} - \text{G}$ la señal de velocidad mecánica proviene directamente de un encoder ubicado por el lado del ventilador del generador. Ver figuras 9.30, 9.31, 9.32 y 9.33. Posee indicación por aguja o muestra el valor en el recuadro amarillo.

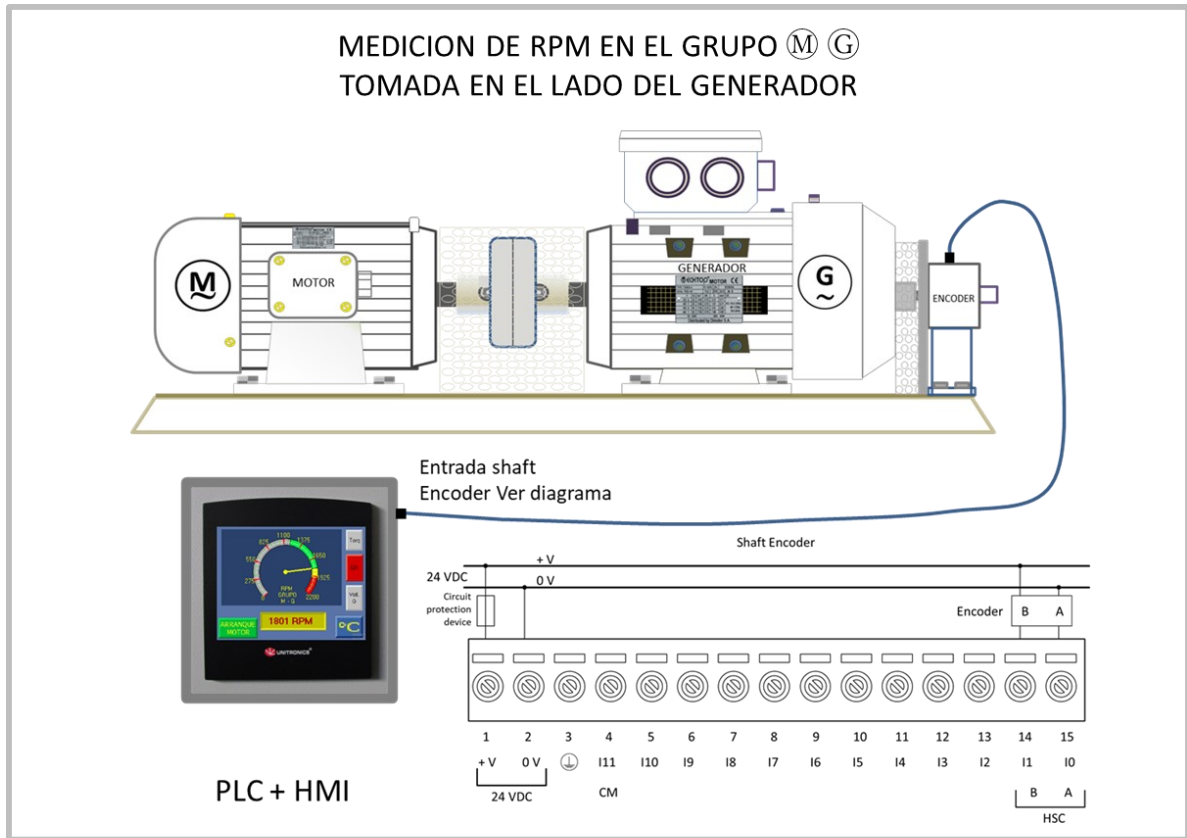


Figura 9.31. Visualización de la conexión del encoder al PLC del banco de trabajo.



Al tocar el botón ARRANQUE MOTOR del pantallazo RPM nos regresa al pantallazo ARRANQUE MOTOR.



Este indicador nos muestra las RPM en Números lo que muestra la aguja en el tacómetro.



Al tocar el botón °C del pantallazo RPM nos lleva al pantallazo TEMPERATURAS en el HMI del PLC.

Figura 9.32. Etiquetas en la parte inferior del Pantallazo RPM.

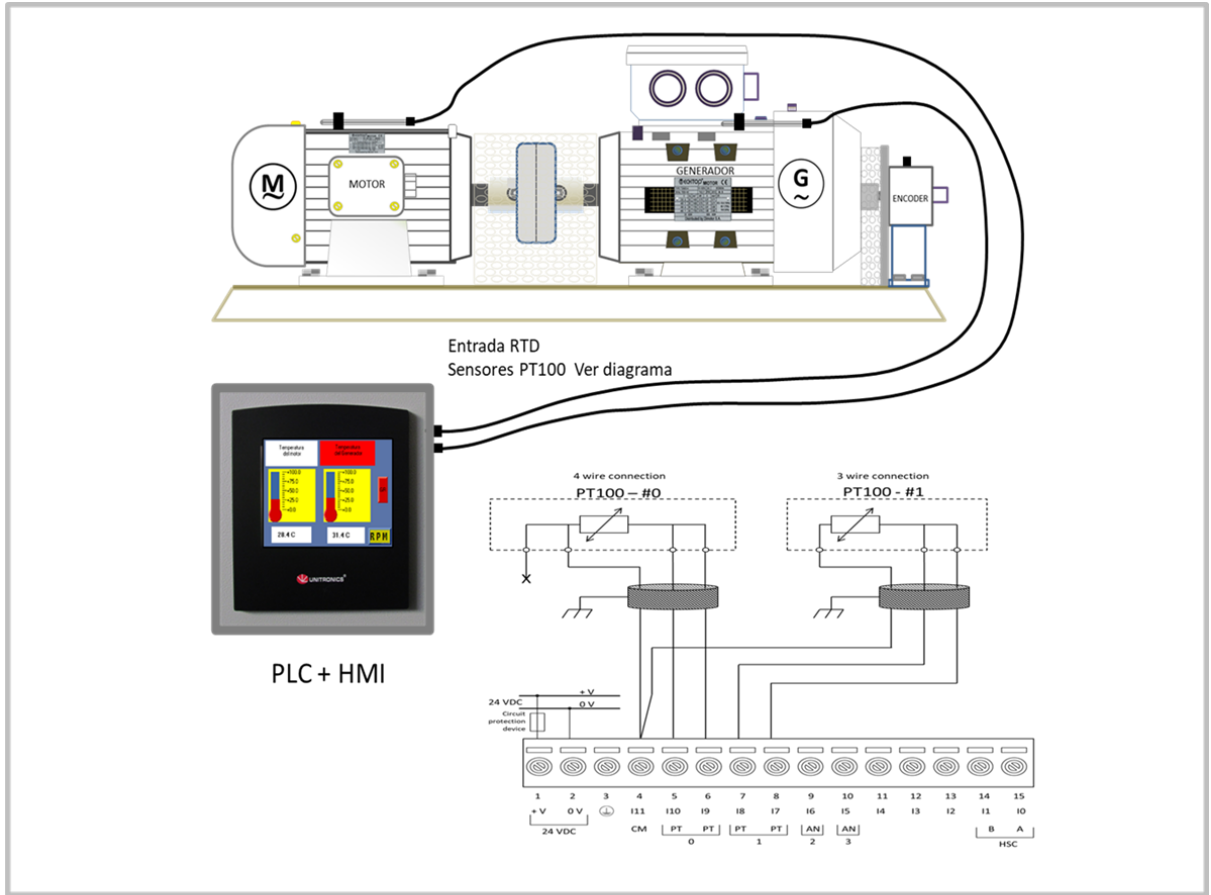


Figura 9.33. Visualización de la conexión de los sensores de temperatura a las entradas análogas de PLC. Medición de la temperatura en las superficies externas del motor \textcircled{M} y el generador \textcircled{G}

Al tocar el botón Torq en el pantallazo RPM (figura 9.30), este nos lleva al pantallazo torque y nos muestra el valor (N.m), y si tocamos el botón RPM nos lleva de nuevo al tacómetro mostrado en el pantallazo RPM. Ver figura 9.34.

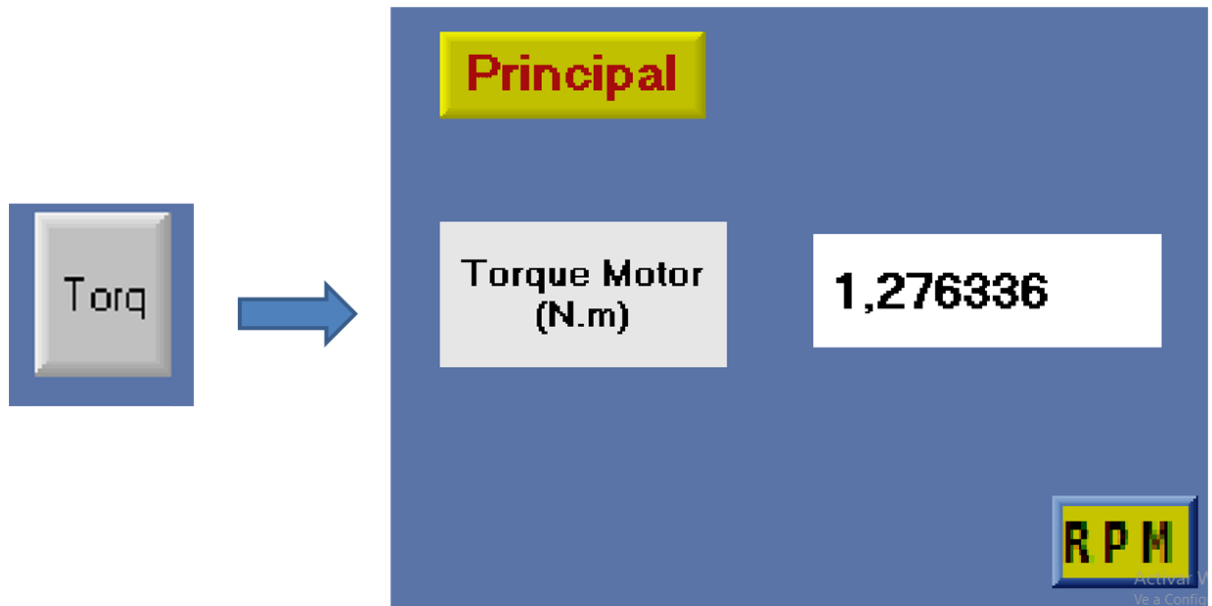
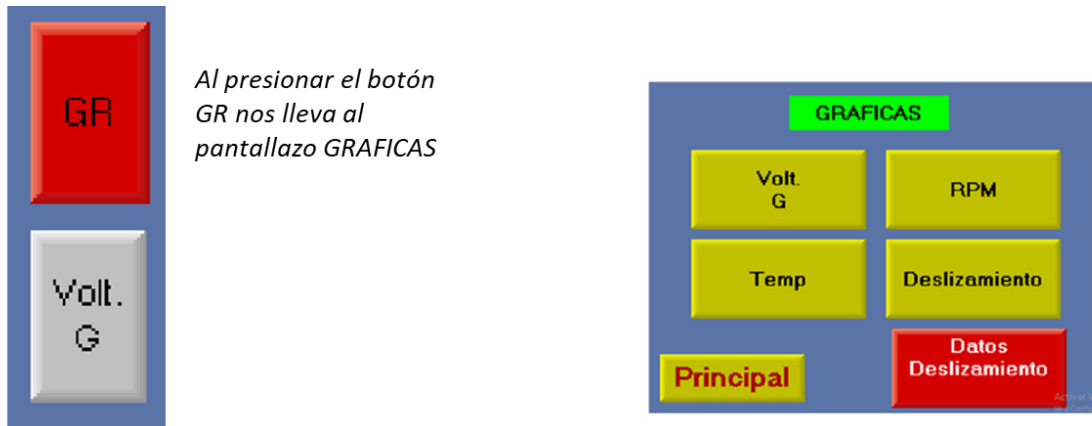


Figura 9.34. *Presionando Torq en el pantallazo RPM el sistema nos lleva al Pantallazo Torque en el HMI del PLC. Se muestra el torque de Motor M . Al presionar RPM regresamos al pantallazo RPM. El torque generador queda pendiente para nuevas vías de desarrollo debido a que las marcas de doble palabra del PLC fueron insuficientes.*

Al presionar el botón GR este nos lleva al pantallazo GRAFICAS en el HMI del PLC.
Ver figura 9.35



En el pantallazo GRAFICAS se muestran el acceso a las siguientes 4 graficas y a la siguiente tabla.

Graficas	
Volt G.	Voltaje de salida del generador.
Temp	Temperatura externa Motor y Generador
RPM	Velocidad angular mecánica grupo (M) (G)
Deslizamiento	Deslizamiento de Motor y de Generador
Tabla	
Datos deslizamiento	Porcentaje y velocidad

Figura 9.35. Al presionar el botón GR vamos al Pantallazo Graficas. Y desde allí se va a las cuatro graficas de tendencia que posee el equipo.
Al presionar Volt. G se va directamente al pantalla Volt G (voltaje del Generador (G)).
En el pantallazo Gráficas es posible retornar al pantallazo Principal y al cuadro de datos del deslizamiento para (M) y para (G) (botones de abajo).

Grafica de tendencia del voltaje del Generador (G).

Ver figura 9.36.

Grafica Volt. G

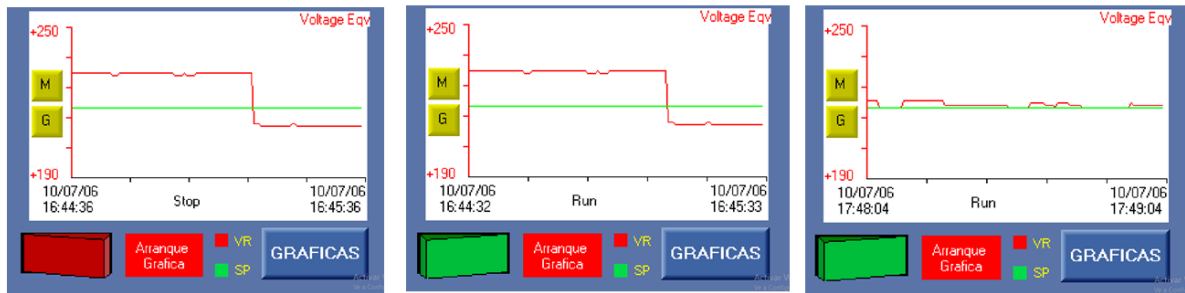


Grafico apagado

Grafico on line

Grafico on line

Corresponde al voltaje equivalente de las tres fases del generador.
La línea roja es el valor real y la línea verde corresponde al set point
Alrededor del cual se hace control

Si se toca el botón GRAFICAS retorna al pantallazo GRAFICAS.

Figura 9.36. *Vistas de la gráficas de tendencias del Voltaje del Generador ©.*
Posee un interruptor en la parte izquierda abajo para comenzar el trending.
Rojo: Trending suspendido. Verde: Trending activo.
Posee retorno al Pantallazo Graficas.

El grafico anterior 9.36 Corresponde al voltaje equivalente de las tres fases del generador.
La línea roja es el valor real y la línea verde corresponde al set point alrededor del cual se hace control.
Si se toca el botón GRAFICAS retorna al pantallazo GRAFICAS.

Grafica de tendencia de la velocidad angular (RPM) del grupo (M) - (G).
Ver figura 9.37.

Grafica Temperatura

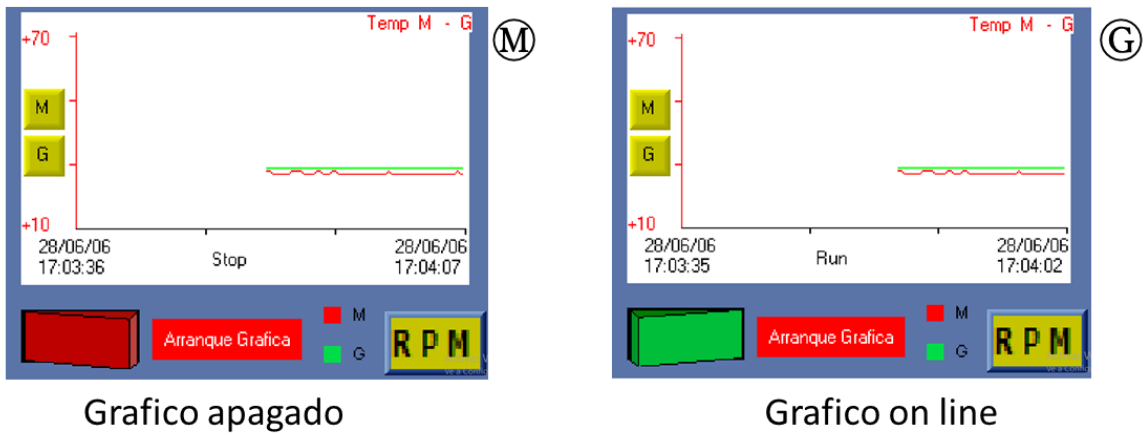


Figura 9.37. Vista del trending de las Temperaturas del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} .
Esta gráfica posee un interruptor en la parte izquierda abajo para comenzar el trending.
Rojo: Trending suspendido. Verde: Trending activo.
Posee retorno al Pantallazo RPM.

Esta figura 9.37 corresponde a las temperaturas de la superficie exterior del \textcircled{M} y de \textcircled{G} independientemente.

La línea roja es el \textcircled{M} y la línea verde corresponde a la temperatura en la superficie de \textcircled{G} si se toca el botón RPM retorna al pantallazo RPM.

Grafica de tendencia de la velocidad angular (RPM) del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} .

Ver figura 9.38.

Grafica de RPM

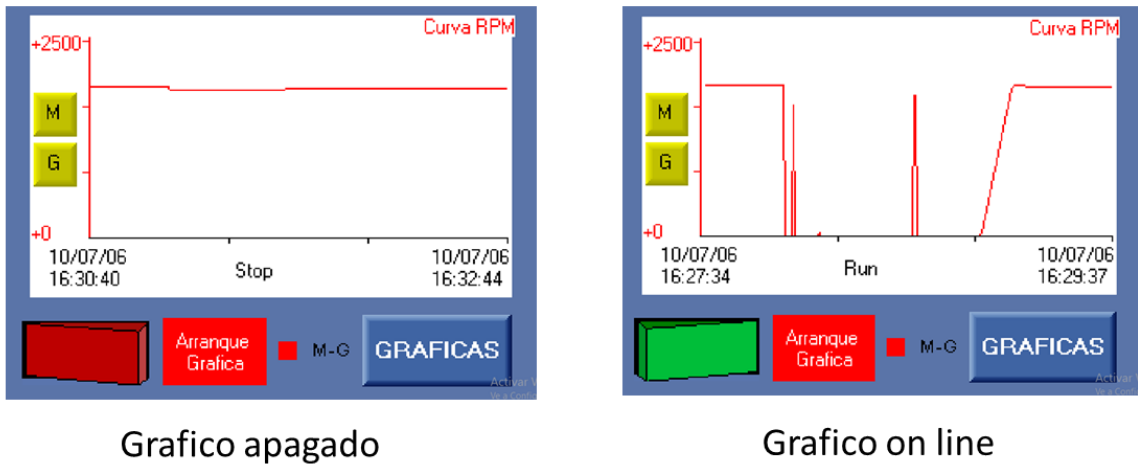


Figura 9.38. Vista del trending de las RPM del grupo $\text{M} - \text{G}$.
Posee un interruptor en la parte izquierda abajo para comenzar el trending.
Rojo: Trending suspendido. Verde: Trending activo.
Posee retorno al Pantallazo Graficas.

En la figura 9.38 la línea roja corresponde a la velocidad angular mecánica del grupo $\text{M} - \text{G}$. La velocidad se mide con un encoder tipo incremental instalado en el lado del ventilador del generador G .

Ver información relacionada con el sensor de velocidad angular en la figura 9.39.
Si se toca el botón GRAFICAS retorna al pantallazo GRAFICAS.

DATOS DE ENCODER
Encoder incremental marca Autonics



E50S Series

Diameter ø50mm Shaft type Incremental Rotary Encoder

Line-up

■ Features

- 12-24VDC power supply of line driver output(Line-up)
- Suitable for measuring angle, position, revolution, speed, acceleration and distance
- Power supply : 5VDC, 12-24VDC ±5%

■ Applications

- Various tooling machinery, packing machine and general industrial machinery etc.

⚠ Please read "Caution for your safety" in operation manual before using.



■ Ordering information (Former name : ENB)

E50S - **8** - **8000** - **3** - **N** - **24**

Series	Shaft diameter	Pulse/1Revolution	Output phase	Output	Power supply	Cable
Diameter ø50mm, shaft type	ø8mm	Refer to resolution	2: A, B 3: A, B, Z 4: A, A, B, B 6: A, A, B, B, Z, Z	T: Totem pole output N: NPN open collector output V: Voltage output L: Line driver output	5 :5VDC ±5% 24:12-24VDC ±5%	No mark: Cable type C: Connector cable type(※) CR: Axial connector type CS: Radial connector type

※Standard : E50S8-[PULSE]-3-N-24

※Cable length: 250mm

Figura 9.39. Medición de la velocidad angular del grupo M - G

Vista del encoder incremental que posee cada grupo M - G

Tratamiento de señal del encoder en el PLC para obtener las RPM del grupo M - G .

El programa del PLC utiliza la instrucción Freq <-HSC para tratar la señal de pulsos de entrada y entregar una salida del dato en RPM.

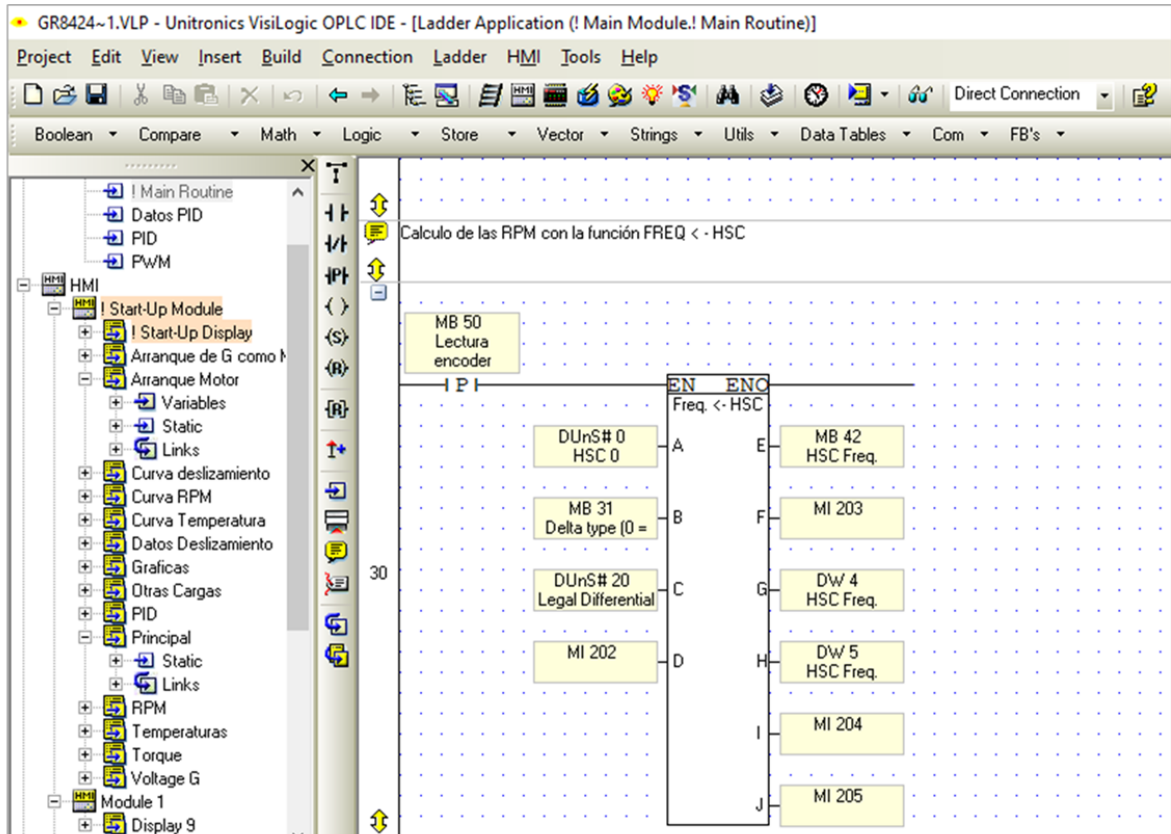


Figura 9.40. Medición de la velocidad angular del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G}

Vista de la instrucción del PLC para traducir la señal de pulsos que viene del encoder en unidades de ingeniería que trabaja la programación del PLC hasta llegar al dato de la velocidad angular en RPM.

Gráfica de tendencia del deslizamiento. Dos graficas en una:

Deslizamiento del motor \textcircled{M} en color rojo.

Deslizamiento del Generador \textcircled{G} en color verde.

Ver figura 9.41.

Grafica de Deslizamiento

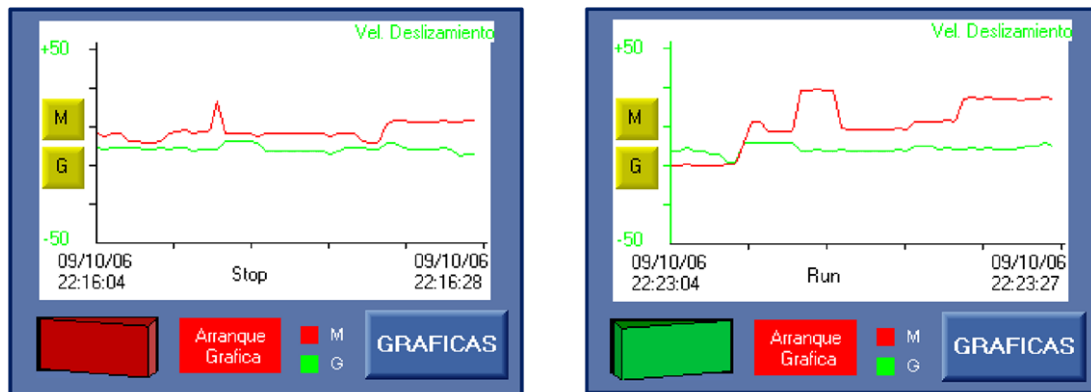


Grafico apagado

Grafico on line

Figura 9.41. Trending de los deslizamientos. Tanto motor \textcircled{M} como Generador \textcircled{G}

El deslizamiento mide la diferencia entre la velocidad sincrónica del campo del estator y la velocidad del rotor. Acá se muestran los deslizamientos en una sola grafica tanto para el Motor como para el Generador. La línea roja corresponde al deslizamiento del motor y la línea verde corresponde al deslizamiento del generador. Ver figura 9.41. Si se toca el botón GRAFICAS retorna al pantallazo GRAFICAS.

	Motor	Generador
% Deslizamiento	1,626656	-0,0315094
Velocidad Desl (RPM)	31	-4

GRAFICAS
Activa
Ver Gr

Figura 9.42. Datos en línea de los deslizamientos y de las velocidades de los deslizamientos del Motor \textcircled{M} y del Generador \textcircled{G} . Este pantallazo se llama Datos Deslizamiento. Si se toca el botón GRAFICAS retorna al pantallazo GRAFICAS.

La figura anterior 9.42 muestra en números los datos del porcentaje del deslizamiento y de la velocidad del mismo en RPM y sirve para comparar desempeños del motor y el generador ante variaciones en la carga del motor y del generador.

Estos deslizamientos muestran también variaciones debidas a desalineamientos en el grupo y a variaciones en las especificaciones de los bobinados.
Si se toca el botón GRAFICAS retorna al pantallazo GRAFICAS.

Otras Cargas. Pantallazo en el HMI.

Cuando tocamos el botón OTRAS CARGAS en el Pantallazo Principal llegamos al pantallazo OTRAS CARGAS. Ver figura 9.43.

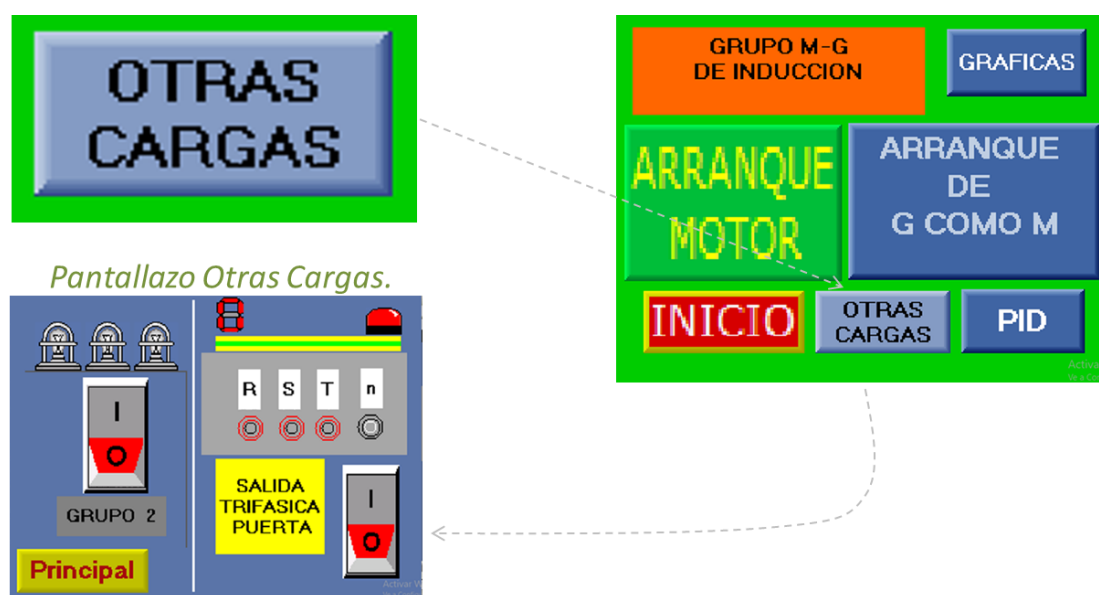


Figura 9.43. Pantallazo Otras Cargas . Se llega a él desde el Pantallazo Principal.

El pantallazo OTRAS CARGAS consta de dos partes:

La parte del lado izquierdo corresponde a las tres bombillas adicionales conectadas en Δ que se encuentran al lado superior derecho del tablero de control y que se comandan a través de un contactor comandado por el PLC en la salida 18KM6. Ver figura 9.44.

Al tocar con el dedo el botón el botón GRUPO 2 este pasa a color verde y se encienden las bombillas de este grupo.

Se pueden prender y apagar en el momento que se requiera.



Figura 9.44. Vista del grupo de bombillas LED adicionales que se pueden comandar desde el Pantallazo Otras cargas. Las fotos muestran el grupo de bombillas adicionales que posee el tablero de control en su parte superior derecha, apagadas inicialmente y luego encendidas. Están conectadas en configuración λ trifásica.

NOTA: Las dos tapas superiores, que contienen las bombillas, son batientes de accionamiento manual con el fin de facilitar la puesta del plástico protector y mejorar la visualización de las luces.

Los bombillos están encerrados en lámparas tipo tortuga en vidrio con rejilla para evitar el contacto accidental con los bornes de los sockets de la bombillas y quiebre de las mismas. Ver figura 9.45.

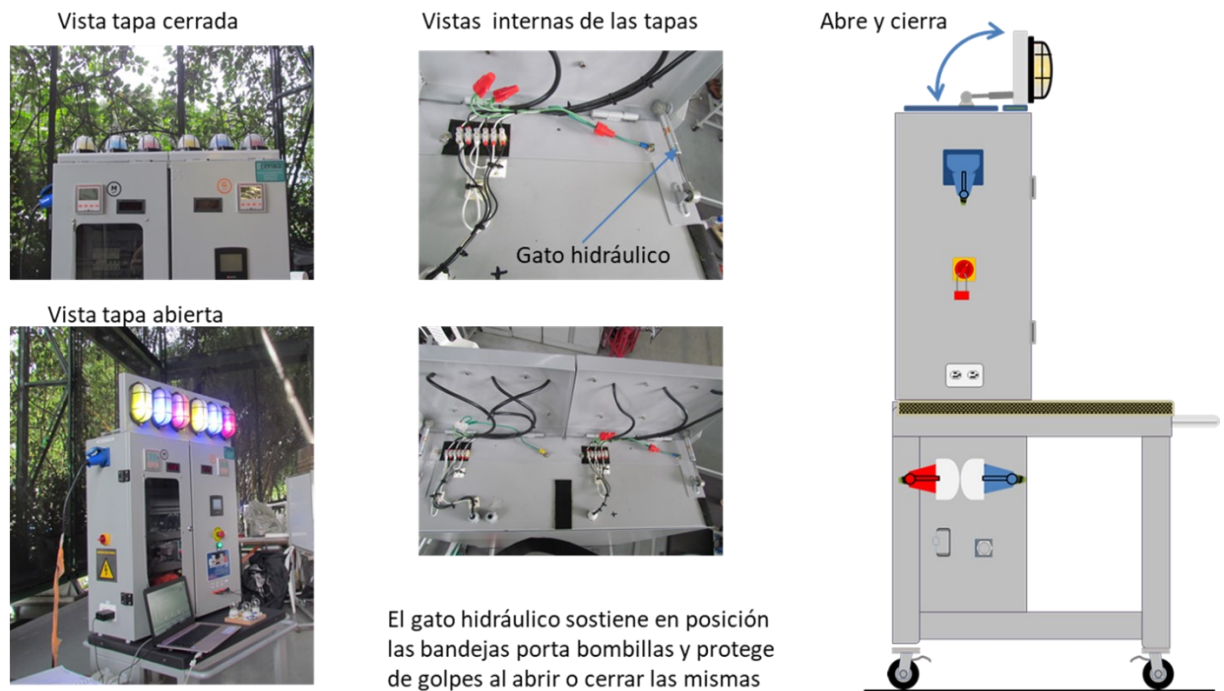


Figura 9.45. Detalles del montaje físico de los grupos de bombillas LED que posee el banco de trabajo en su parte superior.

En el siguiente plano se muestra el grupo de bombillas adicionales que posee el tablero de control en su parte superior derecha resaltadas en color naranja y están conectadas en configuración λ inicialmente. Ver figura 9.46.

Para efectos de trabajo en el laboratorio el punto central de la λ puede conectarse a tierra o no.

Las bombillas son de 7w c/u y de tecnología LED.

El comando de encendido se hace por el HMI del display tal como se ha explicado.

En este plano se muestra el grupo de bombillas adicionales que posee el tablero de control en su parte superior derecha resaltadas en color naranja y están conectadas en configuración λ inicialmente.

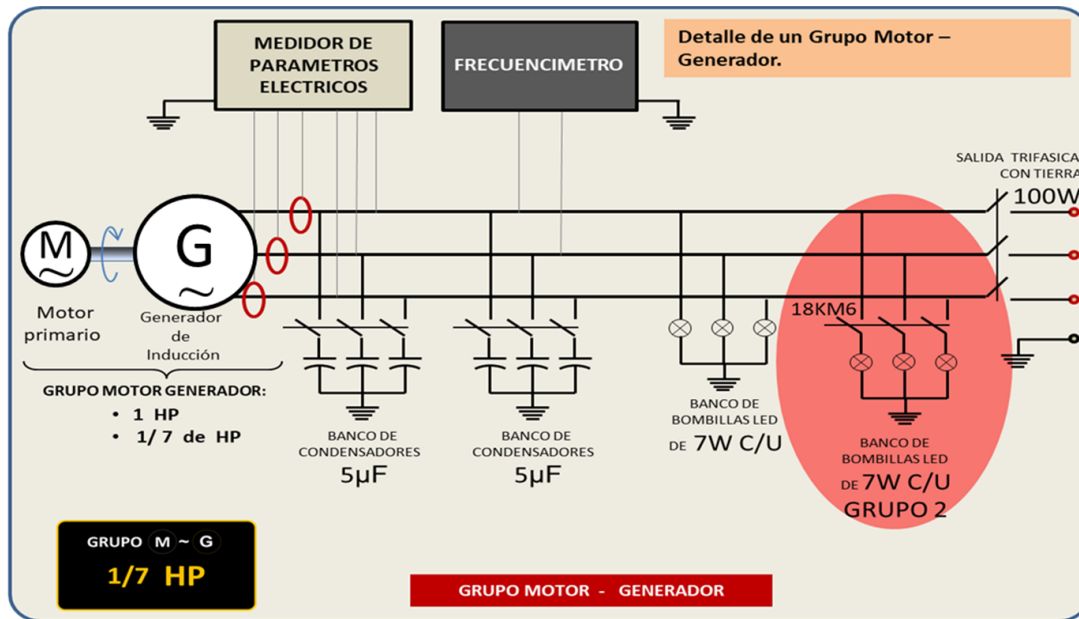


Figura 9.46. Diagrama a tres hilos de las cargas del generador © en donde se resalta la carga conmutada que corresponde al segundo grupo de bombillas que posee el banco de trabajo en su parte superior derecha. Las bombillas son del tipo LED de 7 W cada una.

Ahora nos centraremos en la SALIDA TRIFASICA PUERTA la cual se encuentra en la parte baja de la puerta derecha del tablero de control. Ver figura 9.47.

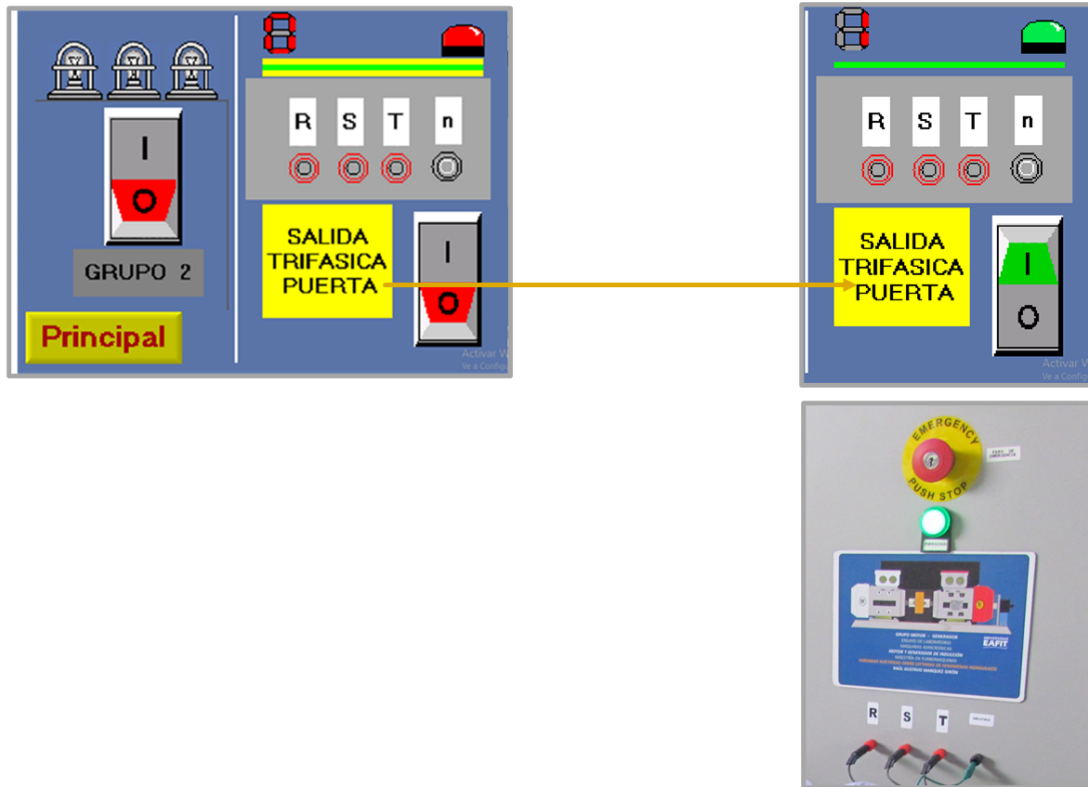


Figura 9.47. Salida conmutada en bornes RST n ubicada en la puerta derecha del tablero de control del banco. Esta salida se comanda desde el Pantallazo Otras Cargas (lado derecho) en el HMI del PLC.

Al tocar con el dedo el botón el botón SALIDA TRIFASICA PUERTA este pasa a color verde y el PLC habilita las salidas R S T tipo banana. Ver figuras 9.47 y 9.48.
 Al accionar este botón se energiza el contactor 18 KM7 y con esto aparece voltaje trifásico en los terminales R S T .



Figura 9.48. Conectores Jack tipo banana. Hembra y macho.

Estos conectores se usan para la conectividad en la salida RST n que hay en la puerta derecha del tablero de control.

La salida en el tablero posee conectores tipo hembra para tablero.

Las cargas que se conecten a esta salida deben tener la banana macho correspondiente para poderse conectar correctamente .

Diámetro: 4mm

Las salidas tipo banana hembra van en la puerta del tablero como salida trifásica con neutro y son accionadas por el contactor 18 KM7. Esta salida esta estimada en una capacidad de potencia de 100W para el grupo M-G de 1/7 HP y de 200W para el grupo de 1.2HP. Ver figura 9.48.

Para conectar en esta salida trifásica se cuenta con: Ver figura 9.49

- Un banco de bombillas incandescentes de 10W en λ (solo en λ). Ver figura 9.51.
- Un banco de bombillas tipo LED de 5W en λ con posibilidad de conectarse en Δ ya que la bombilla lo permite.
- Una carga inductiva de un ventilador para PC. Es un motor para ventilador de PC de 10W para conectarse a 230VAC monofásico como se muestra en la figura 9.52.
- Un motor universal de 110VAC, 100W, muy usado en maquinas de coser tal como se muestra en la figura 9.54.
- Carga electrónica radio transistor de 120VAC de 10W. Ver figura 9.57.

También es factible conectar bancos trifásicos de condensadores externos para tener diferentes valores de excitación para ser estudiados en el laboratorio tanto en configuración Δ como en configuración λ pero siempre en modo de excitación en paralelo. Ver figura 9.56.

Grupo general de cargas

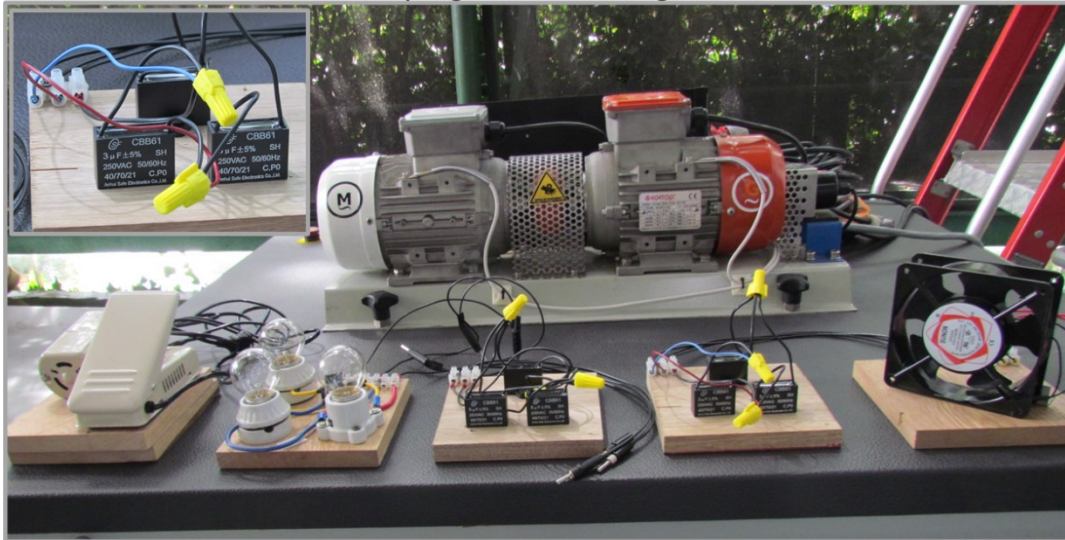


Figura 9.49. Salida Diferentes tipos de cargas que pueden conectar por la salida conmutada ubicada en la puerta derecha del tablero de control. Se observan, un Ventilador de PC, dos bancos de condensadores de excitación y un motor monofásico de alta velocidad (motor maquina de coser).

Visualización de presencia de voltaje de salida en bornes RST n del tablero. Ver figura 9.50.

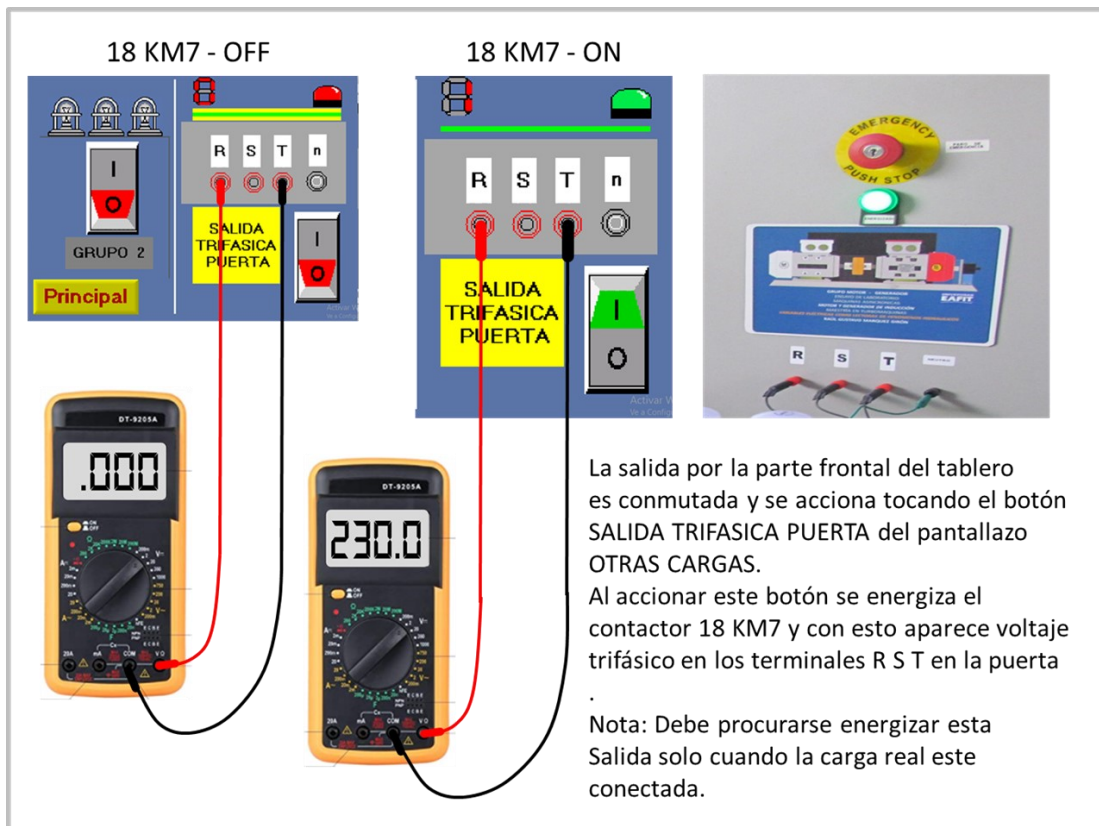
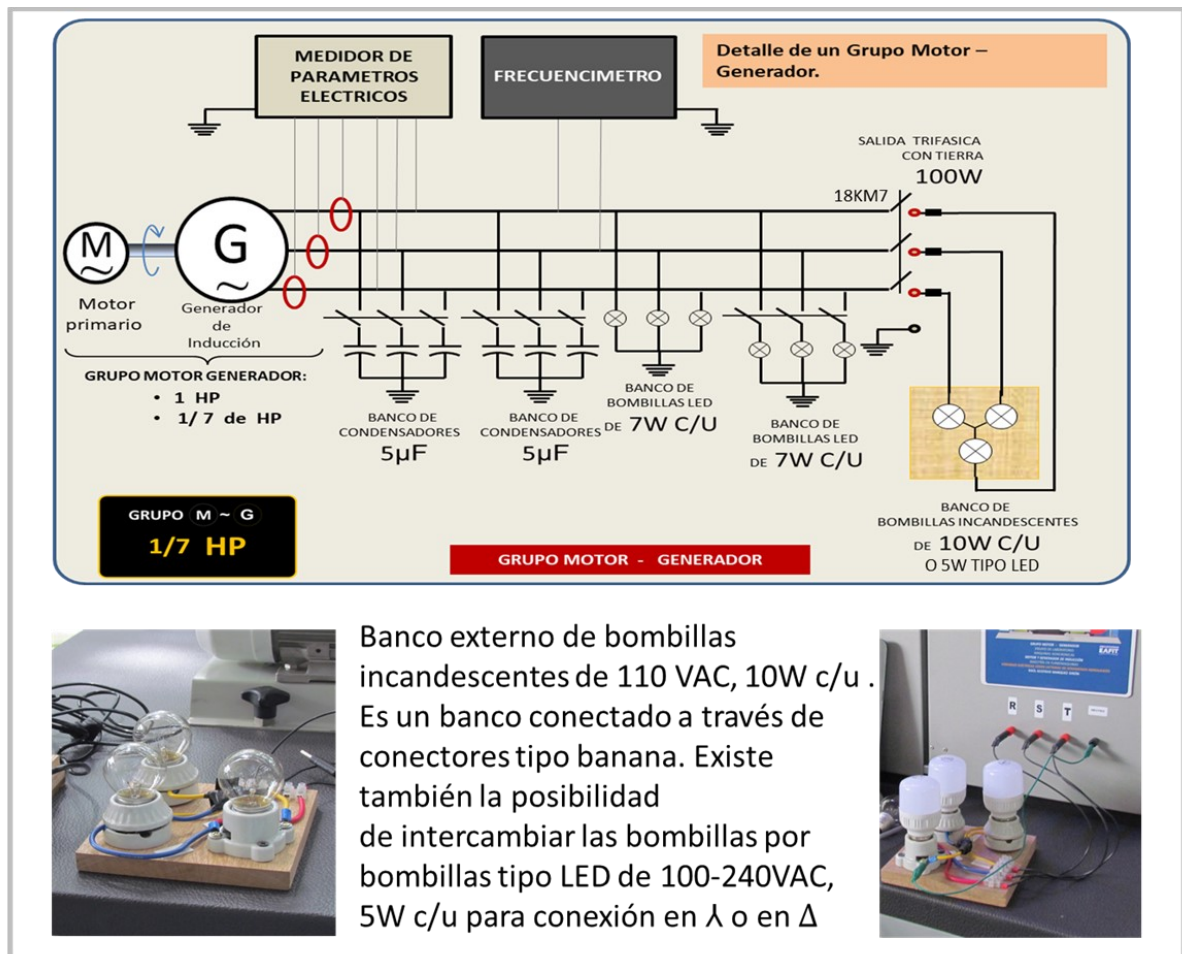


Figura 9.50. Visualización de presencia de voltaje de salida en bornes RST n del tablero de control del equipo. Se utiliza un Voltímetro portátil en modo Corriente Alterna.

Conexión de una carga resistiva balanceada. Ver figura 9.51.
 Banco de bombillas Tipo LED en configuración trifásica en λ .



Banco externo de bombillas incandescentes de 110 VAC, 10W c/u . Es un banco conectado a través de conectores tipo banana. Existe también la posibilidad de intercambiar las bombillas por bombillas tipo LED de 100-240VAC, 5W c/u para conexión en λ o en Δ



Figura 9.51. Conexión de una carga resistiva trifásica balanceada en bornes RST del tablero de control.

Conexión de una carga inductiva desbalanceada.

Ventilador de PC de 220 Vac bifásico. Conectado a los bornes R y T del tablero de control.

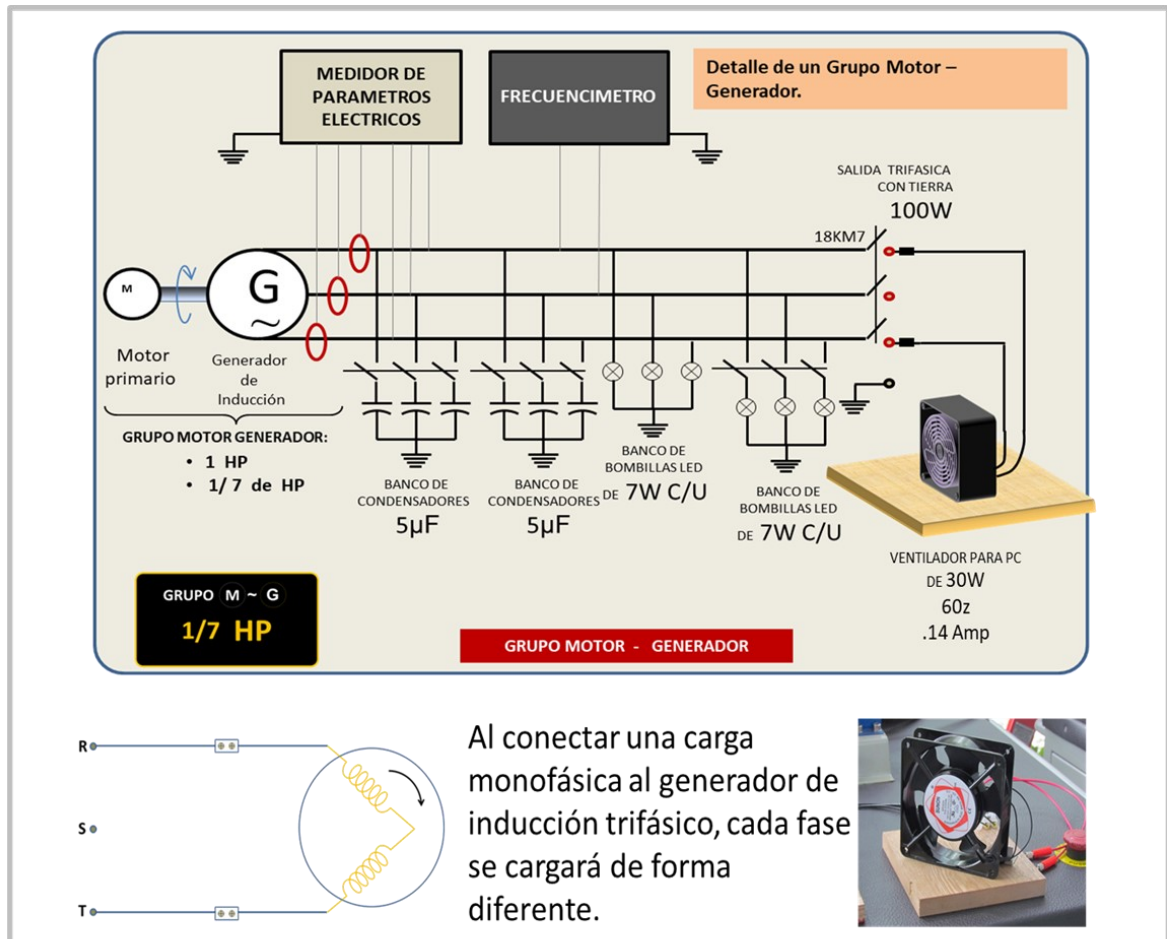


Figura 9.52. Conexión de una carga inductiva desbalanceada. Esta se conecta en los bornes R y T del tablero de control.

La corriente y el voltaje no se distribuirá uniformemente sobre los bobinados y la fase en paralelo con la carga, se sobrecargará mucho antes de que los otros dos bobinados alcancen sus límites actuales; es decir el generador de inducción trifásico no puede suministrar la misma potencia en un sistema desbalanceado al igual que con una carga de tres fases equilibrada.

Para lo anterior se recomienda colocar los capacitores de excitación de una forma ya reconocida en el medio llamada conexión modo C-2C la cual mejora considerablemente esta situación.

La conexión C-2C propone un esquema en el que la capacitancia de excitación por fase esta conectada en paralelo a la carga y una capacitancia con el valor para dos fases se conecta en la terminal de carga que sigue en el sentido de rotación del equipo. Esta ultima capacitancia proporciona el desfase necesario de la carga monofásica de tal forma que parezca equilibrada para el generador de inducción trifásico. Ver figura 9.53

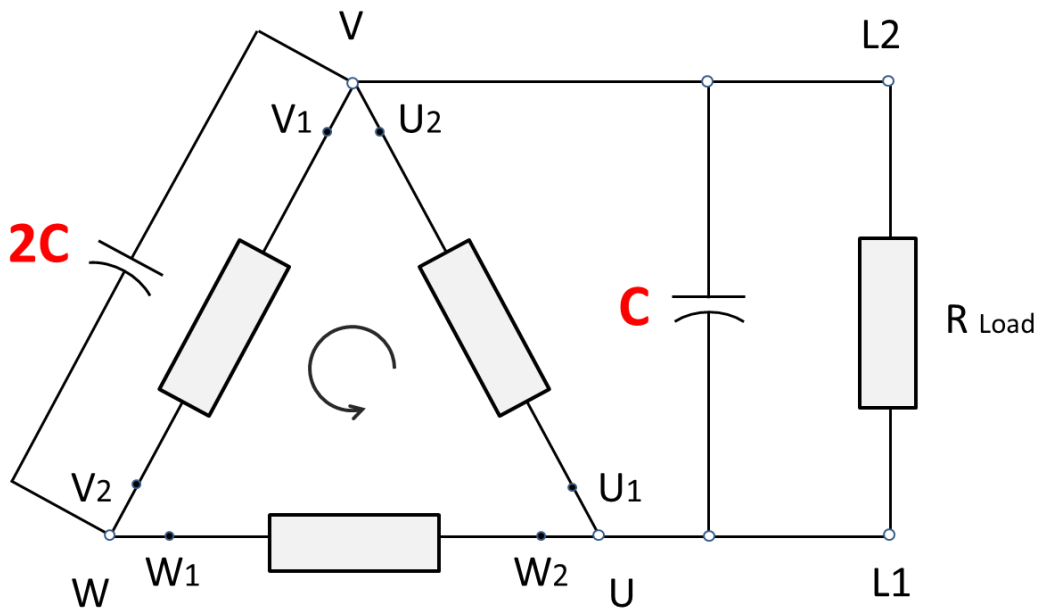


Figura 9.53. Configuración de capacitores $c_2 - c$ para la maquina asíncrona de inducción trifásica con una carga resistiva monofásica conectada.

Otro caso de una carga monofásica inductiva (Motor de maquina de coser) ver figura 9.54.



MOTOR UNIVERSAL
PARA MAQUINO DE COSER
110 VAC
60Hz
1 Amp
7000RPM
150 W

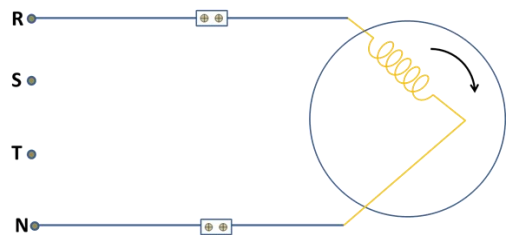


Figura 9.54. Conexión de una carga inductiva desbalanceada.
Esta se conecta en los bornes R y n del tablero de control puesto que el voltaje es 110 VAC.
Este es un motor de alta velocidad muy diferente en comportamiento al anterior ventilador para PC.

NOTA:

El motor de la maquina de coser.

Características técnicas:

150W

110 ó 220VAC

8000RPM monfasico ó bifásico.



Fotografía tomada de Internet:

https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_629215-MCO41788505470_052020-O.webp

Figura 9.55. El motor Universal para maquinas de coser.
150 W 110 VAC 8000 RPM.

Tipo:

UNIVERSAL: Es decir, trabaja con corriente alterna o con corriente directa y se adapta a todos los tipos de máquinas de coser que utilizan motor externo. Ver figura 9.55.

Este tipo de motor es de los que se le colocan a las máquinas de coser antiguas que antes funcionaban a pedal manual y hoy en día también se le colocan a las máquinas modernas.

Es compatible con máquinas de coser Alfa, Refrey, Sigma, Singer, Wertheim...

El motor monofásico universal o simplemente motor universal es un tipo de motor eléctrico que puede funcionar tanto con corriente continua (c.c.) como con corriente alterna (a.c.)

Es similar a un motor en serie de corriente continua, aunque con muchas y variadas modificaciones:

Los núcleos polares, y todo el circuito magnético, están contruidos con chapas de hierro al silicio aisladas y apiladas para reducir las pérdidas de energía por corrientes parásitas que se producen a causa de las variaciones del flujo magnético cuando se conecta a una red de corriente alterna.

Menor número de espiras en el inductor con el fin de no saturar magnéticamente su núcleo y disminuir así las pérdidas por corrientes de Foucault y por histéresis, aumentar la intensidad de corriente y, por lo tanto, el par motor y mejorar el factor de potencia.

Mayor número de espiras en el inducido para compensar la disminución del flujo debido al menor número de espiras del inductor.

Principio de Funcionamiento

En c. c.

En corriente continua es un motor serie normal con sus mismas características. Al invertir la corriente continua del motor en serie, el sentido de rotación permanece constante. Si se aplica corriente alterna a un motor en serie, el flujo de corriente en la

armadura y en el campo se invierte simultáneamente, el motor seguirá girando en el mismo sentido.

En a. c.

Cuando el motor universal es conectado a. c., su flujo varía cada medio ciclo.

En la primera mitad de la onda de corriente alterna es denominada positiva, aquí la corriente en los devanados de la armadura tienen la dirección igual a las manecillas del reloj, es decir de izquierda a derecha, mientras que el flujo producto del devanado del campo tiene un sentido de derecha a izquierda, así que el par desarrollado por el motor es contrario al de las manecillas del reloj.

En la segunda mitad de la onda de corriente alterna, denominada negativa, el voltaje aplicado invierte su polaridad, así mismo la corriente cambia su dirección y ahora está de derecha a izquierda, también el flujo producto de los polos está dirigido ahora de izquierda a derecha, el par de arranque no cambia su dirección, puesto que en la mitad negativa se invierten tanto la dirección de la corriente, como la del flujo.

De esta manera se comporta de manera semejante a un motor serie de corriente continua. Como cada vez que se invierte el sentido de la corriente, lo hace tanto en el inductor como en el inducido, con lo que el par motor conserva su sentido.

Tiene menor potencia en corriente alterna que en continua, debido a que en alterna el par es pulsatorio. Además, la corriente está limitada por la impedancia, formada por el inductor y la resistencia del bobinado. Por lo tanto habrá una caída de tensión debido a reactancia cuando funcione con corriente alterna, lo que se traducirá en una disminución del par.

Mayor chispeo en las escobillas cuando funciona en corriente alterna, debido a que las bobinas del inducido están atravesadas por un flujo alterno cuando se ponen en cortocircuito por las escobillas, lo que obliga a poner un devanado compensador en los motores medianos para contrarrestar la fuerza electromotriz inducida por ese motivo. El motor de C.A. en serie tiene las mismas características generales que el de C.C. en serie, se ha fabricado un motor en serie para ambas corrientes que se le llama "motor universal" y tiene gran aplicación en aparatos eléctricos pequeños. Los motores universales funcionan con menor rendimiento que los motores en serie de C.A. o C.C. puros y solo se hacen en tamaños chicos. Para invertir el giro de este motor se deben invertir las conexiones en la armadura.

Conexión de bancos de capacitancias de excitación externas, en paralelo en λ y en Δ .

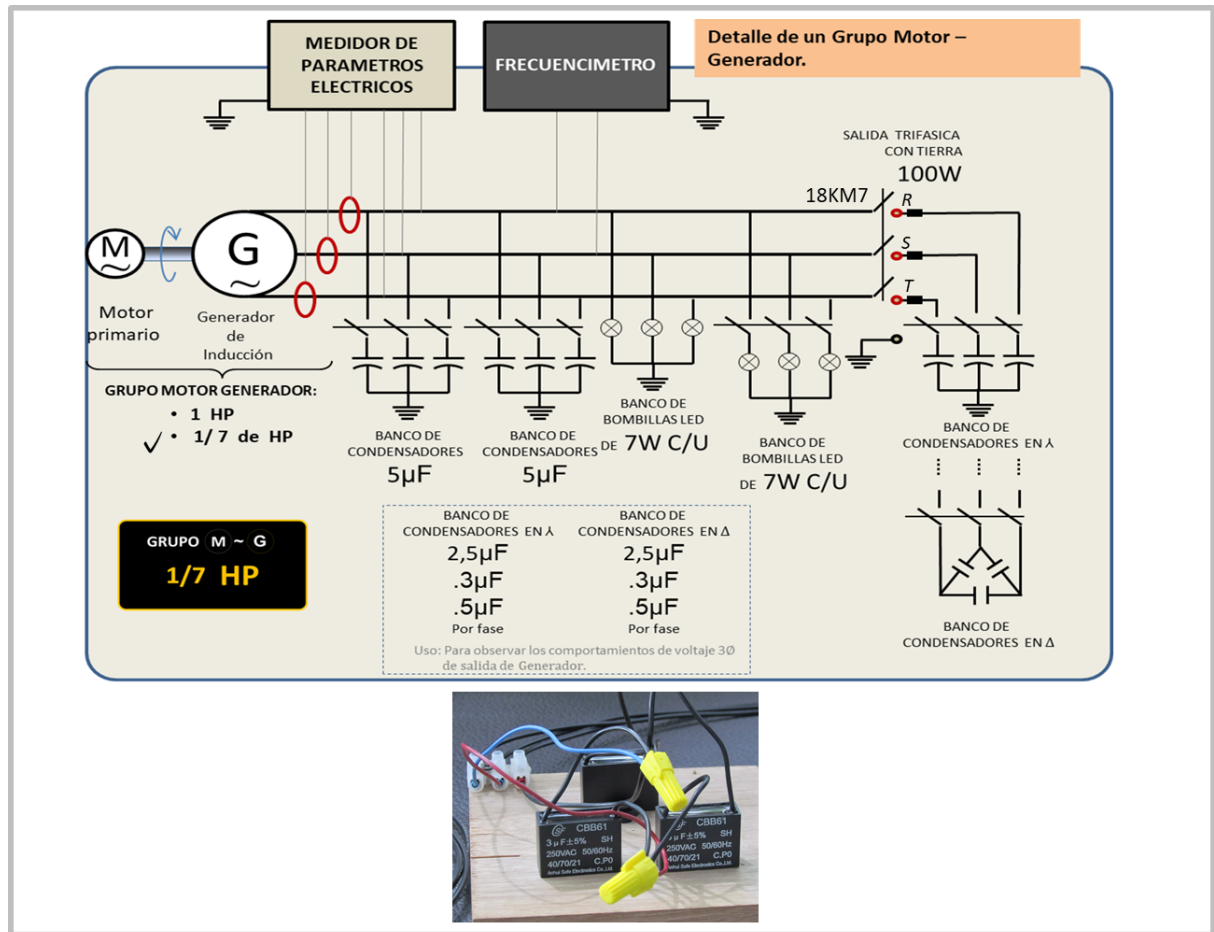


Figura 9.56. Grupos 3 ϕ en λ o en Δ de condensadores que es posible conectar a través de la salida RST que posee el tablero de control en su parte frontal. En la figura se observa el caso del grupo $\text{M} - \text{G}$ de 1/7 HP.

El voltaje de salida del generador asíncrono presenta una gran dependencia con el valor de la excitación de energía reactiva que este posea. En el banco de trabajo se instalaron los grupos de capacitores que resultaron de los cálculos iniciales para una configuración en paralelo en λ .

Por ejemplo para el banco de capacitores de 1/7 HP se cuenta con dos grupos de condensadores en paralelo y en λ cada uno. Pero resulta que es factible conectar los capacitores en Δ y para esto vimos en el capítulo 8 Calculo de condensadores que para el grupo $\text{M} - \text{G}$ de 1/7 HP en la conexión en paralelo y en delta el valor de la capacitancia era 3.23 μ f por fase, entonces la posibilidad de conectar un grupo de condensadores 3 μ f en Δ puede darse por la salida RST de la puerta del tablero la cual es comandada por 18KM7 pudiendo así comparar los resultados finales de voltaje, velocidad angular y frecuencia con los de los grupos en paralelo en λ .

Ocurre lo mismo del grupo $\text{M} - \text{G}$ de 1.2 HP dando como resultado un grupo capacitancias en paralelo en Δ de 12.5 μ f por fase. Ver capítulo 8 calculo de condensadores.

Hemos notado que el valor del voltaje de salida trifásico posee un valor **más** alto cuando se colocan capacitores en paralelo en Δ que cuando están en λ estando el

generador en un nivel de carga relativamente bajo cercano al 25%. Para el caso del grupo de 1/7HP la salida de voltaje entre líneas, bajo estas condiciones oscilaba alrededor de 240v de AC, mientras que para el caso de la conexión en paralelo en Δ el voltaje entre líneas estaba en 227v de AC. Ver figura 9.56

Conexión de carga electrónica externa.

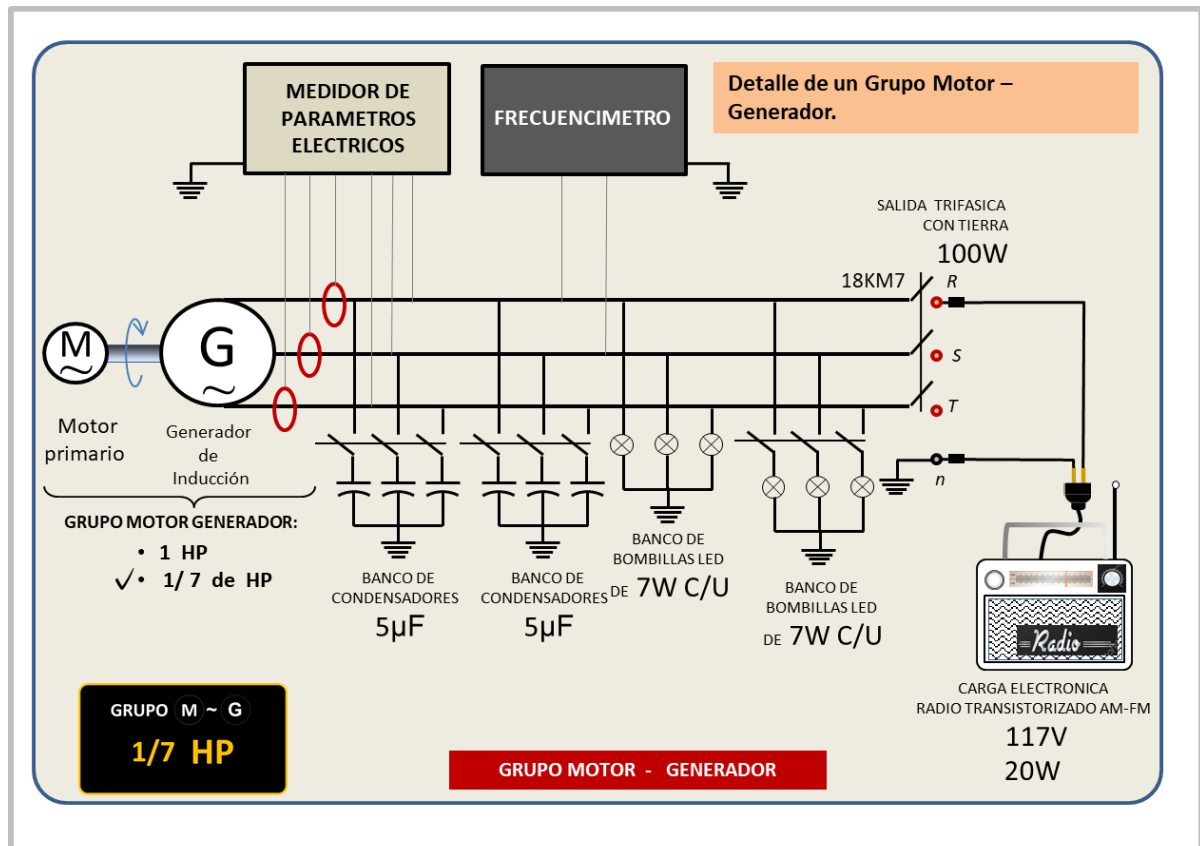


Figura 9.57. Conexión de una carga electrónica externa 110 VAC conectada a una de los terminales de las salidas RST n que posee el tablero. En este caso el radio transistor se conectó a la fase R con referencia n para obtener alrededor de 110 VAC.

En el banco es posible realizar pruebas para conectarle al generador cargas electrónicas de manera externa, estas cargas es posible conectarlas en modo monofásico bifásico o trifásico, tal como vemos en la grafica es posible conectar un radio transistorizado de bajo vatiaje al grupo $\text{M} - \text{G}$ de 1/7 HP. Ver figura 9.57

Otras cargas electrónicas son:

- Regulador de voltaje
- Variador de frecuencia para motor
- UPS
- PC a la salida de la UPS
- TV a la salida de la UPS
- Equipo de comunicaciones a la salida de la UPS
- Equipos de control para automatización a la salida de la UPS
- Todo lo anterior referenciando muy bien el NEUTRO del generador

Cuando estoy en el pantallazo principal y toco el botón PID voy al pantallazo PID.

Despliegue de la función PID para regular el voltaje de salida del generador ③ variando la frecuencia del VDF del motor ④.

Ver figura 9.58.

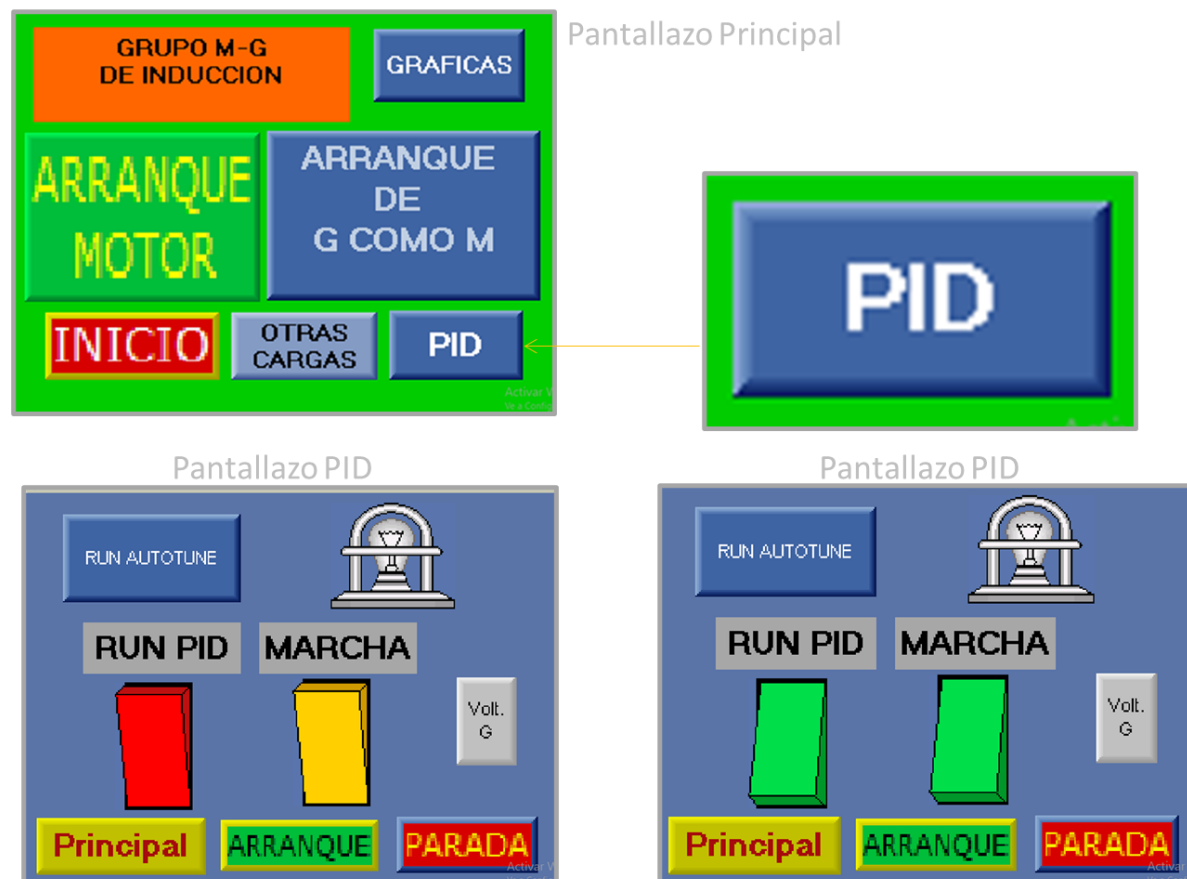


Figura 9.58. Manera de llegar al Pantallazo PID. PID es un control Proporcional Integral Derivativo que se ejecuta sobre el voltaje de salida del Generador ③ buscando que este sea lo mas estable posible en un valor prefijado, y actuando sobre una variable de entrada la cual es frecuencia del VDF del motor primo del sistema.

El pantallazo PID habilita la regulación del voltaje de salida dentro de unos limites predeterminados actuando sobre la velocidad del motor primo

Esta es un practica de regulación del voltaje de salida dentro de los limites de 208V a 240V con un set-point SP (punto de ajuste de 218VAC) demás la variable de control será la frecuencia del variador de velocidad de ④ y con un rango desde 62.8Hz hasta 64.2 Hz el PID con el que se esta trabajando es un PID quetrae el PLC Unitronics del banco de trabajo. Y en el programa del Ladder se maneja a través de 2 subrutinas Llamadas:

Datos PID.

La función PID incorpora la función Autotuning que consiste en sintonizar los mejores valores de las constantes P, I y D de la función bajo rangos establecidos de operación del voltaje de salida y de la frecuencia de entrada, es conveniente que cada que se vaya

a correr el PID hacer un autotune. Los valores de las constantes se logran inicialmente con el programa PID Server. Ver figura 9.59.

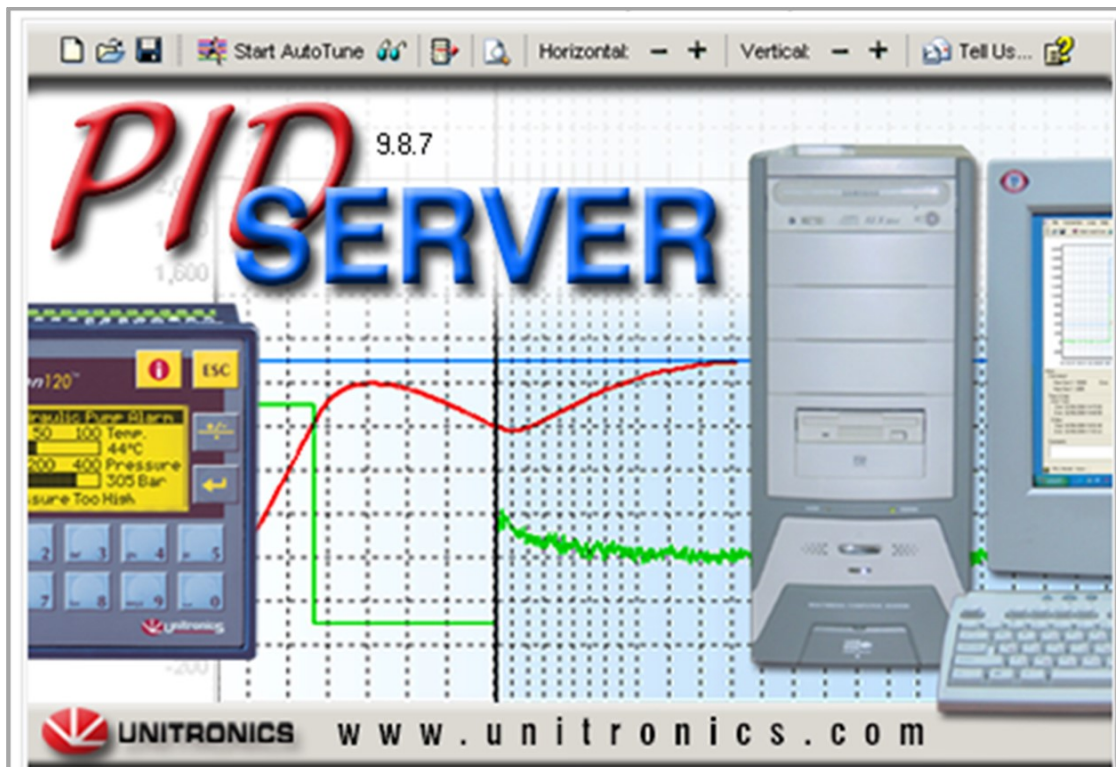


Figura 9.59. Software PID SERVER.

La utilidad PID Server PC permite ajustar automáticamente el bucles PID de este trabajo el cual trabaja al unísono con el PLC Unitronics que hay en el tablero de control. Aunque se instala como parte de la configuración de del programa del PLC, la función PID Server se ejecuta independientemente de otro software de Unitronics.

La utilidad PID Server ajusta el bucle PID, desactivando temporalmente la función PID del PLC y ajustando el bucle mientras el PC controla la salida PID.

Y con este se obtienen los valores de las constantes tal como se muestra en el siguiente pantallazo. Ver figura 9.60

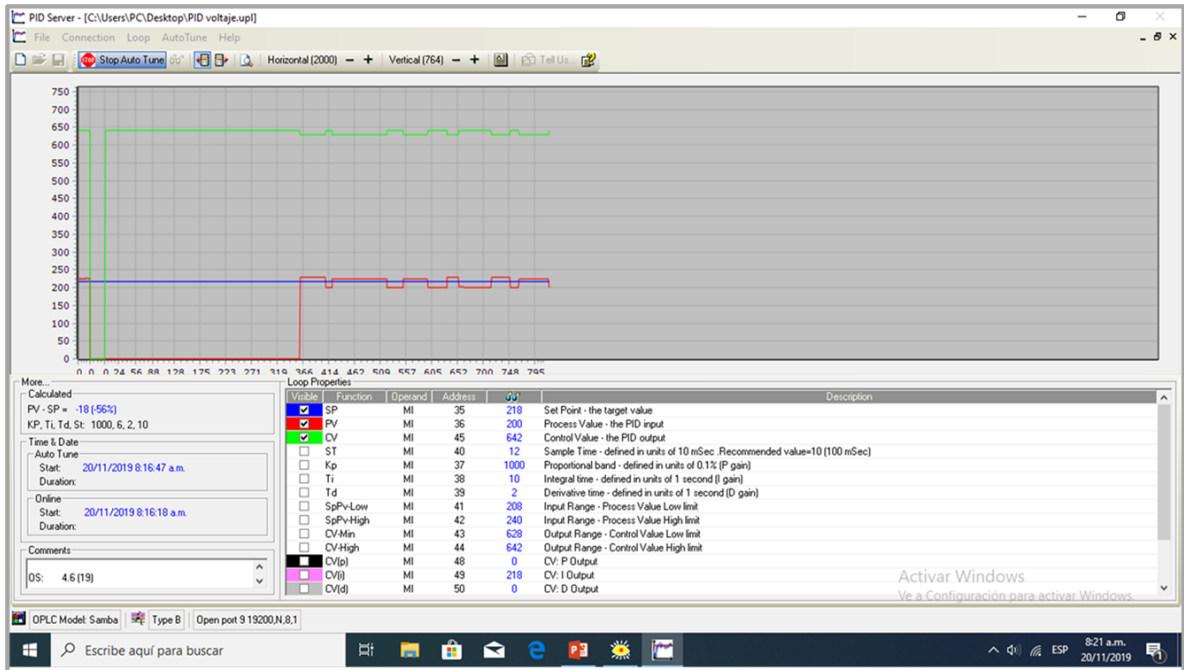


Figura 9.60. Software PID SERVER.

La grafica muestra el corrido que el software PID Server para encontrar los mejores valores de todos los parámetros de la función PID.

La grafica muestra las propiedades del bucle PID. El software PID Server muestra una representación gráfica codificada por colores del proceso del ajuste automático.

Ver el capítulo 16 ANEXOS para ampliar el detalle del PID Server.

Regresando al HMI del PLC: Ver figura 9.61

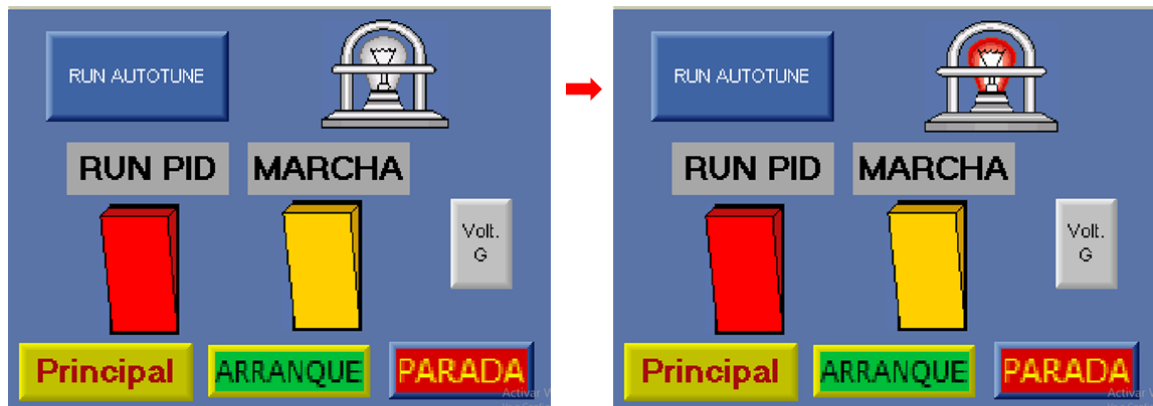


Figura 9.61. Pantallazo PID en el HMI del PLC.

Se observa el proceso de AUTOTUNE. Este proceso estará activo hasta que se apague le bombillo rojo que hay en el pantallazo.

El Pantallazo posee un retorno al pantallazo principal y los botones de arranque y parada del equipo.

Y También posee un botón para ir a la grafica del voltaje del Generador Ⓒ

Cuando tocamos el botón RUN AUTOTUNE se enciende el bombillo rojo indicando que se esta ejecutando, cuando se termina de ejecutar se apaga el bombillo de color rojo automáticamente. Como mencionamos esta practica es recomendable hacerla cada que se ejecuta o se corre el PID.

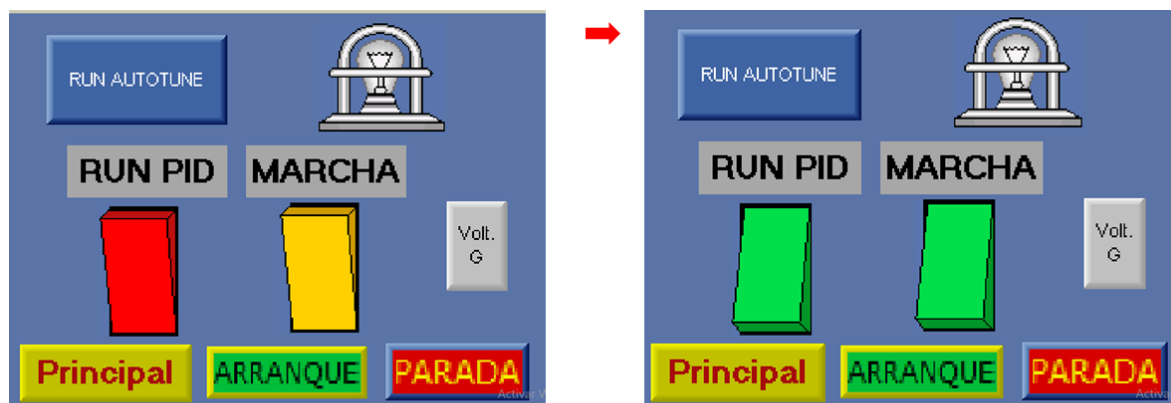


Figura 9.62. Pantallazo PID en el HMI del PLC.

Luego de correr el AUTOTUNE pasamos a colocar activa a la función PID.

Para estos se precisa tocar los dos botones de RUN PID y de MARCHA. Estos pasarán al color verde y con esto la función PID estará realizando el control del voltaje de salida del Generador G actuando sobre la consigna de frecuencia del VDF del motor M bajo la parametrización previamente realizada con el software PID Server y verificada con el corrido del AUTOTUNE.

El proceso requiere que los dos interruptores del pantallazo estén en verde y sean accionados manualmente. Ver figura 9.62

Con esto el PLC actuará sobre el variador electrónico conectado al motor M automáticamente aumentando o disminuyendo su frecuencia según esté la salida del voltaje por encima o por debajo del set-point. Esta regulación se puede hacer en el momento que se desee siguiendo esta secuencia.

Para parar el control PID basta con llevar los interruptores de RUN PID a rojo y de MARCHA a Amarillo.

Para ver el comportamiento del voltaje real, en conjunto con el valor del set point Se presiona con el dedo el botón Volt. G. Ver figura 9.63.



Figura 9.63 Pantallazo de la gráfica del voltaje de salida del Generador Ⓞ en función PID.

Se observan:

En color rojo el valor del voltaje real controlado por la función PID alrededor del punto consigna para el control, el cual se muestra en color verde.

Para el caso específico de la gráfica el control se realiza alrededor del punto 218 VAC.

La línea roja indica el voltaje real y la línea de color verde es el voltaje de control (SP) set-point.

Los pasos anteriores es la explicación correspondiente al funcionamiento básico del banco de trabajo. Con este procedimiento se puede hacer un buen manejo del equipo y generar y diseñar las pruebas que se requieran para conocer la maquina asíncrona en su funcionamiento como motor y como generador y además realizar comparaciones entre los dos modos de trabajo.

Más adelante se mostrarán algunos detalles especiales de los equipos que componen el banco tales como los medidores de parámetros eléctricos de Ⓜ y de Ⓞ, el variador de velocidad y el PLC.

Conclusión:

La descripción operativa del equipo está basada directamente en como se diseñó el banco de trabajo con su parte de potencia y control pensada como una maquina portátil que se debe energizar desde una toma trifásica del laboratorio.

Con esta descripción consideramos es posible operar el equipo en su funcionamiento básico y posibilita a quién lo utilice a explorar nuevas funcionalidades y pruebas que, con el estudio del PLC y de los equipos principales del banco, pueden hacerse dentro de las limitaciones de potencia de los maquinas asincronas y dentro de la capacidad de entradas y salidas del PLC.

Con esta descripción el estudiante puede entonces operar el equipo y usarlo de forma segura y procurando no demeritar sus elementos constitutivos.

Capítulo 10

Mediciones Basicas al Sistema.

Objetivo específico:

Realizar mediciones al sistema con la instrumentación implementada en el banco de trabajo.

Mediciones de variables eléctricas la grupo Motor Generador (M) - (G).

Medición de la velocidad angular a todo el ensamble (M) - (G)

Medición de las temperaturas individuales de las carcasas de Motor (M) y de Generador (G).

Mostrar la forma de obtener estas medidas en el tablero de trabajo y en la PC del sistema.

Las variables instrumentadas en el banco de trabajo fueron voltajes - corrientes de fase, velocidad de giro del eje y temperaturas de los carcasas de las maquinas asíncronas. Para la medición de voltaje y corriente se emplearon medidores de parámetros eléctricos marca LOVATO modelo DMG610 (uno para el motor (M) y otro para el generador (G)).

La figura 10.1 muestra fotografías del tipo de medidor utilizado.



Figura 10.1. Fotografías de los medidores de variables eléctricas utilizados en el banco de trabajo. Marca LOVATO. Modelo DMG610

Los multímetros DMG600 y DMG610 están diseñados para ofrecer máxima facilidad de uso con una gran variedad de funciones avanzadas. Realizados para montarse en panel con tamaño estándar de 96x96 mm, combinan el diseño del frontal con una instalación práctica y la posibilidad de expansión por la parte trasera, en la que se puede alojar un módulo de expansión (EXP). La parte frontal dispone de la interface óptica de infrarrojos que permite realizar la programación por USB. La pantalla LCD retroiluminada proporciona una interface de usuario clara e intuitiva. El modelo DMG610 dispone de una interface de comunicación RS485 aislada con protocolo Modbus para permitir la supervisión. Ver la figura 10.2.



Figura 10.2. Fotografías de la interface de comunicación RS485 opto aislada con protocolo MODBUS para parametrización y monitoreo en los medidores de parámetros eléctricos. Marca LOVATO

El esquema de conexión de estos multímetros se muestra en el siguiente diagrama. Ver figura 10.3.

Se sugiere también ver el capítulo 18 ANEXOS.

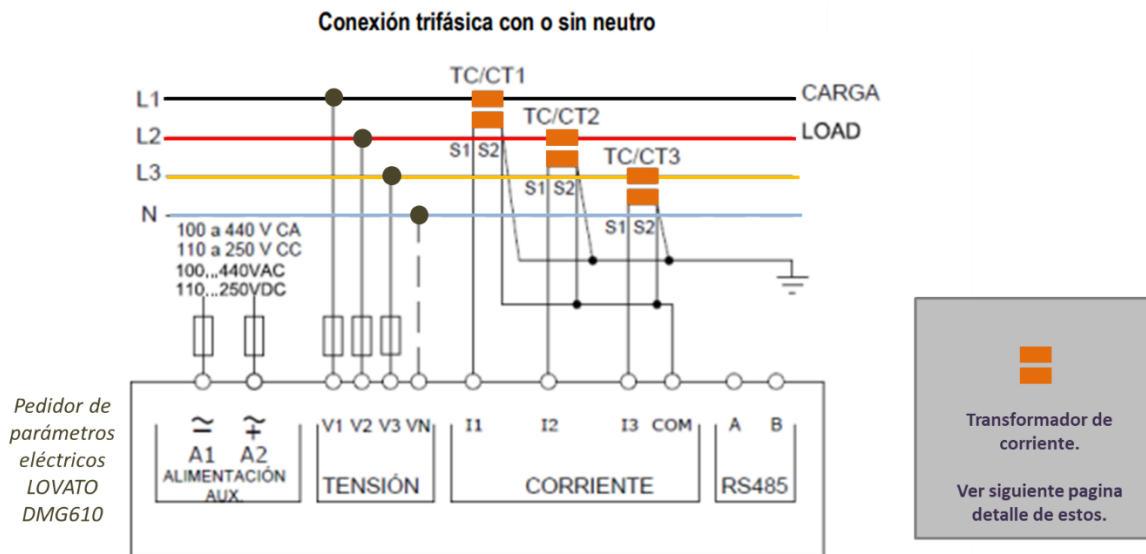


Figura 10.3. Esquema de conexión de los multímetros LOVATO DMG610

El esquema de conexión de estos multímetros muestra la utilización de transformadores de corriente TC para adecuar la señal de corriente a los medidores. La fotografía abajo en la figura 10,4 muestra los TC usados en el montaje del banco de trabajo.

Se sugiere también ver el capítulo 18 ANEXOS.



Figura 10.4. TC's marca CAMSCO relación 50/5 A, para adecuar señales de corriente al DMG610.

Los DMG610 entregan una medida de verdadero valor eficaz (TRMS) de alta precisión y poseen gran variedad de medidas disponibles, incluidas THD de tensión y corriente . A continuación se expone la tabla de datos entregados por este tipo de multímetros. Ver figura 10.5.

1	TENSIÓN ENTRE FASES V(L1-L2), V(L2-L3), V(L3-L1), V(LL)EQV	HI	LO	AV	
2	TENSIÓN DE FASE V(L1-N), V(L2-N), V(L3-N), V(L-N)EQV	HI	LO	AV	
3	CORRIENTE DE FASE Y NEUTRO I(L1), I(L2), I(L3), I(N)	HI	LO	AV	MD
4	POTENCIA ACTIVA P(L1), P(L2), P(L3), P(TOT)	HI	LO	AV	MD
5	POTENCIA REACTIVA Q(L1), Q(L2), Q(L3), Q(TOT)	HI	LO	AV	MD
6	POTENCIA APARENTE S(L1), S(L2), S(L3), S(TOT)	HI	LO	AV	MD
7	FACTOR DE POTENCIA PF(L1),PF(L2),PF(L3),PF(EQ)	HI	LO	AV	
8	DESEQUILIBRIO DE POTENCIA ACTIVA L1-L2, L2-L3, L3-L1	HI	LO	AV	
9	FRECUENCIA Hz	HI	LO	AV	
10	ASIMETRÍA ASY(VLL)	HI	LO	AV	
11	ASIMETRÍA ASY(VLN)	HI	LO	AV	
12	ASIMETRÍA ASY(I)	HI	LO	AV	
13	DIST. ARMÓNICA DE TENSIÓN L-L THD-V(L1-L2), THD-V(L2-L3), THD-V(L3-L1)	HI	LO	AV	
14	DIST. ARMÓNICA DE TENSIÓN L-N THD-V(L1),THD-V(L2),THD-V(L3)	HI	LO	AV	
15	DIST. ARMÓNICA DE CORRIENTE THD-I(L1), THD-I(L2) THD-I(L3)	HI	LO	AV	
16	CONTADORES DE ENERGÍA (L1) kWh+(L1)	TOT			PAR
17	kWh-(L1)	TOT			PAR
18	CONTADORES DE ENERGÍA (L2) kWh+(L2)	TOT			PAR
19	kWh-(L2)	TOT			PAR
20	CONTADORES DE ENERGÍA (L3) kWh+(L3)	TOT			PAR
21	kWh-(L3)	TOT			PAR
22	CONTADORES DE ENERGÍA (L1) kVArh+(L1)	TOT			PAR
23	kVArh-(L1)	TOT			PAR
24	CONTADORES DE ENERGÍA (L2) kVArh+(L2)	TOT			PAR
25	kVArh-(L2)	TOT			PAR
26	CONTADORES DE ENERGÍA (L3) kVArh+(L3)	TOT			PAR
27	kVArh-(L3)	TOT			PAR

Figura 10.5. Tabla de datos entregados por cada medidor DMG610.

Los diferentes parámetros de los medidores de variables eléctricas se pueden configurar por medio del puerto óptico frontal mediante el uso de la llave de programación USB tal como se muestra en la grafica anterior.

Este puerto de programación ofrece las ventajas siguientes:

- Permite configurar y mantener el DMG600-610 sin necesidad de acceder a la parte trasera del dispositivo y de abrir el cuadro eléctrico.
- Está aislado galvánicamente de los circuitos internos del DMG600-610, lo que garantiza al máximo la seguridad del usuario.
- Permite transferir datos a gran velocidad.
- Ofrece protección IP54 en la parte delantera.
- Limita la posibilidad de que se acceda a la configuración del dispositivo sin autorización, puesto que se requiere el uso de la llave de programación CX01.

Mediante el software Xpress de Lovato se pueden transferir los parámetros de configuración (previamente configurados) del medidor de variables eléctricas DMG610 al ordenador y viceversa.

A continuación se muestran varios ejemplos de mediciones realizadas al sistema con este software y se dan algunas explicaciones al respecto. Ver figuras desde la 10.6 hasta la 10.14

Cabe anotar acá que son innumerables las mediciones que se pueden realizar con estos multímetros dada la multiplicidad de estados que se pueden tener en un grupo M - G Expondremos acá solo unas pocas mediciones realizadas al equipo de 1,2 HP.

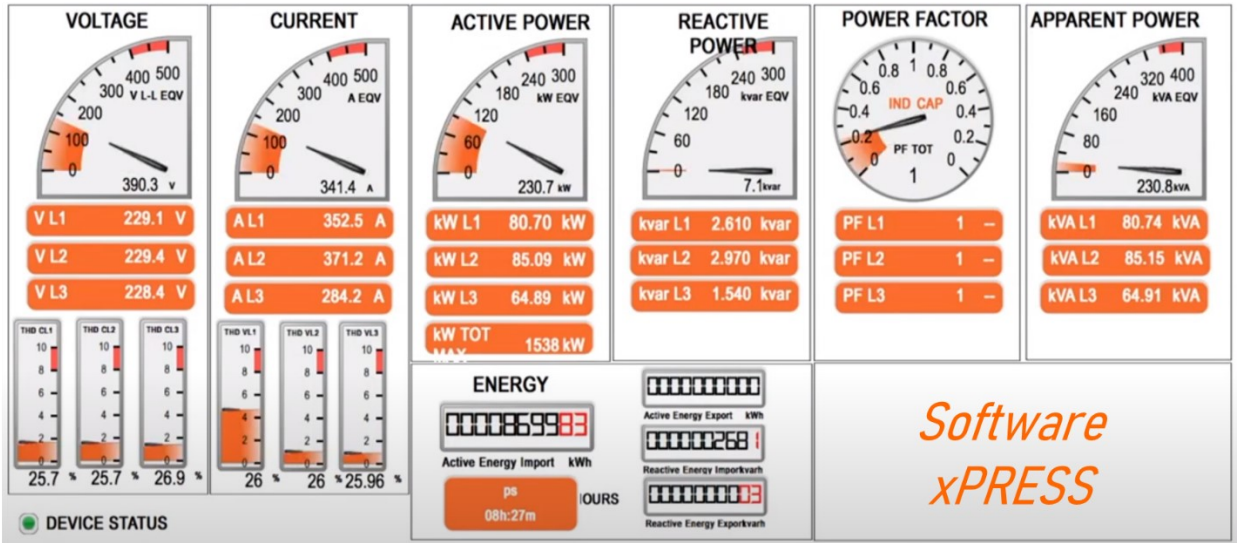


Figura 10.6. Mediciones de variables eléctricas registradas por el software Xpress. Este pantallazo es genérico del software xPRESS y no muestra datos de los equipos del banco de trabajo.

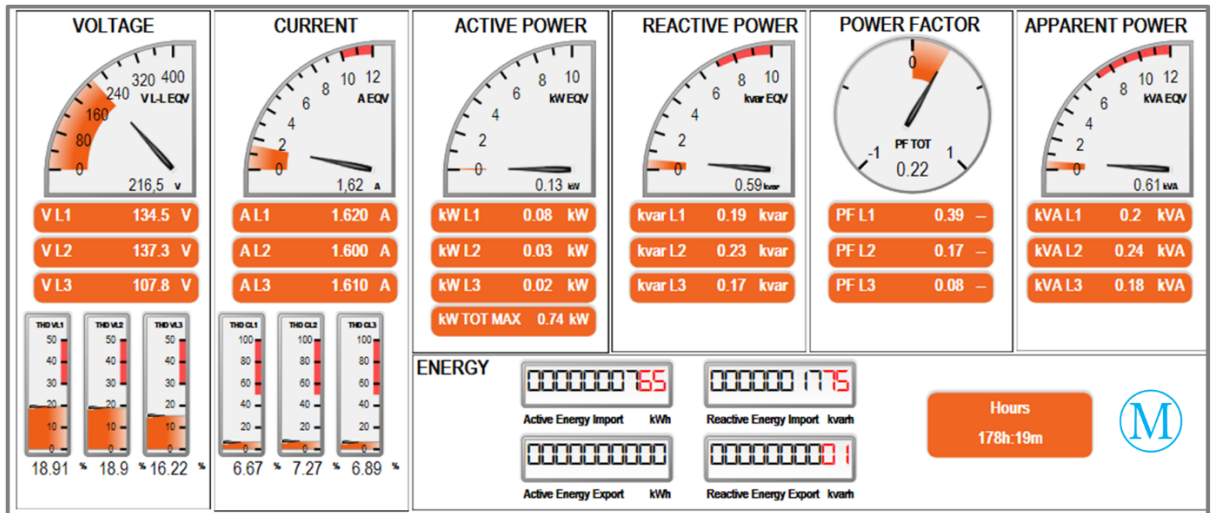
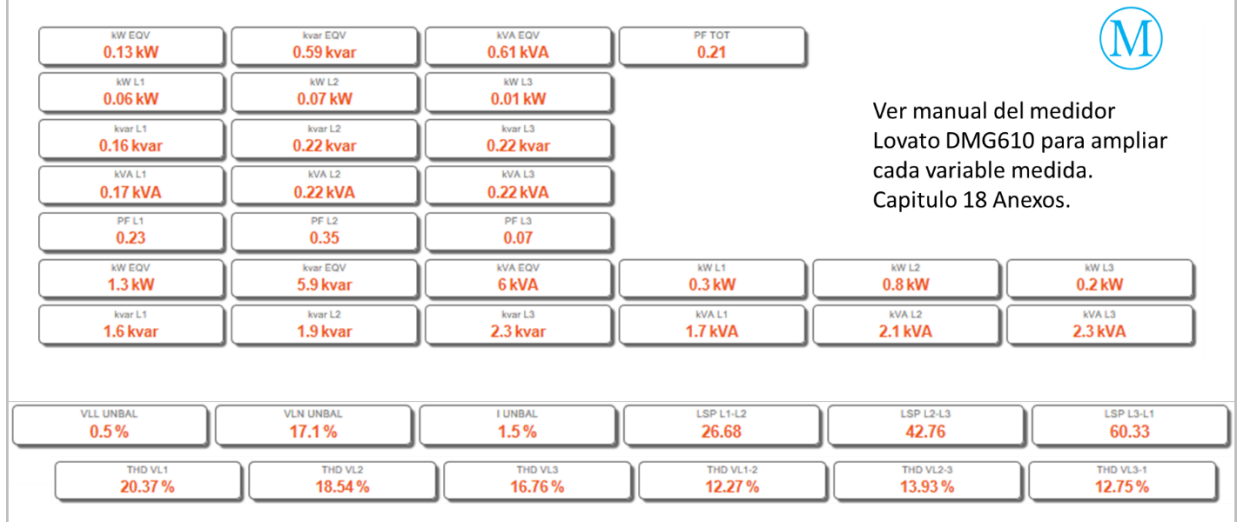


Figura 10.7. Ensayo para la medición de corriente con el motor \mathcal{M} en vacío. Máquina asíncrona de 1,2 HP. Lado Motor \mathcal{M} . Con los resultados de este ensayo es posible calcular algunos de los valores circuitales de la caracterización de la máquina.

Registro de valores puntuales de las variables eléctricas. Software Xpress



Ver manual del medidor Lovato DMG610 para ampliar cada variable medida. Capitulo 18 Anexos.

Figura 10.8. Mas datos entregados por el medidor en el ensayo en vacío del Motor del grupo M - C de 1,2 HP.



Figura 10.9. Ensayo para la medición de corriente con el motor M en vacío. Trending para la corriente promedio durante el ensayo. La maquina probada correspondió al motor del grupo M - C de 1,2 HP.

ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE CORRIENTE CON EL MOTOR (M) EN VACIO

Con lo anterior observamos que es sencillo realizar el triangulo de potencias y ver desde allí comportamientos de la maquina.

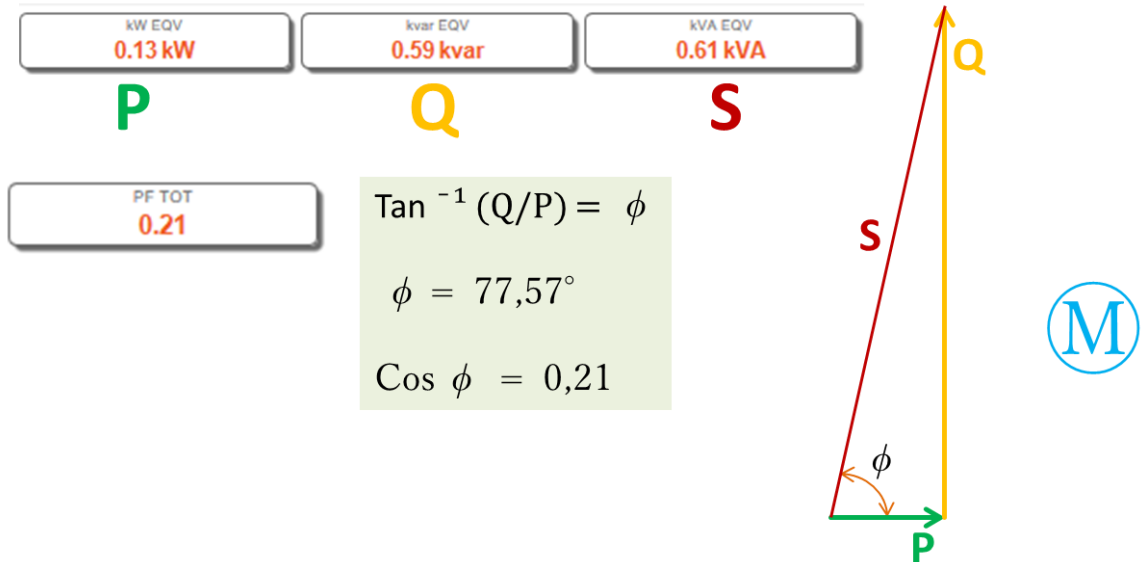


Figura 10.10. Con los datos obtenidos en el ensayo en vacío para el motor del grupo de 1,2 HP se elabora el triangulo de potencias, el cual es útil para determinar variadas características de construcción y de funcionamiento del equipo.

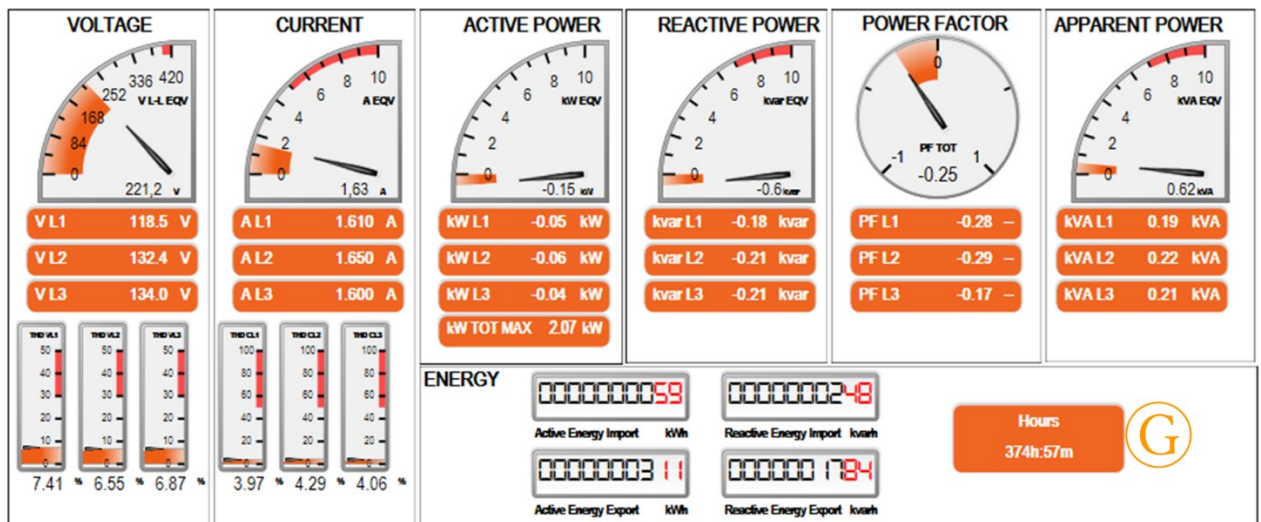


Figura 10.11. Ensayo para la medición de corriente con el generador (G) trabajando como motor en vacío. Ensayo para la maquina asincrona (G) del grupo de 1,2 HP. Este ensayo se realiza para buscar algunos de los valores de los elementos circuitales que caracterizan esta maquina asincrona en especifico.

ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DE CORRIENTE CON EL MOTOR $\text{\textcircled{G}}$ EN VACIO

Con lo anterior observamos que es sencillo realizar el triangulo de potencias y ver desde allí comportamientos de la maquina.

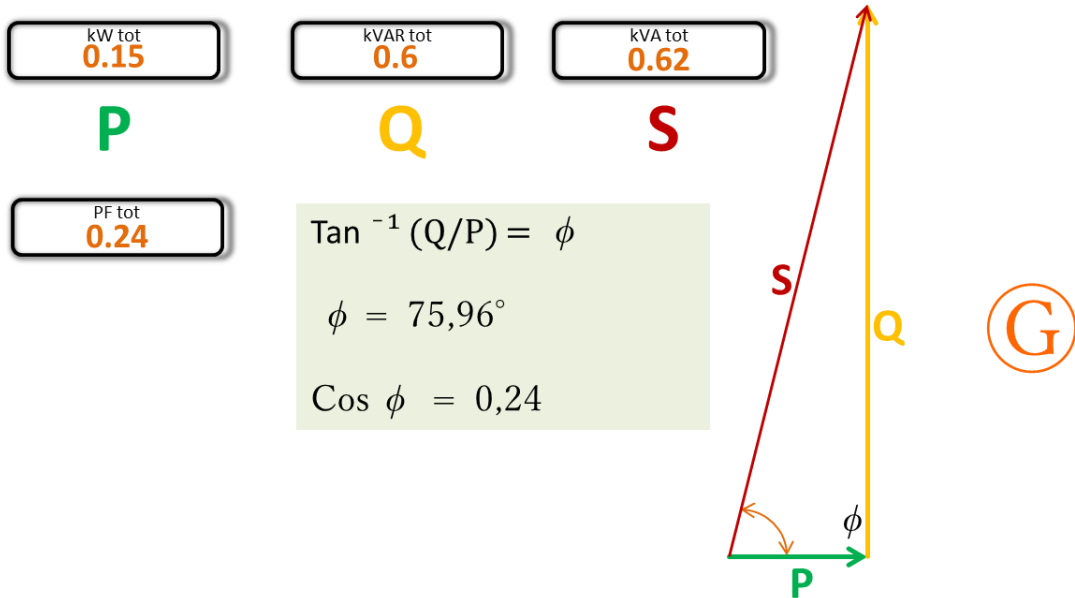
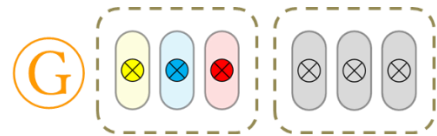


Figura 10.12. Con los datos obtenidos en el ensayo en vacío para el generador del grupo de 1,2 HP se elabora el triangulo de potencias, el cual es útil para determinar variadas características de construcción y de funcionamiento del equipo.



Ensayos con carga. Mediciones al generador $\text{\textcircled{G}}$ con carga.

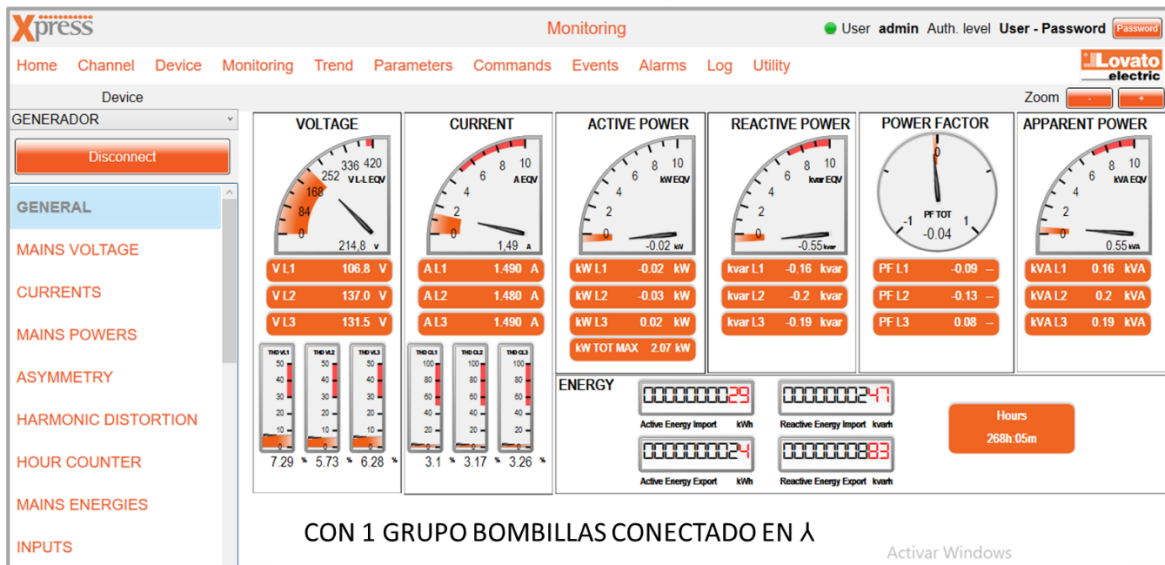
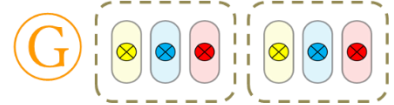


Figura 10.13. Resultados del ensayo con carga. Estos valores corresponden al Generador $\text{\textcircled{G}}$ entregando energía. Para este caso se tenía como carga un grupo de bombillas LED de 7 W cada una conectadas en configuración λ .



Ensayos con carga. Mediciones al generador $\text{\textcircled{G}}$ con carga.

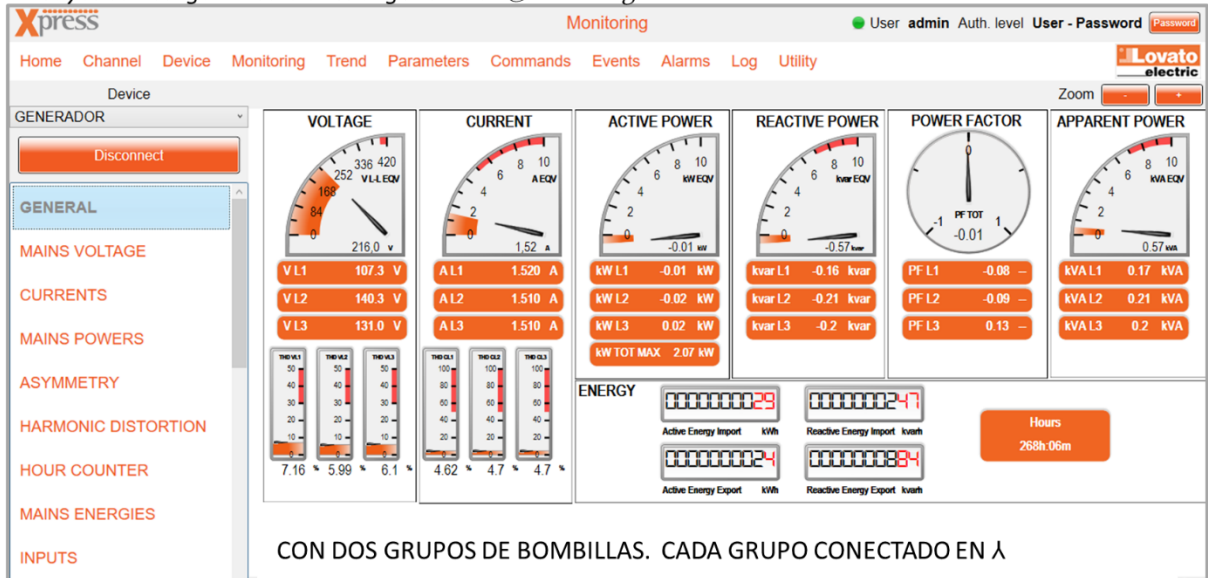


Figura 10.14. Resultados del ensayo con carga. Estos valores corresponden al Generador $\text{\textcircled{G}}$ entregando energía. Para este caso se tenían como carga dos grupos de bombillas LED de 7 W cada una conectadas en configuración Δ cada grupo.

Para la medición de velocidad angular en unidades de *rpm* se empleó un encoder E50S86-360-3-T-24 de la marca AUTONICS de 360 pulsos por revolución, el cual se acoplo mecánicamente al eje de rotación del generador asíncrono.

La salida de pulsos del encoder se acoplo directamente al PLC Unitronics a una entrada especializada para encoder que posee este equipo. Ver diagrama figura 10.15.

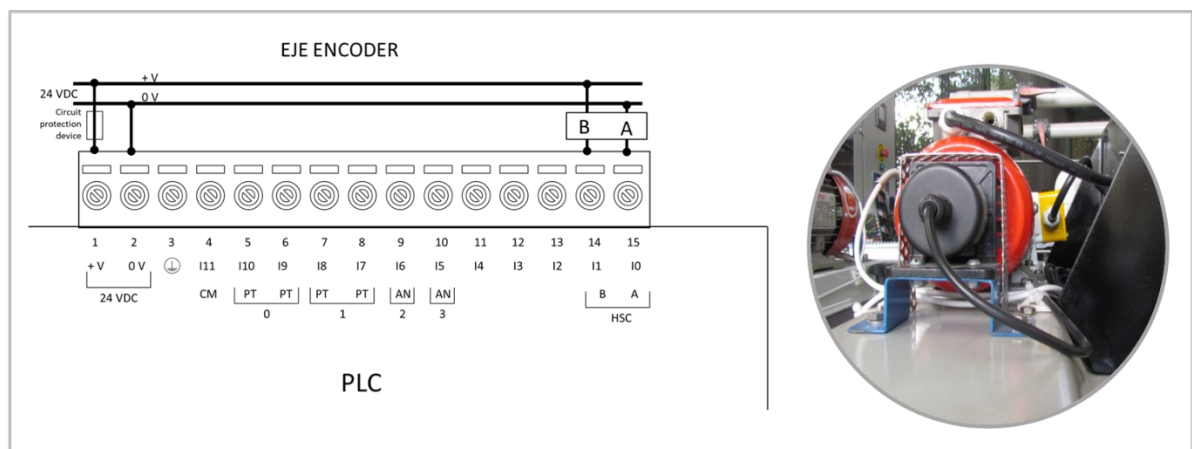


Figura 10.15. Medición de la velocidad angular en el grupo $\text{\textcircled{M}}$ - $\text{\textcircled{G}}$. Se muestra el encoder en el generador y la entrada de la señal de este en el PLC.

El registro de la velocidad se muestra en el pantallazo RPM del HMI del PLC y también en una curva de tendencia que también se muestra en el HMI del PLC. Ver figura 10.16.

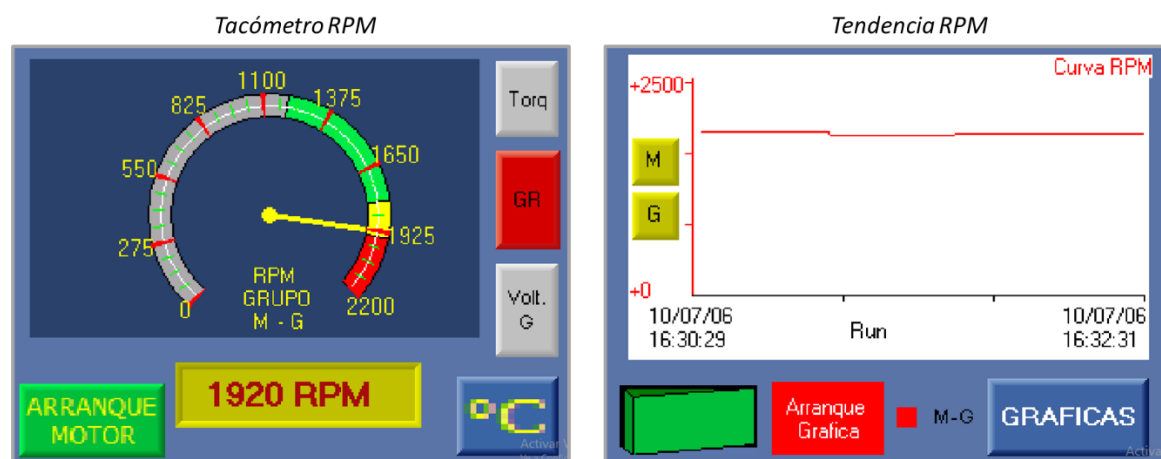


Figura 10.16. Pantallazo HMI para el registro de las RPM del grupo M - G . Se muestra la velocidad instantánea en un reloj análogo (simulado) y el trending de las rpm en un periodo determinado.

Con el registro de la velocidad real en el eje del generador asíncrono, podemos llegar al valor del deslizamiento ya que se conocen los valores de, la frecuencia eléctrica, el número de polos de la maquina y la velocidad síncrona, tanto en motor como en generador. Ver figura 10.17

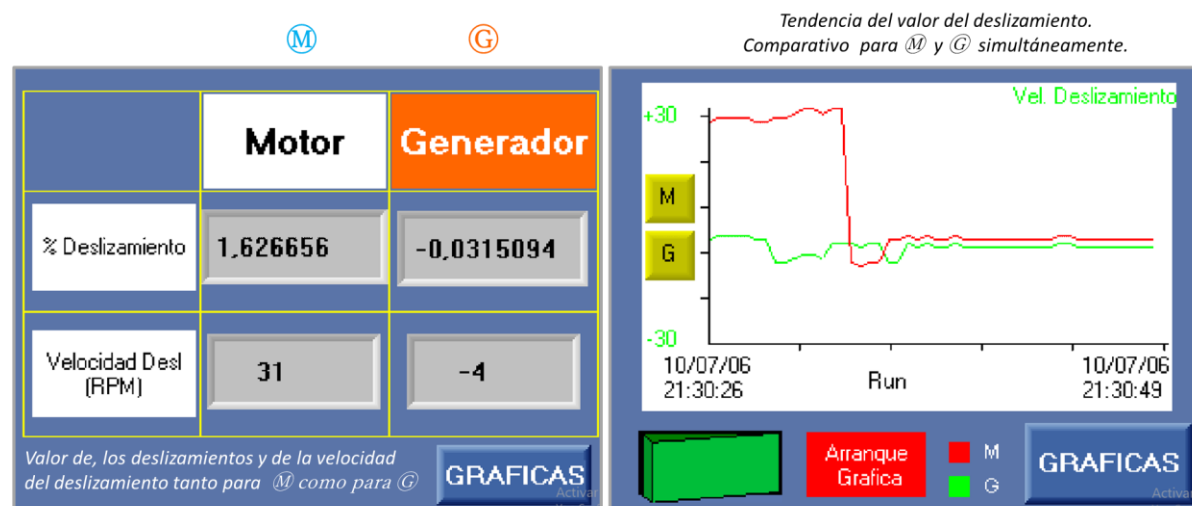


Figura 10.17. Esquema en tabla online del valor del deslizamiento obtenido tanto para M como para G obtenido a partir de valores de la velocidad del eje mecánico, de la lectura de la frecuencia real para M y para G y de los polos de cada equipo. Se observa el valor instantáneo y el trending en un lapso de tiempo determinado. Como se puede observar los deslizamientos son antagónicos.

Para la medición de las Temperatura de la carcasa de tanto motor M como para generador G en unidades de $^{\circ}\text{C}$ se emplearon sondas térmicas del tipo PT100 (Ver anexos en capítulo 18) para visualizar temperaturas entre los 20°C y los 100°C .

La entrada de la señal de temperatura al PLC es una entrada directa a puertos de señales de temperatura programables según sea el tipo de sensor que se trabaje (para nuestro caso PT100). Ver figura 10.18.

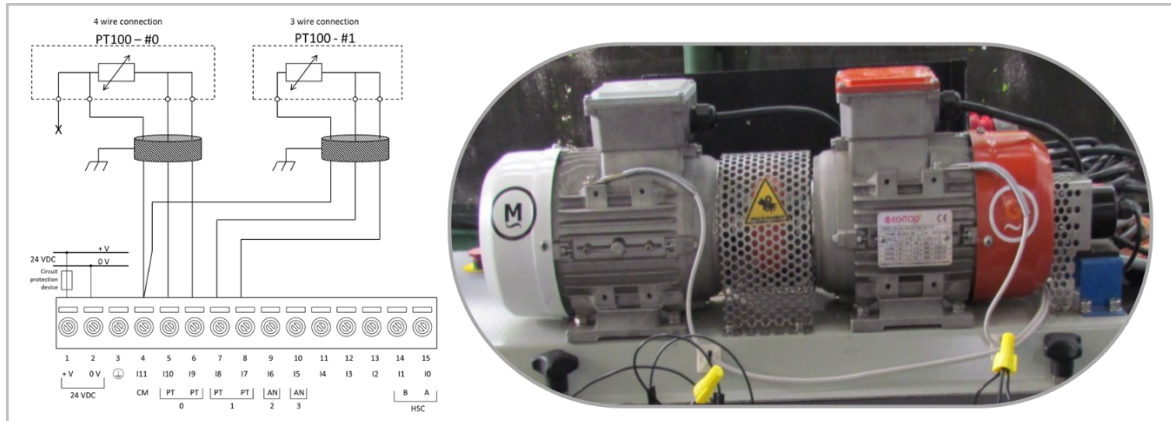


Figura 10.18. Fotografía de los sensores de temperatura que llevan las maquinas del grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} . Son sensores tipo PT100 de contacto superficial en las carcasas de los equipos. El esquema de la izquierda muestra donde y como se conectan las señales de las sondas térmicas al PLC.

El registro de la temperatura de la superficie de las carcasas de Motor \textcircled{M} y Generador \textcircled{G} se observa en el pantallazo TEMPERATURA del HMI del PLC y también en una curva de tendencia que también se muestra en el HMI del PLC (*Temperaturas*). Ver figura 10.19.

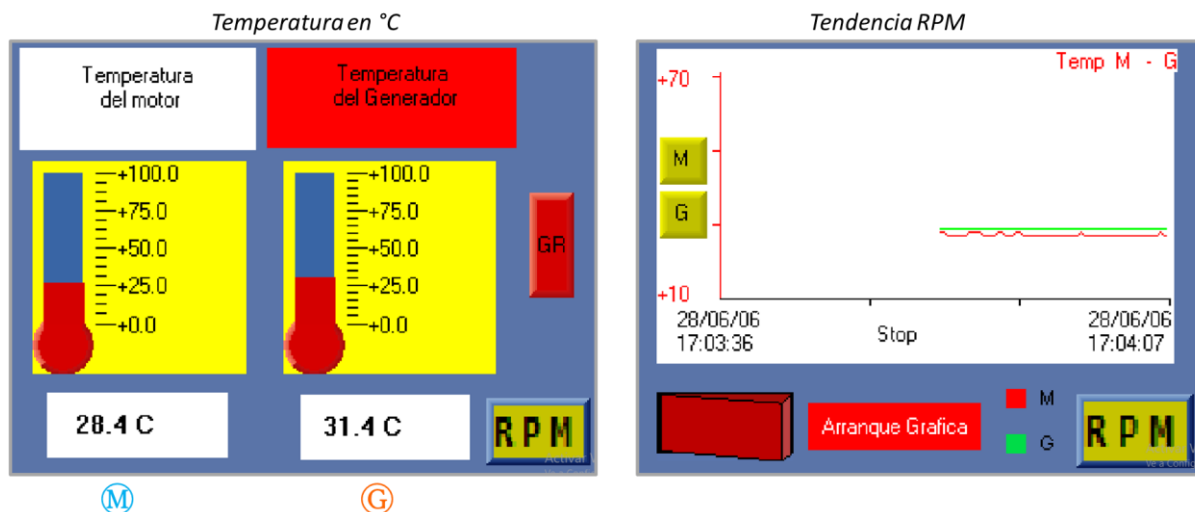


Figura 10.19. Esquema en tabla online del valor de la temperatura superficial de la carcasa, obtenido tanto para \textcircled{M} como para \textcircled{G} obtenido. El HMI muestra esquemas tipo termómetro de 0° a 100° C. Se observa el valor instantáneo y el trending en un lapso de tiempo determinado. Inicialmente las temperaturas son similares en baja carga. Se esperan respuestas similares para exigencias con valores nominales a carga nominal.

Conclusión:

La instrumentación del banco de trabajo permite obtener de una manera fácil y rápida el resultado de la medición gran cantidad de las variables electricas, de velocidad angular y de temperatura de los dos equipos que conforman el grupo $\text{M} - \text{G}$.

Esto permite comprender los estados de cada unidad, ver su estabilidad, ver su respuesta ante perturbaciones y analizar en detalle el estado estable de todo el sistema. Considero que proporciona una buena información, que con la ayuda de la teoria de las maquinas asincronas, podemos comprender la verdadera utilidad de estos equipos en sus diferentes estados.

El equipo posee además una PC en donde es posible tener los datos mencionados arriba con miras a realizar una practica de laboratorio o a explorar de uan **forma más** detallada algunos de los aspectos del desempeño del grupo $\text{M} - \text{G}$.

Capítulo 11

Diseño de Practica de Laboratorio para Estudiantes

Objetivo específico:

Diseñar una practica de laboratorio para observar la eficacia de la maquina asincrona cuando se le lleva al modo de trabajo como generador.

Mostrar al estudiante como un Motor de Inducción normal puede llevarse al modo de generación y llevarlo a deducir sus implicaciones.

Mostrar un banco de trabajo seguro y amigable que lleve a ahondar más en el estudio de las máquinas asíncronas.

Practica GRUPO MOTOR – GENERADOR M-G de Inducción.

1. Comprensión del sistema motor. Ver capítulo 5. Detalle del primo motor.
2. Historia del motor de inducción. Leer en internet previo a la practica.
3. Esquema motor. Ver capítulo 1. Marco teórico, y ampliar si se requiere en internet y en los libros señalados en la bibliografía.
4. Encendido con variador de velocidad. Remítase a capítulo 9 Funcionamiento general del equipo.

5. Mediciones de corriente motor. Ver capítulo 9 Funcionamiento general del equipo y capítulo 18 Anexos, en donde se exponen los medidores de parámetros eléctricos.
6. Medidor de parámetros eléctricos. Verlos tanto para motor como para generador. Capítulo 18 Anexos.
7. Concepto de potencia. Buscar en internet concepto de potencia y ver capítulo 1 Marco teórico y exposición del profesor.
8. Generador de inducción. Ver capítulo 1 Marco teórico, ampliar esta información consultando en internet.
9. Antes de generar. Ver capítulo 9 Funcionamiento general del equipo y seguir paso a paso.
10. Sobrepasando la velocidad de sincronismo y generando. Ver capítulo 9 Funcionamiento general del equipo y seguir paso a paso.
11. Carga básica. Ver capítulo 9 Funcionamiento general del equipo y seguir paso a paso.
12. Capacitores. Ver capítulo 8 cálculo de condensadores y capítulo 9 Funcionamiento general del equipo y seguir paso a paso.

Trayectoria de la practica:

1. Ejecución de la práctica (ver funcionar al generador con carga)
2. Realizar las Mediciones solicitadas..
3. Realizar el Informe.

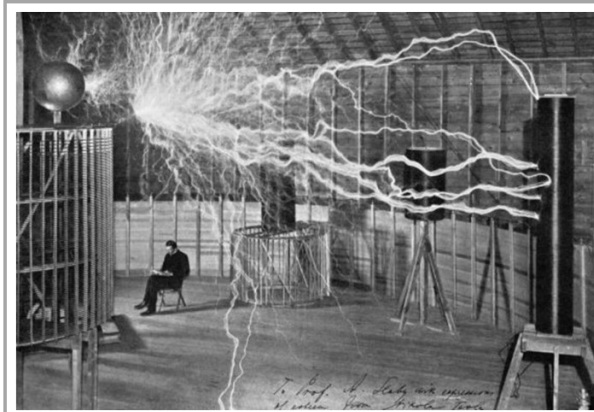
Desarrollo de la práctica.

1. Historia por el profesor.

El motor de inducción fue diseñado primordialmente por Nicola Tesla (1887).

Nikola Tesla, quien inventó independientemente el motor de inducción en 1887 y obtuvo una patente en mayo de 1888. En el mismo año, Tesla presentó su trabajo Un nuevo sistema de motores de corriente alterna y transformadores al Instituto Estadounidense de Ingenieros Eléctricos en estados Unidos de America.

Ver figura 11.1.



*Nacimiento: 10 de julio de 1856, Smiljan, Croacia
Fallecimiento: 7 de enero de 1943, Wyndham New Yorker Hotel, Nueva York, Estados Unidos
Educación: Universidad Tecnológica de Graz (1875–1878), MÁS
Premios: Premio y Medalla John Scott, Medalla Edison IEEE, MÁS*

Nikola Tesla fue un inventor, ingeniero eléctrico, ingeniero mecánico y físico estadounidense de origen serbocroata. Se le conoce sobre todo por sus numerosas invenciones en el campo del electromagnetismo, desarrolladas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

Tomado de Internet: https://es.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla

Figura 11.1. Pequeña reseña bibliográfica de Nikola Tesla

Nota de Internet:

En 1889, el ruso Mikhail Dolivo-Dobrovolsky inventó el motor de inducción trifásico, de ambos tipos rotor enjaulado y rotor bobinado con reóstato de arranque, y el transformador de tres brazos en 1890. Ver figura 11.2.

Tras un acuerdo entre AEG y Maschinenfabrik Oerlikon, junto a Charles Eugene Lancelot Brown desarrollaron modelos más grandes: una jaula de ardilla de 20 CV y un rotor bobinado de 100 CV con un reóstato de arranque.



*Nacimiento: 2 de enero de 1862, Gátchina, Rusia
Fallecimiento: 15 de noviembre de 1919, Heidelberg, Alemania
Educación: Universidad Técnica de Darmstadt*

Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky
Fue un ingeniero, electricista e inventor polaco-ruso. Como uno de los fundadores de los sistemas eléctricos polifásicos, desarrolló el generador eléctrico trifásico y un motor eléctrico trifásico y estudió las conexiones en estrella y triángulo.

Tomado de Internet: https://en.wikipedia.org/wiki/Mikhail_Dolivo-Dobrovolsky

Figura 11.2. Pequeña reseña bibliográfica de Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky

El motor es un dispositivo conocido primordialmente por su capacidad de convertir energía eléctrica en energía cinética.

Esta conversión se utiliza para innumerables aplicaciones en la vida normal.

Un sistema de bombeo es un ejemplo. Tal como los que observamos en las bombas del laboratorio.

Además muchos acueductos usan grandes plataformas con varias unidades de bombeo de las tipo centrifugo. Ver figura 11.3



Tomado de Internet: <https://www.youtube.com/watch?v=YJuk7SQP6e8>

Figura 11.3. La Nucía. Estación Bombeo de Agua Potable, España.

En la práctica del laboratorio simularemos el sistema hidráulico con un variador de velocidad el cual comanda al motor M de Inducción trifásico. Ver figura 11.4.

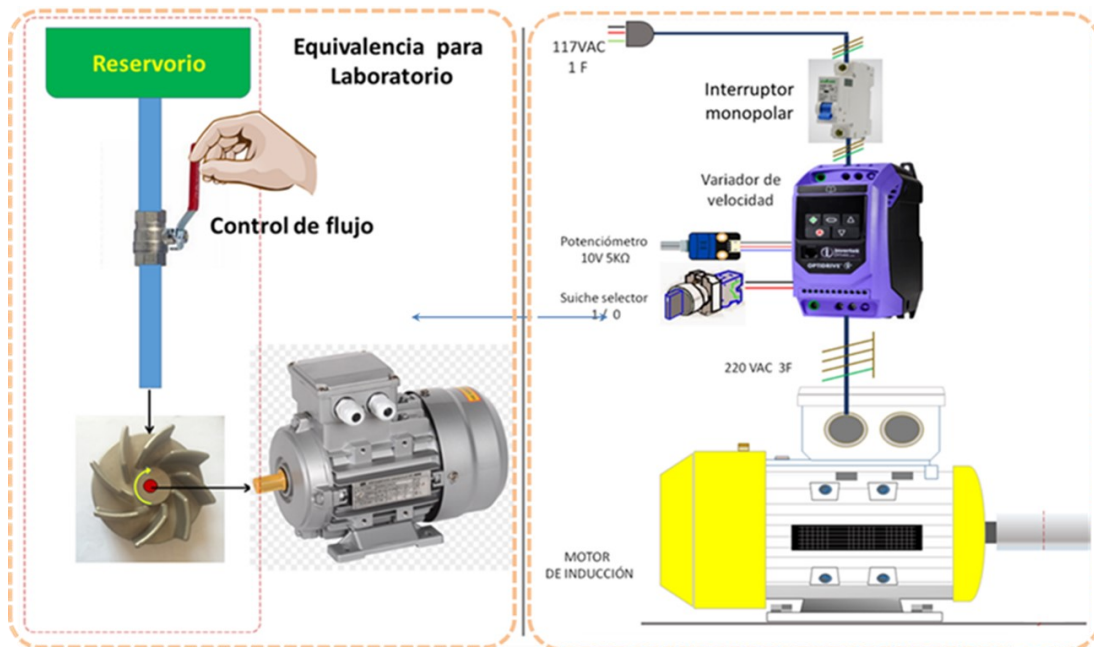
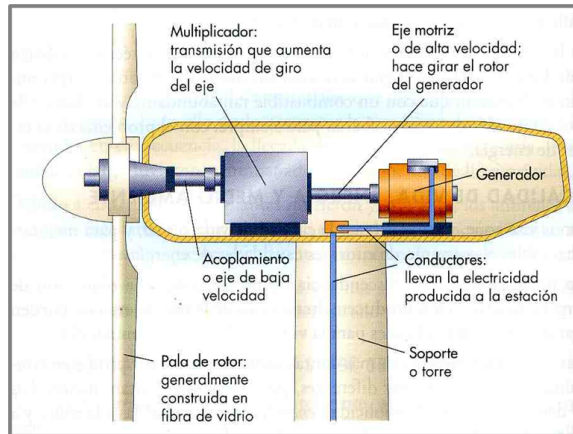


Figura 11.4. Simulación de un chorro de agua que impulsa “ un impeler” para impulsar un generador de inducción. Esta simulación se realiza con un motor de inducción asistido por un VDF (Variador de frecuencia) con consigna de velocidad por potenciómetro.



Imágenes tomadas de internet:

https://2.bp.blogspot.com/-pvx_qyXpDqM/T8uLc6Deb5I/AAAAAAAAAGc/OWatxwQPI24/s1600/AEROG.png

Figura 11.5. Aerogenerador. Un aerogenerador es un generador eléctrico que es movido por unas turbinas accionadas por el viento, es decir que la energía cinética del aire en movimiento proporciona energía mecánica a un rotor (hélice) que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador de inducción, convirtiéndola en energía eléctrica.

Las partes principales de un aerogenerador son el rotor, la caja de engranajes, el generador, la torre y el sistema de control. Si nos fijamos en aerogeneradores en funcionamiento podemos observar que la velocidad de movimiento de las hélices es muy lenta, pero mediante la caja de engranajes esa velocidad lenta de las palas se transforma en velocidad rápida para alimentar al generador.

La mayoría de los aerogeneradores modernos son de tres hélices, de eje horizontal y con mecanismos eléctricos. El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina para obtener el máximo rendimiento o para protegerlo ante vientos peligrosos.

Otra aplicación del generador de inducción: el Aero generador eólico, el cual, por lo general, es impulsado por una máquina de inducción asincrónica en modo Generador

Ⓒ. Ver figura 11.5.

El motor más conocido en el mundo por su facilidad en el manejo, por su bajo mantenimiento, por su bajo costo y por sus facilidades en la conexión es el motor Asincrónico de inducción.

Este tipo de motor trabaja con conceptos de la inducción electromagnética y básicamente se trata de dos campos electromagnéticos, uno persiguiendo al otro sin alcanzarlo en ningún momento.

Para nuestro caso las unidades marcadas como:

Ⓜ las llamaremos el motor impulsor.

Ⓒ las llamaremos el Generador.

Si tenemos un sistema de bombeo trabajando al revés obtendremos energía eléctrica en los bornes del equipo asincrónico. Tenemos un generador de energía eléctrica.

Nuestro grupo Ⓜ - Ⓒ lo constituyen unidades asincrónicas de inducción y son lo que llamaríamos normalmente motores comunes y corrientes. Ver figura 11.6.



Figura 11.6. Símbolos usados para identificar a la maquina asincrona para cuando trabaja en modo Motor M o en modo Generador G .

OBJETIVO:

Conocer el grupo MOTOR – GENERADOR (M - G) de inducción para tener comprender los usos que se le pueden dar a una bomba (centrifuga) cuando trabaja en su modo inverso, es decir cuando se encuentra impulsada por un fluido y NO impulsando un fluido.

Antecedentes teóricos.

Una maquina asincrónica de inducción es un equipo que traduce un tipo de energía en otro tipo de energía. Ver figura 11.6 en donde se muestra un registro fotografico de varias maquinas asincrona sobre todo en su modo motor M .

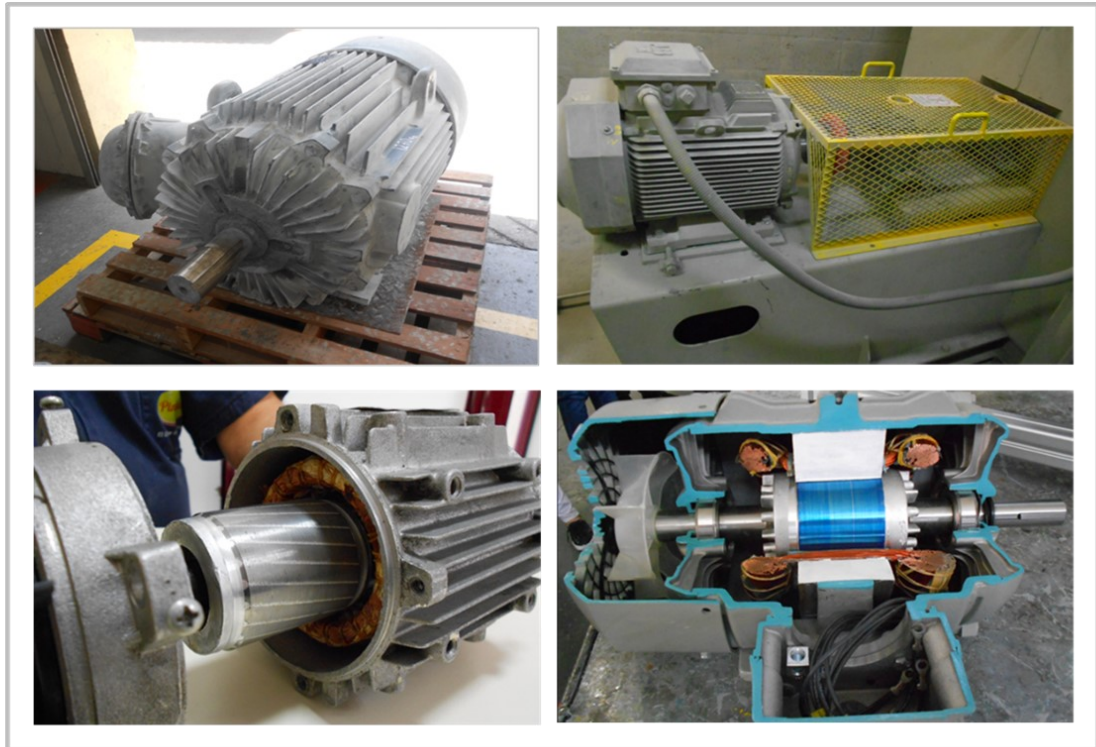


Figura 11.7. Maquinas asíncronas . Arriba Izquierda: Motor de 100 HP dispuesto para un mezclador en una fabrica de pinturas. Arriba derecha: Motor de 50 HP dispuesto para un sistema de extracción de polvos en una planta de alimentos. Abajo Izquierda: Desensamble de un motor de 1.5 HP, para mantenimiento. en una banda transportadora en un centro de distribución de mercancías. Abajo derecha: Corte una maquina síncrona de 1,0 HP para compresión del funcionamiento con fines didácticos.

Motores asincronos de induccion. Ver figura 11.7.

Placa motor: ver figura 11.8

Ejercicio: Detallar una placa de un motor de Inducción. Realizar explicación de cada ítem. Por ejemplo: Realice un dibujo de la placa de uno de los motores del banco de trabajo.

Hacer énfasis en la potencia y velocidad.




ECHTOP [®] MOTOR							CE	
TYPE: TM 132S2-2 T3A		132S2-2		(H)	S1-100%	2014	IEC60034	
SN			ThCl. F	IP55	IMB3	N.W.:52 KGS		
V Δ / Y	Hz	min ⁻¹	kW	A	COSφ	IE3-90.1(100%)		
400/690	50	2930	7.5	13.4/7.7	0.9	90.2(75%)		
460/795	60	3520	9	13.4/7.7	0.9	89.1(50%)		
						BEARING DE-NDE: 6308-6208		
Distributed by Dimotor S.A.								

Figura 11.8. Placa Motor de una maquina asincrona de inducción trifásica. Para un una potencia de 7.5 kW a 50 Hz o de 9 kW a 60 Hz.

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas.

Potencia: Definir:

HP. Definir.

CV. Definir.

KW. Definir.

El caballo de fuerza (HP) es una unidad que fue propuesta a finales del siglo XVIII por el ingeniero escocés James Watt, quien mejoró, diseñó y construyó máquinas de vapor, además de promover el uso de éstas en variadas aplicaciones.

Watt propuso esta unidad para expresar la potencia que podía desarrollar la máquina de vapor (en su época), con respecto a la potencia que desarrollaban los caballos. Estos animales eran las «máquinas» de trabajo que se usaban ampliamente para mover molinos, levantar cargas, mover carruajes y muchas otras actividades.

Tras varios experimentos y aproximaciones de cómo medir y expresar la potencia de los caballos, James Watt estimó que un caballo podía levantar 330 libras-fuerza a una altura de 100 pies en un minuto.

Siendo:

$$\text{POTENCIA} = \frac{\text{TRABAJO}}{\text{TIEMPO}} = \frac{\text{FUERZA POR DISTANCIA}}{\text{TIEMPO}}$$

Entonces:

$$1 \text{ HP} = \frac{(330 \text{ lbf}) \times (100 \text{ pies})}{1 \text{ min}} = 33000 \text{ (lbf.pie/min)} = 550 \text{ (lbf.pie/seg)}$$

Recuérdese que la definición de esta unidad de potencia, el HP, es una estimación que representa la potencia que desarrollan los caballos en varias aplicaciones o usos.

Energía:

Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc.

Existe la energía atómica o nuclear; energía cinética; energía hidráulica; energía solar; energía eléctrica; la energía eólica la energía electroquímica, etc.

Joule. Definir.

KWH. Definir.

EQUIPO:

Grupo Motor Generador del Laboratorio.

Instalaciones del laboratorio.

PC. Computador Personal.

TV. Televisor.

EPP. Elementos de Protección Personal.



Figura 11.9. Banco de trabajo. Grupos Motor – Generador de inducción asíncrono trifásico. Posee dos grupos M - G : uno de 0,7 HP y otro de 1,2 HP.

El grupo Motor – Generador M - G :

El motor M esta asistido por un variador de frecuencia (velocidad) con comandos desde la Panel HMI del PLC.

El generador G posee una carga inicial de 3 bombillas conectadas en estrella λ .

El generador G es un generador trifásico de inducción.

El generador G posee un banco de condensadores para su excitación reactiva calculados acordes a su potencia. Estos se conectan también en estrella λ . (Es lo más recomendado para la práctica).

El generador G Posee un grupo adicional de bombillas para observar comportamientos ubicado en el tablero del equipo en la parte superior derecha.

El generador G Posee una salida adicional en bornes de la puerta derecha del tablero de control para cargas diferentes a bombillas. Tales como pequeños motores o más condensadores.

Para lo anterior ver la figura 1.10. y la figura 1.11

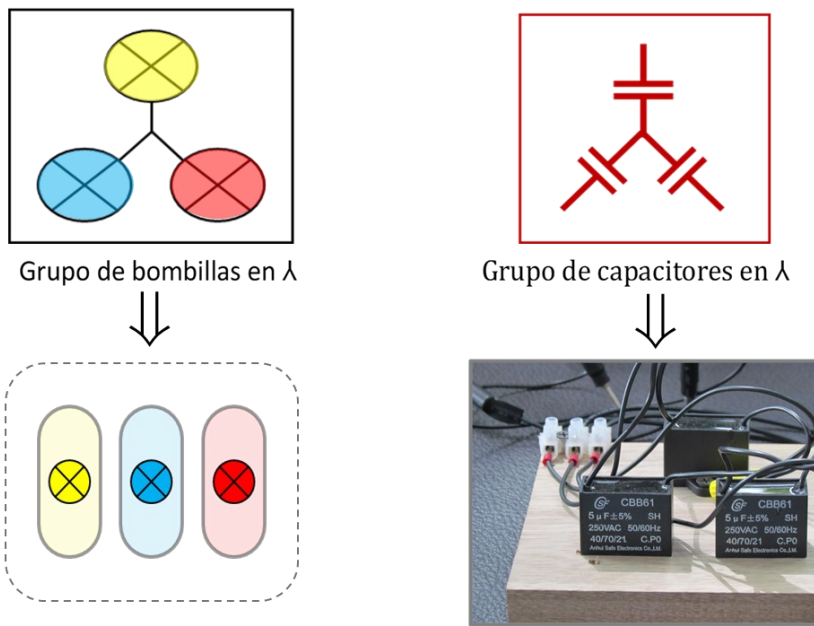


Figura 11.10. Derecha: Cargas de bombillas LED que posee el banco de trabajo de 7 W cada bombilla. El banco posee dos grupos en λ en su parte superior. Uno de ellos es fijo y el otro se puede operar a través del pantallazo otras cargas en el HMI del PLC. Izquierda: Grupo de condensadores en λ externo al tablero. Este se puede conectar a través de los bornes que posee el tablero en su parte frontal. Estos bornes están identificados como R S T N.



Figura 11.11. Banco de trabajo. Se observan en la parte superior los dos grupos de cargas resistivas (bombillas de 7 W cada una) en configuración en λ . Abajo se observa la salida RST N para conectar por allí varias cargas las cuales se pueden comandar a través del pantallazo Otras cargas en el HMI del PLC.

PROCEDIMIENTO:

- Escoger el grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} a trabajar.
- Realizar conexionado del grupo al tablero del equipo antes de energizar todo el sistema a la toma de energía trifásico del laboratorio.
- Conectar el enchufe general a la toma de energía del laboratorio. Piloto verde encendido, tal como lo menciona el capítulo 9 Funcionamiento general del equipo.
- Arrancar el motor \textcircled{M} mediante los comandos en la pantalla del PLC del tablero.
- Arrancar inicialmente en 30HZ y observar movimiento en el Grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} .
- Pasar a 40HZ, observar y anotar.
- Pasar a 50 Hz, observar y anotar.
- Pasar a 60 HZ, observar y anotar.
- Tomar en este momento lecturas de voltajes y corrientes en el motor \textcircled{M} .
- Tomar en este momento lecturas de voltajes y corrientes en el generador \textcircled{G} .
- Pasar a 61 Hz.
- Pasar a 62 Hz.
- Pasar a 63 Hz.
- Pasar a 64 Hz.

- Pasar a 65 Hz.
- Pasar a 66 Hz.
- Tomar siempre lecturas de Voltajes y corrientes tanto en \textcircled{M} y en \textcircled{G} .
- Observar cuando se pasa a Generación. Ver cuando se encienden los bombillos.
- Tomar lecturas de voltajes y corrientes y observar variaciones.

Nota: Si \textcircled{G} no muestra señales de generación deberemos realizar un paso intermedio que denominamos paso de carga de condensadores el cual consiste en arrancar en un paso previo a \textcircled{G} como si fuera un motor \textcircled{M} , es decir lo energizaremos como un motor normal y haremos que rueda como motor durante un corto tiempo (10 segundos). Esto lo haremos sin energizar a \textcircled{M} en ningún momento.

Luego de este paso, si se requiere, observaremos como \textcircled{G} genera electricidad encendiendo el grupo de las 3 bombillas que se encuentra encima del tablero (el grupo de la izquierda).

Realicemos todas las observaciones que se puedan hacer.

Por ejemplo:

Medir corrientes y voltajes, potencia tanto en \textcircled{M} como en \textcircled{G} .

Consignar las RPM del sistema, las cuales están en el HMI en el pantallazo llamado RPM.

Medir las temperaturas de \textcircled{M} y de \textcircled{G} , las cuales están en el HMI en el pantallazo llamado TEMPERATURA.

Consignar el cálculo del torque para \textcircled{M} el cual se encuentra en el HMI en el pantallazo llamado torque motor.

Realizar el mismo procedimiento para el porcentaje de deslizamiento (en %) como para la velocidad del deslizamiento (en rpm) tanto para \textcircled{M} como para \textcircled{G} .

Observar diferencias de sonidos antes y después de tener generación. Consignar su apreciación.

Explorar datos adicionales en los medidores de parámetros eléctricos.

Adicionar a la carga del generador el segundo grupo de bombillas en λ .

Adicionar a la carga del generador un ventilador, el cual se conecta en bornes del tablero.

Observar muy bien las corrientes y voltajes y consignar su apreciación.

Observar y consignar la potencia de \textcircled{M} y \textcircled{G} en los medidores de parámetros eléctricos.

Proceder luego a medir y consignar la frecuencia del Generador. Importante medirla cada vez que se varié la carga y ver si es necesario ajustarla.

Nota: la frecuencia es necesario ajustarla si se desvía mucho de 60HZ. Rango ideal: 60 ± 1 HZ. Ver la fotografía del VDF en la siguiente figura 1.12.

La frecuencia se ajusta aumentando o disminuyendo la velocidad del motor que está siendo asistido por el variador de velocidad electrónico. Esto se hace en el HMI en el pantallazo ARRANQUE MOTOR.



Figura 11.12. VDF que asiste al Motor asíncrono del banco. Es de una potencia de 1,2 HP. Su display permite observar la frecuencia de trabajo con el equipo trabajando . También es posible observar otras variables tales como Voltaje de salida y de entrada, Corriente de salida, potencia entregada, etc.

Nota: Ver indicaciones del profesor.

CALCULOS Y RESULTADOS

- Calcule el Torque Ⓜ y el torque Ⓒ antes y después de la generación.
- Apunte sus observaciones al respecto.
- ¿Qué inconvenientes presenta el Generador de inducción desde su perspectiva?
- ¿Qué analogías mecánicas puede intuir fuera de los sistemas de bombeo?
- ¿Qué otras aplicaciones pueden llegar a impulsar un generador de inducción?
- ¿Para que puede servir un generador de inducción en la ruralidad? Explique.
- ¿Qué otros tipos de generadores similares puede consultar al respecto?
- Consulte los generadores síncronos de imanes permanentes.
- Consigne cual fue la **parte más importante** para usted de esta práctica.
- Realice un diagrama de lo que usted considera es un generador de inducción.

TOMA DE DATOS DESDE EL PANEL FRONTAL DEL TABLERO DE CONTROL:

Acciones para una mayor comprensión de la maquina asincrona. Practicas adicionales.
Utilice el grupo Ⓜ - Ⓒ de 1.2 HP:

Utilice el software xPRESS para la toma de variables electricas tanto para Ⓜ como para Ⓒ . El PC es posible conectarlo a uno u otro medidor de variables electricos del banco de trabajo a través de la llave optica con que cuenta el equipo.

Con todo lo anterior, la idea es realizar las practicas que muestran a continuación y al final realizar comparaciones y sacar conclusiones con todo lo observado y estudiado.
 Compare G vs M y concluya.

Practica 1 de toma de datos de variables eléctricas.:

Llenar los datos de arriba del generador G cuando el Generador G se encuentra generando y *con un grupo de bombillas conectado*.



Adicionalmente tome la siguiente información del HMI del PLC:

RPM: _____

$^{\circ}\text{T}$ en M : _____

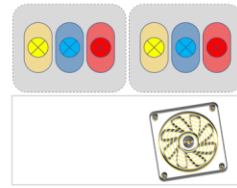
Tome los datos conectando el multímetro del tablero que corresponde a G al PC a través de la llave óptica que hay en el banco de trabajo. Utilice el software *xPRESS* para encontrar estos datos.

VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POTENCIA APARENTE	FACTOR DE POTENCIA
<p>V L-L EQUIV</p> <p>VL1 =</p> <p>VL2 =</p> <p>VL3 =</p>	<p>A EQUIV</p> <p>AL1 =</p> <p>AL2 =</p> <p>AL3 =</p>	<p>kW EQUIV</p> <p>kWL1 =</p> <p>kWL2 =</p> <p>kWL3 =</p> <p>kW total Max =</p>	<p>kVAR EQUIV</p> <p>kVARL1 =</p> <p>kVARL2 =</p> <p>kVARL3 =</p>	<p>kVA EQUIV</p> <p>kVAL1 =</p> <p>kVAL2 =</p> <p>kVAL3 =</p>	<p>P. F TOTAL</p> <p>Pf L1 =</p> <p>Pf L2 =</p> <p>Pf L3 =</p>



Practica 2 de toma de datos de variables eléctricas.:

Llenar los datos de arriba del generador **G** cuando el Generador **G** se encuentra generando y con dos grupos de bombillas conectados, mas un ventilador de PC a 220 VAC que hay en los accesorios del equipo y que se conecta en dos de las tomas frontales RST que posee el tablero de control.



Adicionalmente tome la siguiente información del HMI del PLC:

RPM: _____

°T en **M**: _____

Tome los datos conectando el multímetro del tablero que corresponde a **M** al PC a través de la llave óptica que hay en el banco de trabajo. Utilice el software *xPRESS* para encontrar estos datos.

VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POTENCIA APARENTE	FACTOR DE POTENCIA
<p>V L-LEQUIV</p> <p>VL1 =</p> <p>VL2 =</p> <p>VL3 =</p>	<p>A EQUIV</p> <p>AL1 =</p> <p>AL2 =</p> <p>AL3 =</p>	<p>kW EQUIV</p> <p>kWL1 =</p> <p>kWL2 =</p> <p>kWL3 =</p> <p>kW total Max =</p>	<p>kVAR EQUIV</p> <p>kVARL1 =</p> <p>kVARL2 =</p> <p>kVARL3 =</p>	<p>kVA EQUIV</p> <p>kVAL1 =</p> <p>kVAL2 =</p> <p>kVAL3 =</p>	<p>P. F. TOTAL</p> <p>Pf L1 =</p> <p>Pf L2 =</p> <p>Pf L3 =</p>



Practica 3 de toma de datos de variables eléctricas.:

Llenar los datos de arriba del motor (M) cuando el Generador (G) se encuentra generando y con un grupo de bombillas conectado.

Tome los datos conectando el multímetro del tablero que corresponde a (M) al PC a través de la llave óptica que hay en el banco de trabajo. Utilice el software xPRESS para encontrar estos datos.



Adicionalmente tome la siguiente información del HMI del PLC:

RPM: _____

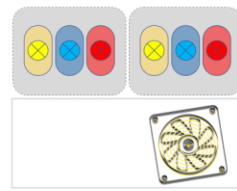
°T en (M): _____

VOLTAJE	CORRIENTE	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POTENCIA APARENTE	FACTOR DE POTENCIA
<p>V L-EQUIV</p> <p>VAC</p> <p>VL1 =</p> <p>VL2 =</p> <p>VL3 =</p>	<p>A EQUIV</p> <p>A</p> <p>AL1 =</p> <p>AL2 =</p> <p>AL3 =</p>	<p>kW EQUIV</p> <p>kW</p> <p>kWL1 =</p> <p>kWL2 =</p> <p>kWL3 =</p> <p>kW total Max =</p>	<p>kVAR EQUIV</p> <p>kVAR</p> <p>kVARL1 =</p> <p>kVARL2 =</p> <p>kVARL3 =</p>	<p>kVA EQUIV</p> <p>kVA</p> <p>kVAL1 =</p> <p>kVAL2 =</p> <p>kVAL3 =</p>	<p>P. F. TOTAL</p> <p>Pf L1 =</p> <p>Pf L2 =</p> <p>Pf L3 =</p>



Practica 4 de toma de datos de variables eléctricas.:

Llenar los datos de arriba del motor (M) cuando el Generador (G) se encuentra generando y con dos grupos de bombillas conectados mas un ventilador de PC a 220 VAC que hay en los accesorios del equipo y que se conecta en dos las tomas frontales RST que posee el tablero de control.

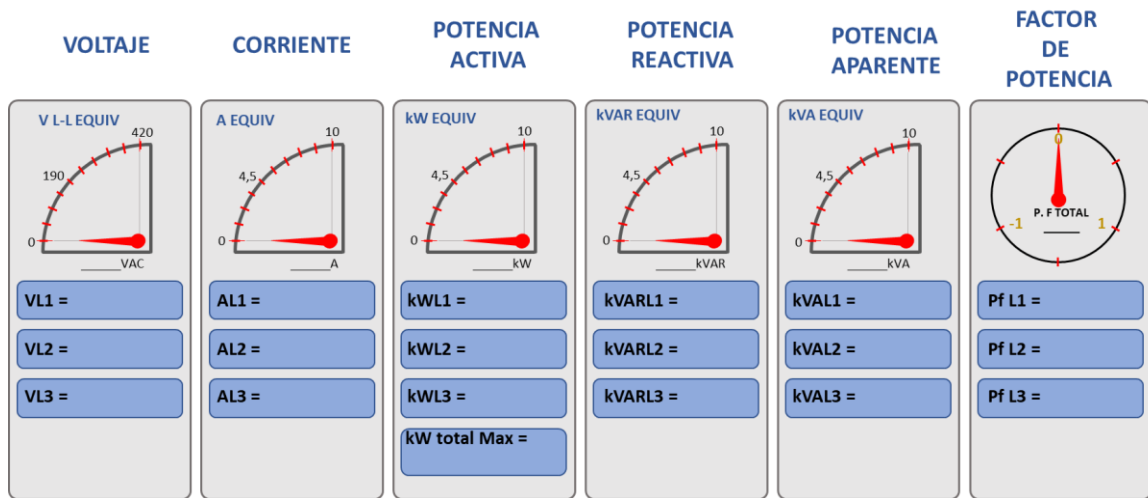


Adicionalmente tome la siguiente información del HMI del PLC:

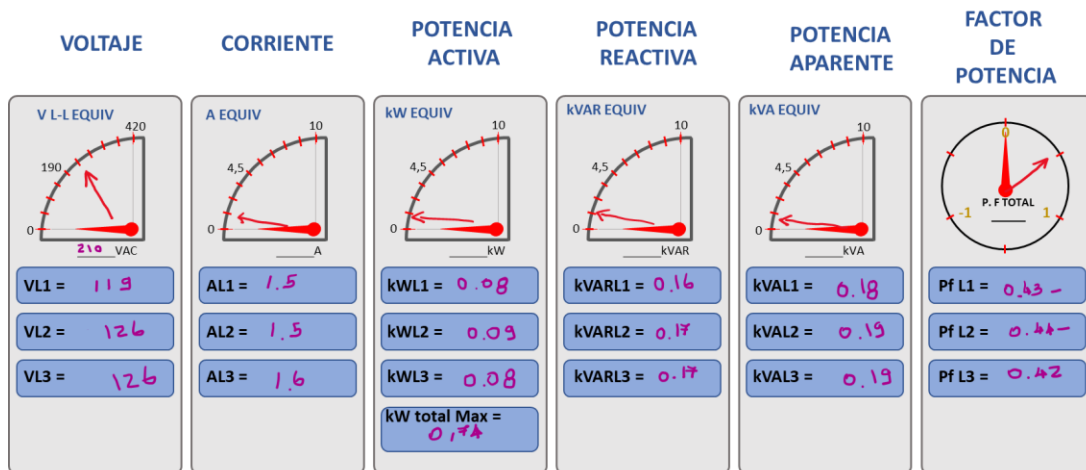
RPM: _____

°T en (M): _____

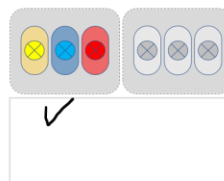
Tome los datos conectando el multímetro del tablero que corresponde a (M) al PC a través de la llave óptica que hay en el banco de trabajo. Utilice el software xPRESS para encontrar estos datos.



Ejemplo de una hoja diligenciada.



Grupo (M)-(G)
1.2 HP



Adicionalmente tome la siguiente información del HMI del PLC:

RPM: 1810 / 64 Hz.

°T en (M): 30 °C

Conclusión:

El equipo posee Compatibilidad del equipo con un proyector a través de la PC, la cual permite explicar y demostrar el funcionamiento del equipo a toda la clase de la práctica al mismo tiempo.

Es posible entonces con el equipo, realizar lo siguiente:

- 1.- Puesta en marcha del generador de inducción.
- 2.- Procedimiento del cableado del grupo $\text{M} - \text{G}$ asíncrono de inducción. Y Colocación de cargas al Generador.
- 3.- Estudio de los regímenes de funcionamiento de la máquina asíncrona de inducción trifásica.
- 4.- Estudio de la eficiencia del generador de inducción comparando la potencia inyectada en la red con la potencia mecánica del eje de la turbina.
- 5.- Ver la Influencia del factor de potencia con las variaciones de velocidad y análisis de las posibles soluciones para automatizar la regulación del factor de potencia.
6. - Compensación de la potencia activa mediante bancos de condensadores y medición eléctrica de la respuesta de la máquina eléctrica. Observación del equipo funcionando.
- 7.- Varios alumnos pueden visualizar simultáneamente los resultados.
- 8.- Este equipo es totalmente seguro ya que dispone de dispositivos de seguridad mecánicos, eléctricos/electrónicos y de software.
- 9.- Este equipo puede usarse para realizar investigación aplicada.
- 10.- Este equipo puede usarse para impartir cursos de formación a Industrias, incluso a otras Instituciones de Educación Técnica.
- 11.- El estudiante o el profesor pueden realizar otros ejercicios diseñados por él mismo.

Capítulo 12

Presupuesto

Objetivo específico:

Mostrar cuanto (en dinero) puede costar la implementación del banco experimental, mirando la componente de hardware y la componente de mano de obra requerida para el ensamble, fabricación y programación de este equipo.

El banco se diseñó bajo las condiciones de seguridad que involucran el trabajo en un laboratorio de una universidad y por ello su costo es mayor que el de un proyecto de generación normal.

Además el montar un grupo $\text{M} - \text{G}$ en una mesa de trabajo para su análisis, hace que la instalación y la programación sean diferentes cuando se comparan contra un equipo de solo generación ubicado en una caseta generadora.

Los materiales seleccionados para el proyecto cumplen con todas las normas para trabajos eléctricos y para equipos de laboratorios que van a ser operados dentro de un ambiente universitario.

La relación de costos que se muestran en las siguientes tablas nos da una idea del valor del banco de trabajo tanto en su parte de componentes, mano de obra y elaboración de información técnica relacionada con el equipo.

RELACION DE MATERIALES Y TRABAJOS ELECTRICOS Y MECANICOS EN TALLERES	
PROVEEDOR	MATERIALES TRABAJOS MECANICOS Y ELECTRICOS
SETEIN	\$ 4.891.210,00
SERVIACE	\$ 12.704.573,00
SISCONTROL	\$ 1.890.200,00
SMM	\$ 457.500,00
EDEMCO	\$ 1.300.000,00
CREAMOS PUBLICIDAD	\$ 200.000,00
VARIOS	\$ 1.346.000,00
SUBTOTAL	\$ 22.789.483,00

Los proveedores de materiales y trabajos eléctricos y mecánicos son con sede en el municipio de Rionegro Antioquia.

En este municipio se cuenta con almacenes y talleres mecánicos y eléctricos con capacidad para desarrollar proyectos de este tipo con muy buena calidad y oportunas entregas.

Estos trabajos se desarrollaron durante los meses de marzo y septiembre del año de 2019.

MANO DE OBRA EN PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO				
ESTIMADO HORAS DE TRABAJO		HORAS	Vr. HORA	TOTAL
PARTE MECANICA		60	\$ 40.000,00	\$ 2.400.000,00
PARTE ELECTRICA		180	\$ 100.000,00	\$ 18.000.000,00
PROGRAMACION		60	\$ 120.000,00	\$ 7.200.000,00
SUBTOTAL				\$ 27.600.000,00

El tiempo estimado de mano de obra puede ser mayor ya que por tratarse de una tesis de grado no se tuvo en cuenta el tiempo de estudiante.

MATERIAL ADJUNTO AL EQUIPO SOPORTE	
MEMORIAS	\$ 1.000.000,00
ELABORACION DE TRABAJO ESCRITO	\$ 2.000.000,00
SUBTOTAL	\$ 3.000.000,00

El tiempo estimado para la elaboración de las memorias puede ser mayor ya que por tratarse de una tesis de grado no se tuvo en cuenta tiempo de estudiante

CONSOLIDADO	
RELACION DE MATERIALES Y TRABAJOS ELECTRICOS Y MECANICOS EN TALLERES	\$ 22.789.483,00
MANO DE OBRA EN PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO	\$ 27.600.000,00
MATERIAL ADJUNTO AL EQUIPO SOPORTE	\$ 3.000.000,00
TOTAL	\$ 53.389.483,00

A este consolidado le faltan algunos datos de costos de transporte peajes y materiales menores tales como PCs, memorias USB, etc.

Notas sobre el generador asíncrono en lo relacionado a costos:

La principal ventaja de un Generador asíncrono es su bajo precio en comparación con cualquier otro generador, ya sea una máquina de inducción de bobinado específico o un generador síncrono.

Esto es especialmente cierto para el rango de potencia pequeña (por debajo de 10 kW) donde los generadores síncronos son bastante costosos y no están fácilmente disponibles.

Sin embargo, esta ventaja de costos del generador asíncrono debe verse en la perspectiva correcta: en las micro centrales hidroeléctricas en los países industrializados, los costos de inversión para los equipos eléctricos suelen ser del orden del 5 al 10% de la inversión total (sin tener en cuenta los costos de transformación y de las redes de distribución).

Por lo tanto, una ventaja de precio del generador asíncrono de digamos 50% reducirá los costos totales de inversión en un máximo de 5% solamente. La espectacular ventaja de precio de la máquina tiene un efecto bastante limitado sobre los costes generales de inversión.

En los países en desarrollo, donde la mano de obra y los materiales de construcción (piedra, grava, ladrillos, etc.) son baratos, la distribución de los costos de los proyectos hidroeléctricos pequeños puede diferir considerablemente de la de los países industrializados.

En la actualidad, la mayoría de los componentes de estos proyectos, se fabrican localmente, excepto el generador, el cual a menudo es el componente más grande de los costos totales debido a los impuestos de importación, el transporte y los tipos de cambio desfavorables. Se han reportado instalaciones donde el generador representó el 50% del costo total de inversión.

El uso de un generador asíncrono (por parte de un distribuidor de motores local o del fabricante / licenciataria) en lugar de un generador síncrono importado puede hacer que la comparación de muchos proyectos de micro centrales hidroeléctricas sea económicamente factible y puede activar el apoyo de las agencias financieras.

Al comparar costos (incluyendo turbinas, ingeniería civil, etc.) y también los costos de O&M en su análisis. Solo así se puede evaluar el verdadero beneficio económico de un generador asíncrono.

Los costos de operación y mantenimiento de las opciones del generador seleccionado pueden diferir entre sí porque el equipo importado generalmente requerirá repuestos importados que, por lo tanto, incurren en costos adicionales durante la vida útil de la planta.

Este es un banco de pruebas que pretende mostrar el comportamiento en general de una máquina de inducción trifásica trabajando como generador.

Se compone de dos máquinas de inducción una en un trabajo como motor primo y en la otra en funcionamiento como generador.

El grupo se diseñó como un banco en donde se pueden mostrar los dos funcionamientos más importantes de la máquina asíncrona. Es decir el equipo sirve como soporte de estudio para quienes analizan las máquinas de inducción que hoy en día trabajan del lado motor y que presentan posibilidades de funcionar en algún momento en el lado generador.

Tal es el caso de:

Las bombas hidráulicas. Lo más representativo en el caso de las bombas hidráulicas son las PAT. En particular tienen mucha opción los equipos especializados en bombeos de agua en donde las PAT pueden trabajar en pequeñas centrales de generación de energía eléctrica. El capítulo 5 de este trabajo menciona el trabajo con las PAT's.

Los ventiladores. El ejemplo más representativo con un flujo de viento considerable lo constituyen los aerogeneradores los cuales utilizan maquinas asíncronas por su facilidad de montaje, implementación y Mantenimiento. Gran cantidad de los aerogeneradores del mundo utilizan maquinas asincronas en modo Generador.

Conclusión:

El banco de trabajo involucra los costos de, fabricación del Hardware, mano de obra para el ensamble, cableado, marcación y señalización, y programación de todo el sistema de potencia y de control.

Nota:

Importante anotar acá que se procuró por tener elementos de muy buena calidad para todo el hardware del banco de trabajo además de excelentes cableados y terminaciones. La programación se procuró porque fuese óptima y segura.

Este equipo involucró también muchas horas adicionales de trabajo, estudio y diseño que no están tenidas en cuenta acá ya que hacen parte del tiempo de trabajo de la maestría del estudiante.

Capítulo 13

Recomendaciones Generales

Objetivo específico:

Este breve capítulo busca dar algunas directrices de utilización del equipo a aquellas personas que de una forma u otra utilicen el banco de trabajo. Busca también realizar el uso del equipo en forma correcta siempre referenciándose a la lectura de algunas partes de este libro.

En este libro se encuentra la mayor parte de la información relacionada con el banco de trabajo (toda la que se logró reunir).

El equipo puede utilizarse para mostrarlo en clase, puede utilizarse para experimentar con él, puede utilizarse para realizar una práctica de laboratorio, etc. Y para esto se muestran las siguientes recomendaciones.

Se mostrarán acá los siguientes tipos de recomendaciones:

- ***Recomendaciones para el personal del laboratorio.***
- ***Recomendaciones para los estudiantes.***
- ***Recomendaciones para el instructor.***

Recomendaciones para el personal del laboratorio.

- Seguir las recomendaciones dadas en este manual sobre todo en el capítulo 9 funcionamiento general del equipo.

- Al finalizar los trabajos con el equipo el equipo debe desconectarse de la toma de energía del laboratorio, siguiendo con la recogida de los cables de potencia de motor, generador y acometida (dándole una limpieza a los cables)
- Retirar los elementos accesorios tales como voltímetros, amperímetros, bancos de capacitores, resistencias, ventiladores, tacómetros etc. y ubicarlos en el sitio de almacenamiento.

Luego:

Cerrada de tablero principal

Dejar la parada de emergencia puesta

Cerrar la puerta principal con llave

Colocarle el candado al interruptor principal

Al finalizar estas tareas instalarle los forros de protección al tablero y a la mesa de pruebas.

Recomendaciones para los estudiantes.

- Seguir las normas de seguridad dictadas por el personal del laboratorio.
- Seguir las normas de seguridad dictadas por este manual ver capítulo 3 seguridad eléctrica y ergonomía.
- Seguir al pie de la letra la práctica que se presenta en este manual capítulo 11 Diseño de práctica de laboratorio para estudiantes.
- Escuchar atentamente las recomendaciones del profesor para observar eventos que ocurren durante los ensayos.

Recomendaciones para el profesor.

- Leer este manual.
- Informarse sobre el tema de motores y generadores de inducción.
- Documentarse en el tema de la bomba usada como turbina (PAT) especialmente en el tema de la máquina eléctrica que impulsa el impulsor o es impulsada por el mismo.
- Tener en cuenta todas las normas de seguridad eléctrica al respecto.
- Se estima que el número ideal por práctica sea de 5 estudiantes.
- Recuerde medir su tiempo de práctica para que al final se realice el guardado del equipo concienzudamente.

Conclusión:

Las recomendaciones son útiles para recordarle a quién opera el equipo que es los más importante que debe leer o revisar y cómo llegar a esa información en el libro del banco de trabajo.

También recomiendan acerca de que temas generales debe documentarse antes de la operación del equipo.

Capítulo 14

Material didactico adicional.

Objetivo específico:

Mostrar y detallar elementos accesorios al banco de trabajo, los cuales participan en el trabajo seguro y eficiente durante la operación y conocimiento del equipo. Estos elementos además de ser muy útiles, hacen más amigable el trabajo y llaman a ahondar en el conocimiento de las máquinas asíncronas.

El banco de trabajo cuenta además con las siguientes láminas y accesorios que refuerzan la correcta operación del equipo y ayudan en el proceso didáctico:

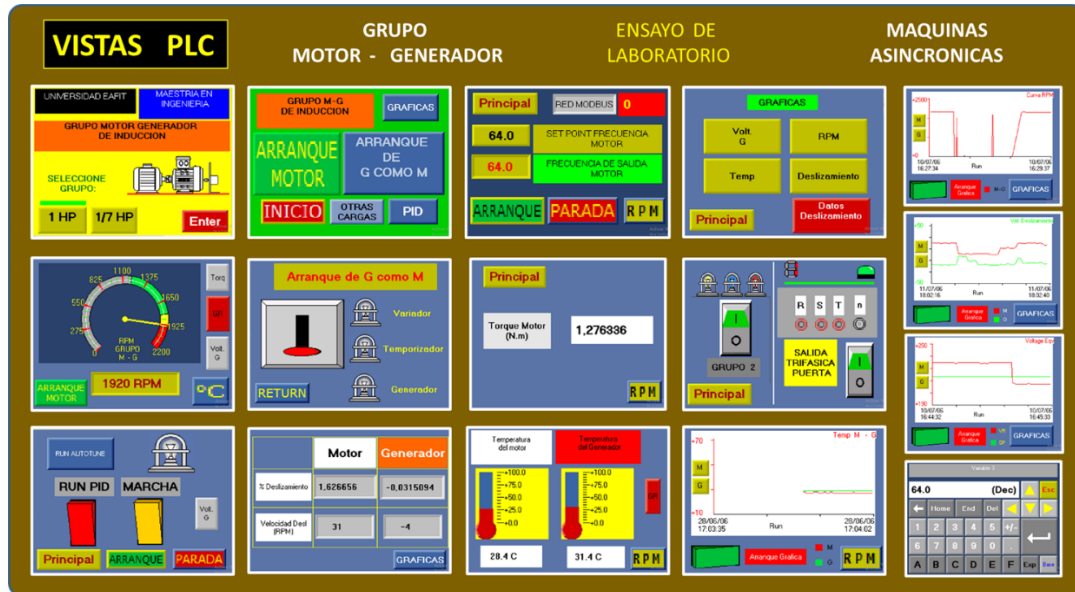


Figura 14.1. Mosaico de visualizaciones del PLC.

Esta lámina permite visualizar los diferentes pantallazos que tiene el HMI en el tablero de control, en una sola lámina, como apoyo en el entendimiento o comprensión del equipo. En el capítulo 9 funcionamiento general del equipo se explica como funciona cada pantallazo.

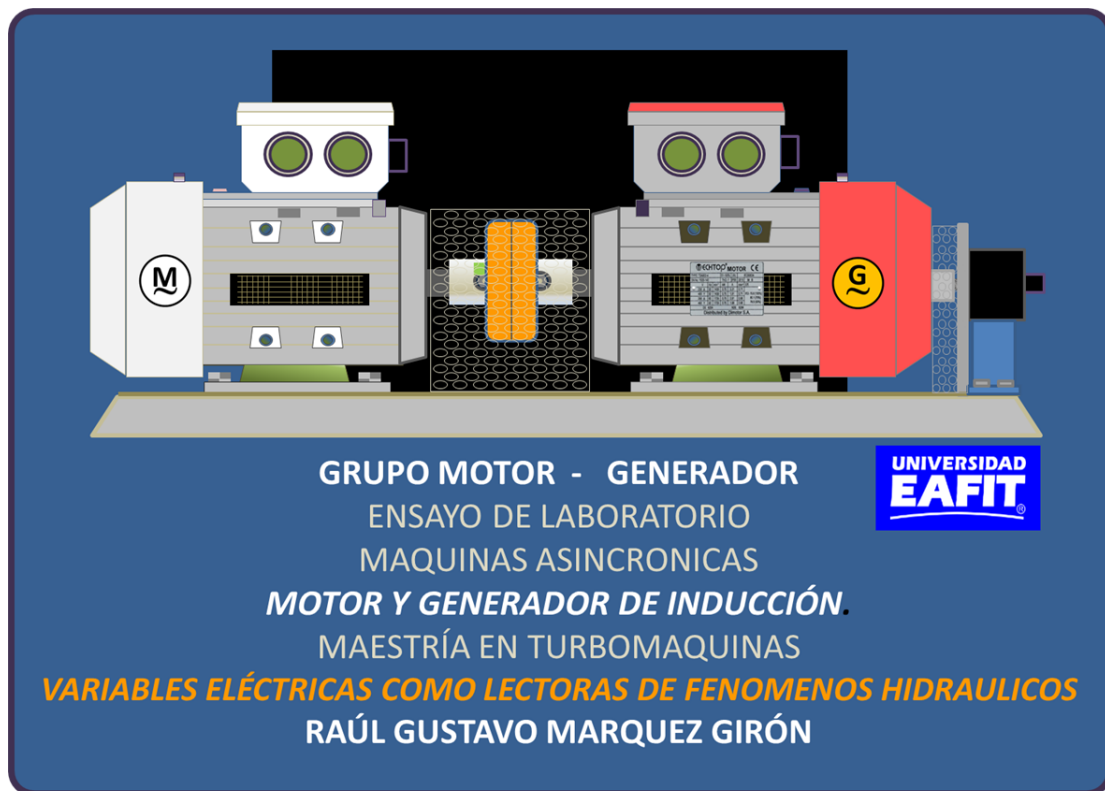


Figura 14.2. Grupo M - G

Esta lámina permite visualizar un grupo M - G. Y el nombre de este trabajo de tesis.

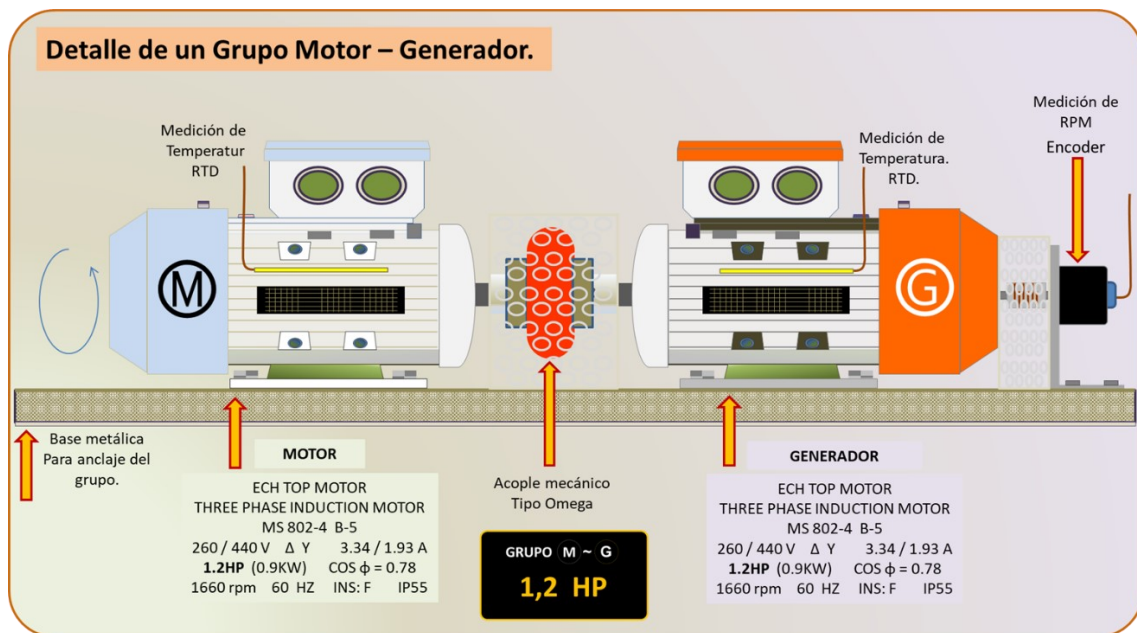


Figura 14.3. Grupo M - G de 1.2 HP.

Lámina del grupo M - G de 1.2HP con sus sensores de temperatura y su encoder para medir velocidad en RPM.

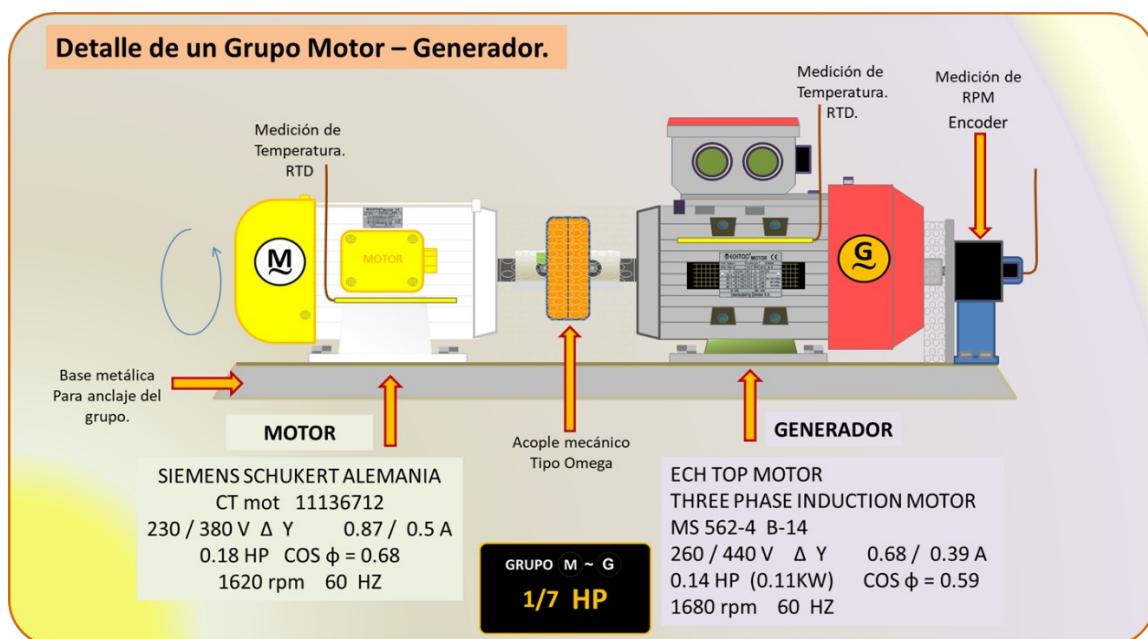


Figura 14.4. Grupo M - G de 1/7 HP.

Lámina del grupo M - G de 1/7 HP con sus sensores de temperatura y su encoder para medir velocidad en RPM.

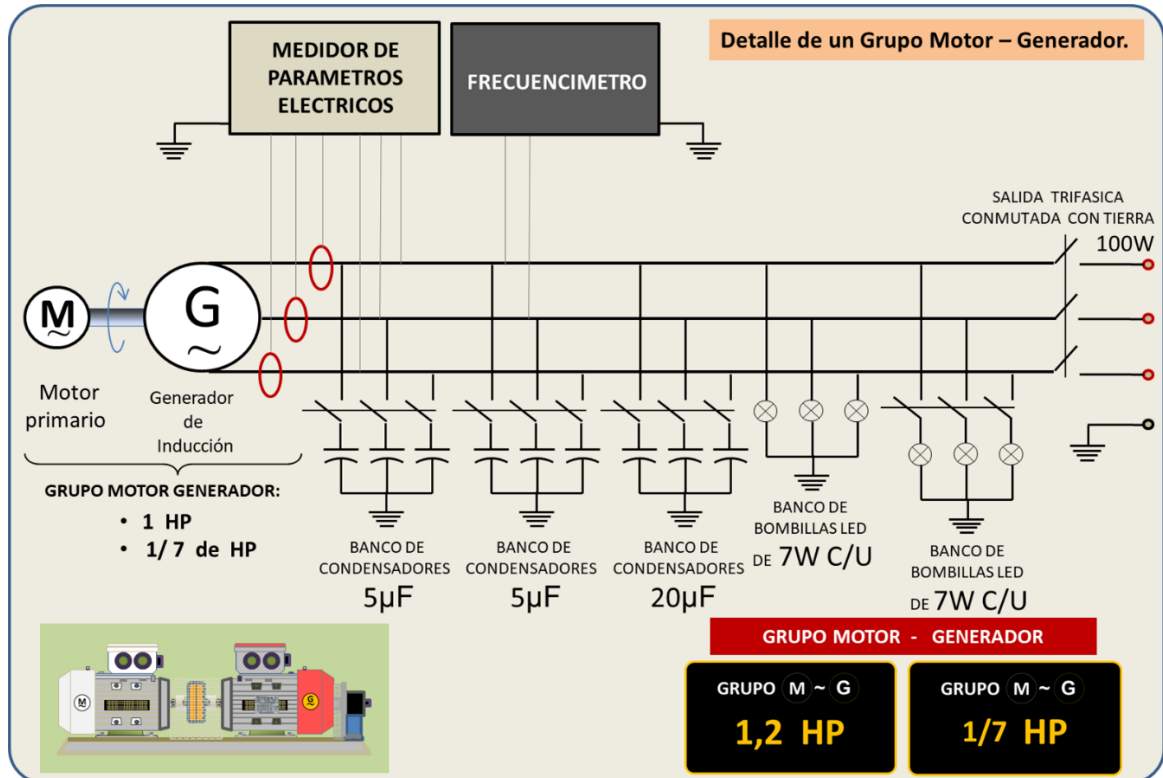


Figura 14.5 . Circuito basico de conexiones del generador ©.
Lámina del diagrama de conexiones básicas del generador asíncrono.



Figura 14.6. Aviso adhesivo con instrucciones para conectar la maleta labView.
Lámina de aviso para la conexión de la maleta LabView.

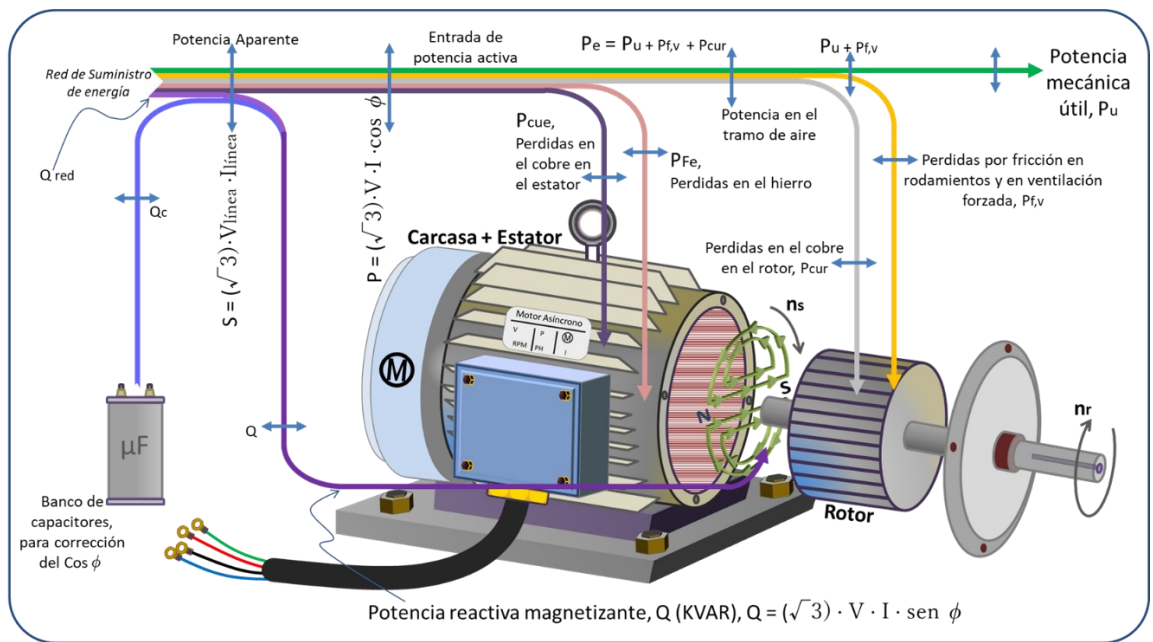


Figura 14.7. Flujo de potencia en el motor asincrono de inducción trifásico. Lámina de diagrama de flujo de un motor trifásico.

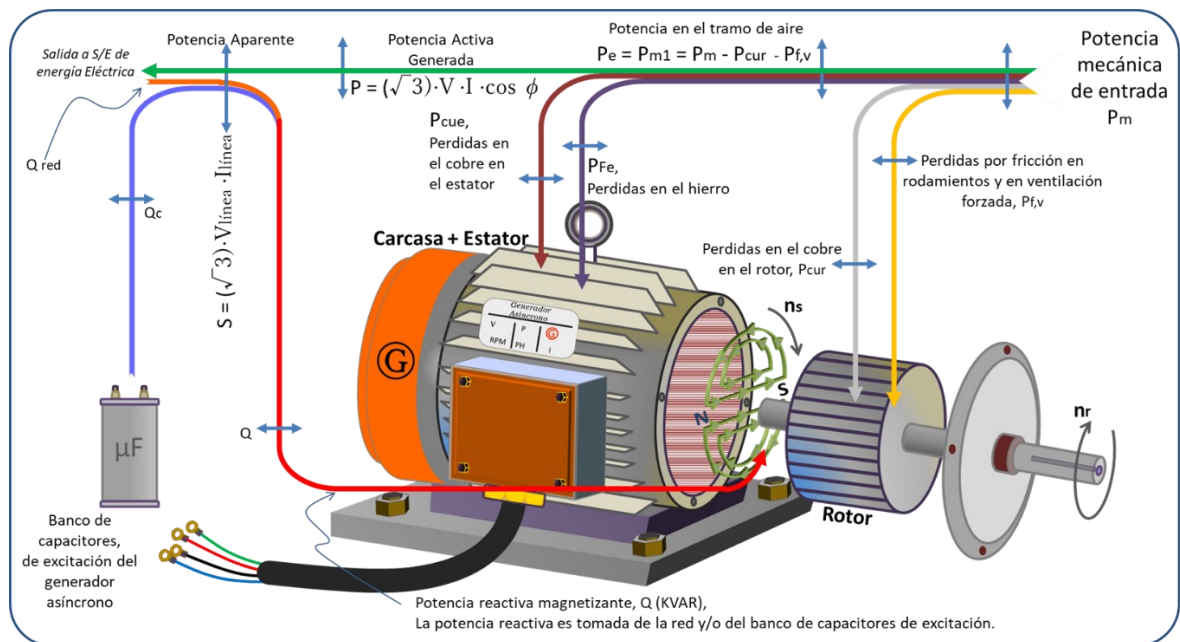


Figura 14.8. Flujo de potencia en el generador asincrono de inducción trifásico. Lámina de diagrama de flujo de una maquina de inducción asíncrona trifásica en modo generador.

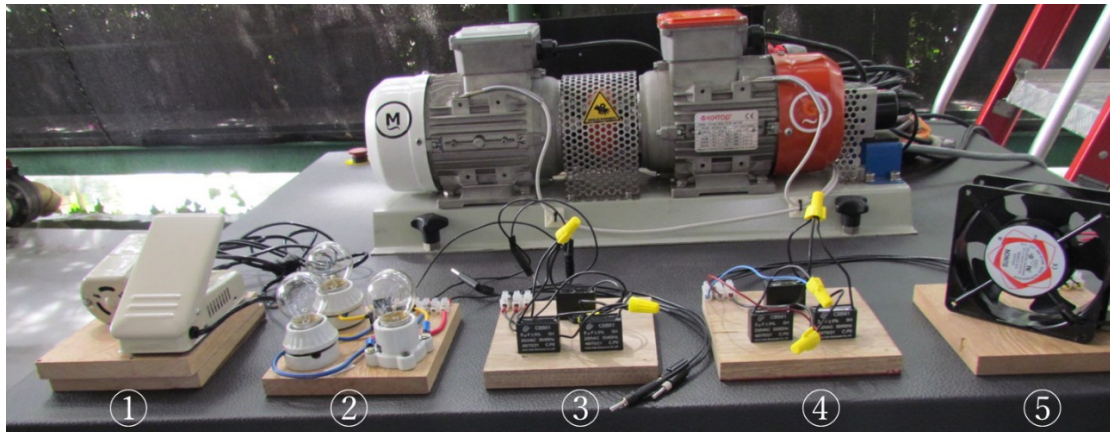


Figura 14.9. Cargas actuales del banco de trabajo.

Cargas externas a conectar en bornes de generador

- 1- Modulo motor universal de maquina de coser con pedal
- 2- modulo de bombillas incandescentes de 10W c/u trifásico balanceado
- 3- Modulo de condensadores de 5 μ f en λ y en Δ .
- 4- Modulo de condensadores de 3 μ f en λ y en Δ .
- 5- Modulo de ventilador para PC de 30W



Figura 14.10. PC del Banco de Trabajo.

PC actual para comunicación con:

- PLC a través de software Vicologic para programación y HMI
- Medidores de parámetros de medición a través de software xpress de LOVATO
- Programación del software PID Server
- Variador electrónico a través del software Optitools Studio de INVERTEK
- Interactuar con Microsoft office. Trabajo con un PC situado en otro lugar en modo remoto a través de AnyDesk e interactuar con la maquina.



Figura 14.11. Otras vistas de la PC del banco de trabajo.

NOTA:

El PC al estar comunicado con el PLC sirve para proyectar el HMI en una pantalla grande pudiendo ser usado para capacitaciones.

Además del HMI las otras vistas de Variador, medidor de parámetros eléctricos, etc.

En esta parte del trabajo podemos observar que con el equipo, además de estudiar el funcionamiento básico del generador asíncrono, podemos también hacer otras tareas tales como:

- Varios personas pueden visualizar simultáneamente los resultados. Pueden visualizar todos los resultados en la clase, en tiempo real, por medio de un proyector o una TV conectable a la PC del banco de trabajo..
- El Sistema de Control desde Computador con SCADA permite una visualización real.
- Este equipo es totalmente seguro ya que dispone de dispositivos de seguridad mecánicos, eléctricos/electrónicos y de software.
- Este equipo puede usarse para realizar investigación aplicada.
- Este equipo puede usarse para impartir cursos de formación .
- El usuario puede realizar otros ejercicios diseñados por él mismo.
- El banco posee una marcación y señalización fácilmente entendible, facilitando así su operación.

Conclusión:

Este equipo rescata las instalaciones eléctricas correctamente realizadas y diseñadas acorde al medio de trabajo.

Los elementos accesorios pudieran ser más pero con los que cuenta actualmente el banco es suficiente para impartir conocimiento sobre las máquinas asíncronas.

Algunos de estos se conectan a la toma de energía que posee el tablero de control en su parte frontal y para esto se utilizan conectores apropiadamente diseñados para tal proposito.

Es importante anotar que a medida que se trabaje con el banco es factible diseñar mkas elementos accesorios los cuales entrarían a enriquecer aún **más** las prácticas y ensayos que allí se realicen.

Capítulo 15

Nuevas vías de desarrollo.

Objetivo específico:

Presentar temas relacionados con las máquinas eléctricas rotativas (y sobre todo las asíncronas) que se pueden profundizar con ayuda de este trabajo de tesis.

El objetivo también es buscar en una visualización cercana temas interesantes y que se proyectan ser muy útiles para listarlos y darles algunas explicaciones relevantes.

Es de anotar que este objetivo pretende también inquietar al lector a generar también nuevas vías de desarrollo con la ayuda de este trabajo en temas relacionados.

Expondremos acá varios temas que consideramos son nuevas posibilidades de desarrollo en lo referente a la generación de electricidad a través de máquinas rotativas tal como lo son las máquinas asíncronas de inducción. La idea es presentar temas que se pueden ampliar y presentar para futuros estudios con la ayuda de este banco de trabajo.

- Un banco motor generador con motores de alta eficiencia.
- Un banco completo de pruebas con capacidad para máquinas asíncronas de 5HP (o posible 10HP).
- Maleta LABVIEW. Comunicación con Labview. Parámetros eléctricos. Triángulo de potencias en línea con los ensayos.
- Comunicación remota del equipo con un PC en otro lugar. Operación del equipo asistida por un técnico en el laboratorio.
- Práctica de colocar una fuente de CD para excitación reactiva de los devanados a cambio de encender como motor el generador.
- Un banco motor generador con motores de alta eficiencia.

Un banco motor generador con motores de alta eficiencia.

Buscamos acá proponer un grupo de trabajo con motores asíncronos trifásicos de última generación de los del tipo de alta eficiencia o de muy alta eficiencia. La idea es buscar las mejores posibilidades de alta generación con instalaciones normales y que funcionen para máquinas asíncronas trifásicas. Es decir la idea, es desarrollar un banco de trabajo en donde se demuestre que con solo cambiar de motor por uno de mayor eficiencia se puede lograr una mayor eficiencia y por lo tanto una mayor y mejor generación cuando el motor pasa a trabajar en el modo generador. El tablero de comando sería el mismo y es por esto que se sugiere que las máquinas asíncronas de alta eficiencia no superen los 1,5 kW.

Inicialmente puede ser que con solo cambiar el generador sea suficiente para ver las nuevas bondades de la máquina de alta eficiencia sea suficiente, pero también se sugiere que si es posible sea tenga un grupo M - G siendo ambos máquinas de alta eficiencia.

Lo anterior también se puede justificar desde el punto de vista de que el PLC tiene puede contener señales de ambos equipos en forma simultánea y con ello comparar en línea los comportamientos de ambos modos M - G . Ver la siguiente figura 15.1 para detallar este ítem.

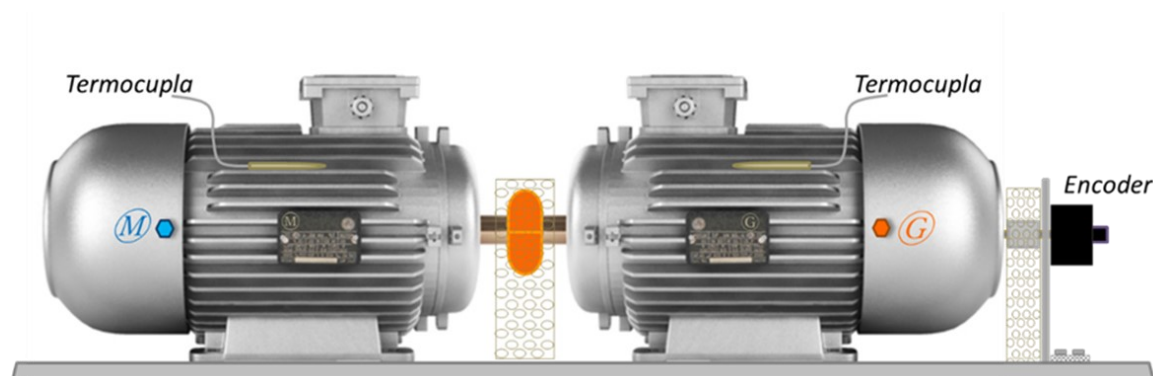


Figura 15.1. Grupo M - G Proyectado con máquinas asíncronas de alta eficiencia.

Un banco completo de pruebas con capacidad para máquinas asíncronas de 5HP (o posible 10HP).

Con este ítem se busca observar máquinas asíncronas de mayor potencia para ajustar detalles que las máquinas de potencias pequeñas muestran levemente. Tal es el caso de las variaciones del deslizamiento cuando se tienen variaciones en la frecuencia eléctrica. Hasta 5 HP es posible conservar la mesa de trabajo actual pero si requiere que se tenga un tablero de comando mayor para alojar allí un VDF más grande y equipos de maniobra un poco más grandes.

La acometida del equipo sería mayor al igual que los cables de potencia de motor (M) y generador (G).

El PLC: Inicialmente es posible conservar el actual pero sería importante explorar un autómata que reciba más señales tanto análogas como digitales y que posea una Interfaz Hombre Maquina HMI más grande para mejor visualización y con mayor posibilidad de gráficos de tendencias.

Un banco completo de pruebas con capacidad para maquinas asíncronas de 5HP o mayor. Proyección. Ver figura 15.2

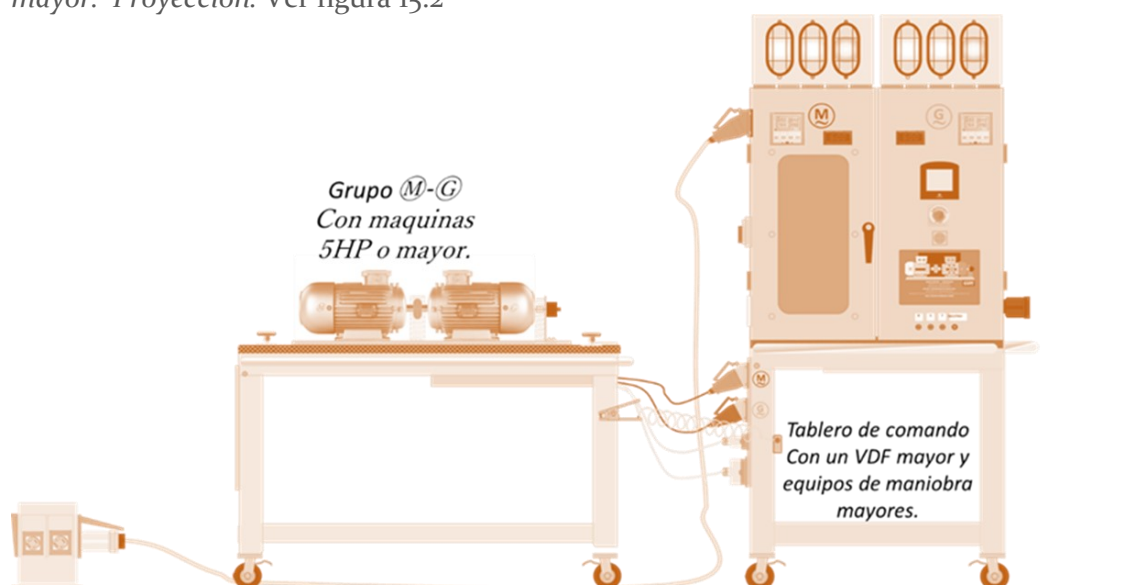


Figura 15.2. *Un banco completo de pruebas con capacidad para maquinas asíncronas de 5HP o mayor. Proyección.*

Maleta LABVIEW. Comunicación con LabVIEW . Parámetros eléctricos. Triangulo de potencias en línea con los ensayos.

El equipo actual posee la posibilidad de conectar la maleta Compact – RIO con programación LabVIEW que posee el laboratorio de Hidráulica.

La programación LabVIEW que posee el laboratorio de Hidráulica cuenta con una subrutina de visualización de parámetros eléctricos de sistemas trifásicos, los cuales se pueden integrar fácilmente a las otras subrutinas de la componente hidráulica y mecánica que se tienen en los procesos de bombeo y turbinado con que cuenta toda el área.

El equipo se conecto en las fases iniciales de esta tesis y funcionó a modo de ensayo conectado a la maquina síncrona que trabaja como generador.

Esta opción se tomó como una nueva vía de desarrollo porque la idea con el software LabVIEW es conectarse con, los medidores de parámetros eléctricos de tanto el motor (M) como el generador (G), y con el PLC para tener en línea la señal de la velocidad y de la temperatura superficial de las carcasas de las maquinas. Estimamos que esta nueva vía de desarrollo requiere una dedicación especial, la cual se sale de los alcances de este trabajo de tesis.

Maleta LABVIEW. Comunicación con LabVIEW . Parámetros eléctricos. Triangulo de potencias en línea con los ensayos. La maleta LabVIEW se conecto con la fase inicial del proyecto tal como se observa abajo en el grupo M - C prototipo de 1/7 de HP. La maleta LabVIEW funciono satisfactoriamente monitoreando el generador el cual alimentaba una carga de tres bombillas en λ de 7 W cada una. Ver figuras 15.3 y 15.4

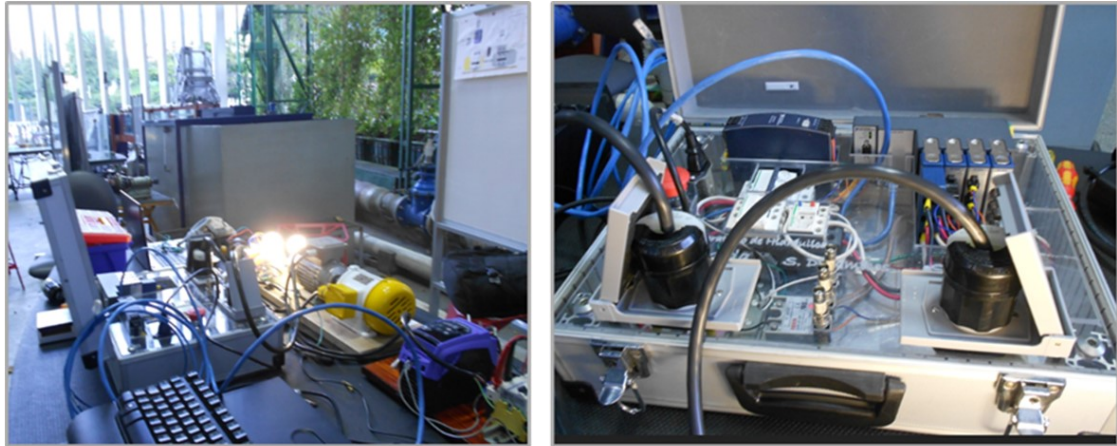


Figura 15.3. Maleta LabVIEW. Conectada al prototipo del trabajo en el lado del generador C

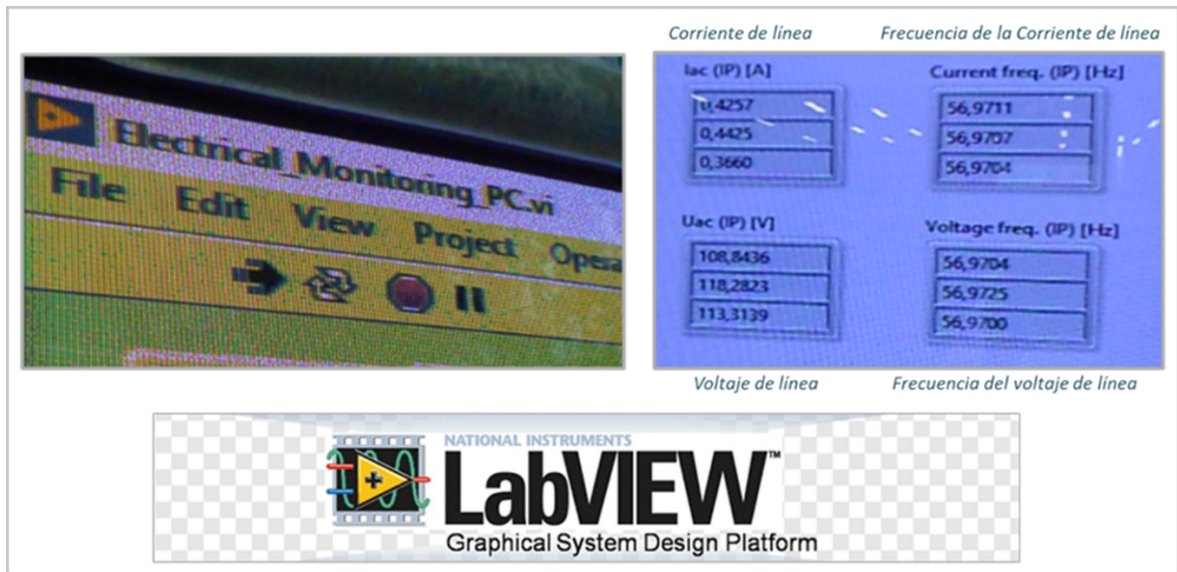
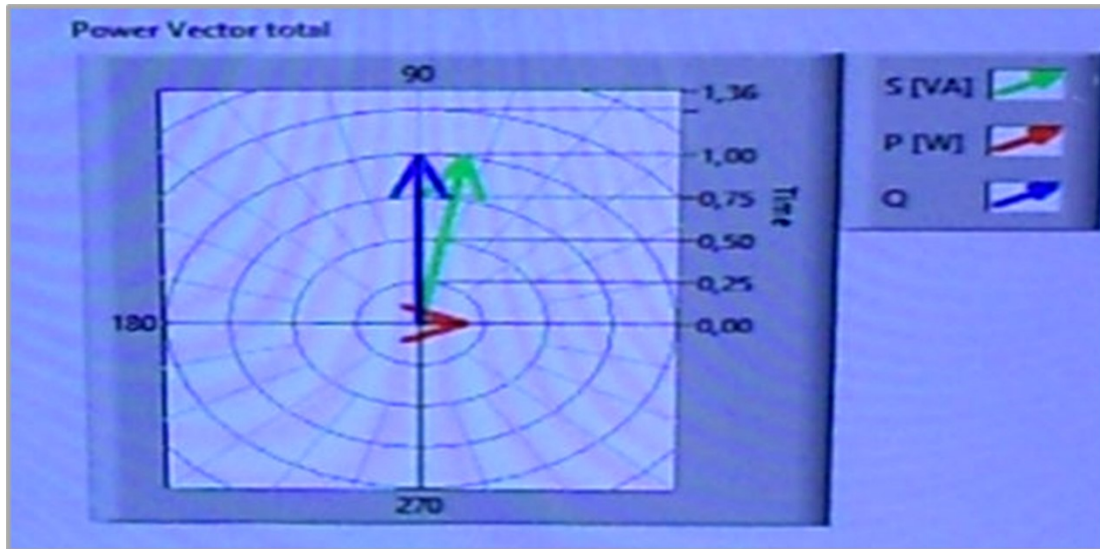


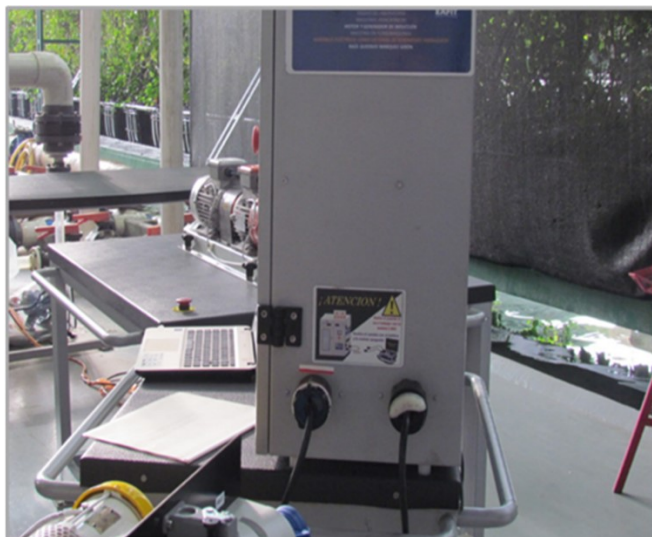
Figura 15.4. El programa LabVIEW *Electrical_Monitoring_PC.vi*

El programa LabVIEW *Electrical_Monitoring_PC.vi* fue el que se corrió en LabVIEW. Este montaje se realizó en conjunto con el ingeniero Sylvain Richard y el profesor Francisco Javier Botero.



La figura 15.5 muestra la grafica de los vectores de potencias obtenido directamente por LabVIEW. Se observa la poca carga del generador (potencia activa en W). Se tiene una carga de 3 bombillos LED de 7 W cada uno configurados en una carga en Δ trifásica balanceada.

El banco de trabajo actual de la tesis tuvo en cuenta la conexión de la maleta LabVIEW y para esto se implementaron dos conectores en el lado derecho del tablero que se conectan tal como se muestra en la etiqueta que tiene el equipo como guía de conexión. Ver figura 15.6



El puente que se observa deberá estar conectado cuando no se trabaja con la maleta LabVIEW.



Figura 15.6. Punto de conexión de la maleta LabVIEW Compact RIO en el tablero de control del banco de trabajo.

Comunicación remota del equipo con un PC en otro lugar.

Operación del equipo asistida por un técnico en el laboratorio.

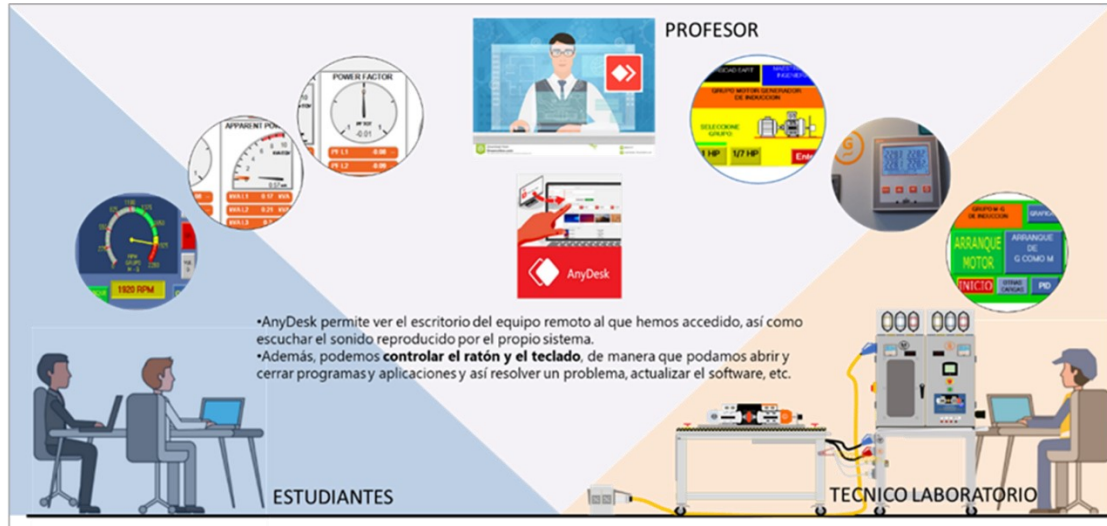


Figura 15.7. Comunicación remota del equipo con un PC en otro lugar.

AnyDesk se usa para acceder desde un dispositivo (móvil o ordenador) a otro de forma remota y que son útiles para controlar el ordenador desde el móvil. Hay varias, pero una de las más populares es AnyDesk; no solo porque funciona bien sino porque es completamente gratuita para uso personal. Ver figura 15.7

Practica de colocar una fuente de CD para excitación reactiva de los devanados a cambio de encender el motor \textcircled{M} como generador \textcircled{G}

Se busca con esta practica excitar magnéticamente los devanados de la maquina asíncrona mediante un voltaje de DC (6 -12VDC) aplicado por unos pocos segundos a corriente nominal, para luego impulsar la maquina como generador con las capacitancias calculadas conectadas. Este método busca reemplazar el arranque de \textcircled{G} como \textcircled{M} .

Este tema lo colocamos como nueva vía de desarrollo ya este ensayo aún no se ha validado en el banco de trabajo. Según la literatura al respecto, funciona. Ver figura 15.8

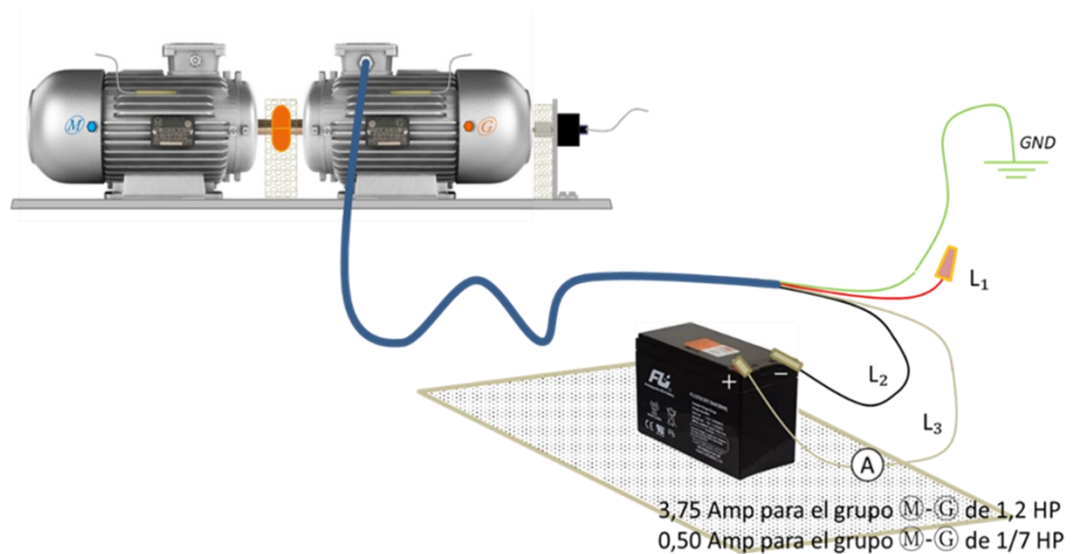


Figura 15.8. Practica de colocar una fuente de CD para excitación reactiva de los devanados a cambio de encender el motor \textcircled{M} como generador \textcircled{G} .

- Otros temas a tratar:
- El aerogenerador. Maquina a síncrona actuando como generador impulsada por el viento.
- Mayor automatización: Un PLC con más I/O disponibles y con un HMI con más funciones y mayor capacidad de gráficos de tendencias. Nuevas acciones en automatización. Regulación del voltaje y de la frecuencia.
- Banco de condensadores poli funcional asistido por un PLC. Reuniendo en un solo bloque de trabajo la configuración en paralelo como para la configuración en serie.
- Integración con los sistemas de Paneles Solares. Este método permite asistir al generador asíncrono tanto en sus momentos de falla como en el tema de la regulación del voltaje y la frecuencia. Y combinado con el tema de *Practica de colocar una fuente de CD para excitación reactiva de los devanados a cambio de encender el motor \textcircled{M} como generador \textcircled{G}* , se prestaría para reforzar el comportamiento del equipo en su modalidad en solitario (STAND ALONE – no conectado a una red de energía principal o de una zona), el cual es bien importante en zonas alejadas o en la ruralidad en donde hay carencia de fuente de energía primaria. Es importante también para alternar con el sistema del arranque de \textcircled{G} como \textcircled{M} en el estudio en la universidad.
- Compensación por carga balasto, aplicada a generadores de inducción autoexcitados para pequeñas centrales Hidroeléctricas.
- La calibración de los sensores de temperatura y de velocidad de cada grupo \textcircled{M} - \textcircled{G} , con miras a mantener una entrega de datos por parte de equipo, confiable y permanente. Importante la ejecución de rutinas de calibración y de validación del tipo de sensor utilizado. Y también es importante adaptar los sensores de tal forma que su información no se afecte por variables externas a ellos.

Conclusión:

Esta aplicación eléctrica requiere de un constante estudio y actualización ya que día a día sus partes y sus temas relacionados son mejorados y optimizados.

Ya por ejemplo hoy se cuenta con motores de alta eficiencia y con unidades de control muy eficientes y económicas.

Las redes de datos evolucionan cada vez más en conjunto con los canales de comunicación.

Es por lo anterior, y por las características de las máquina asíncronas, que este tema tomará cada vez más vigencia.

Observo que en un futuro cercano será cada vez relevante el estudio de la maquina asíncrona en su modo generación G , dadas las bondades del motor M (actualmente son muchas las aplicaciones en el modo Motor) y de las muchas posibilidades de aplicación en el modo Generador que hay en el país tanto en la ruralidad como en la industria.

Capítulo 16

Anexos.

Objetivo específico:

Dar a conocer la información técnica **más** relevante de los principales elementos con los cuales se construyó el banco de trabajo.

Mucha de esta información se tomo para parametrizar los equipos y adecuarlos a los valores de las capacidades de los equipos del banco de trabajo.

Este estudio involucra muchos equipos que traen consigo manuales de usuario y guías de instalación.

Listaremos a continuación los siguientes:

- **Manuales**
- **Hojas técnicas**
- **Diagramas a mano**
- **Planos**

Manuales

- Manual de instalación y guía de operación del variador de frecuencia
- Manual de instalación y operación del enconder.
- Manuales del PLC.
- Manuales de medidores de parámetros eléctricos.
- Manual del frecuencímetro
- Manual de motores eléctricos Techtop serie MS

MANUAL DE INSTALACIÓN Y GUÍA OPERATIVA DE VARIADORES DE FRECUENCIA ELECTRÓNICOS.

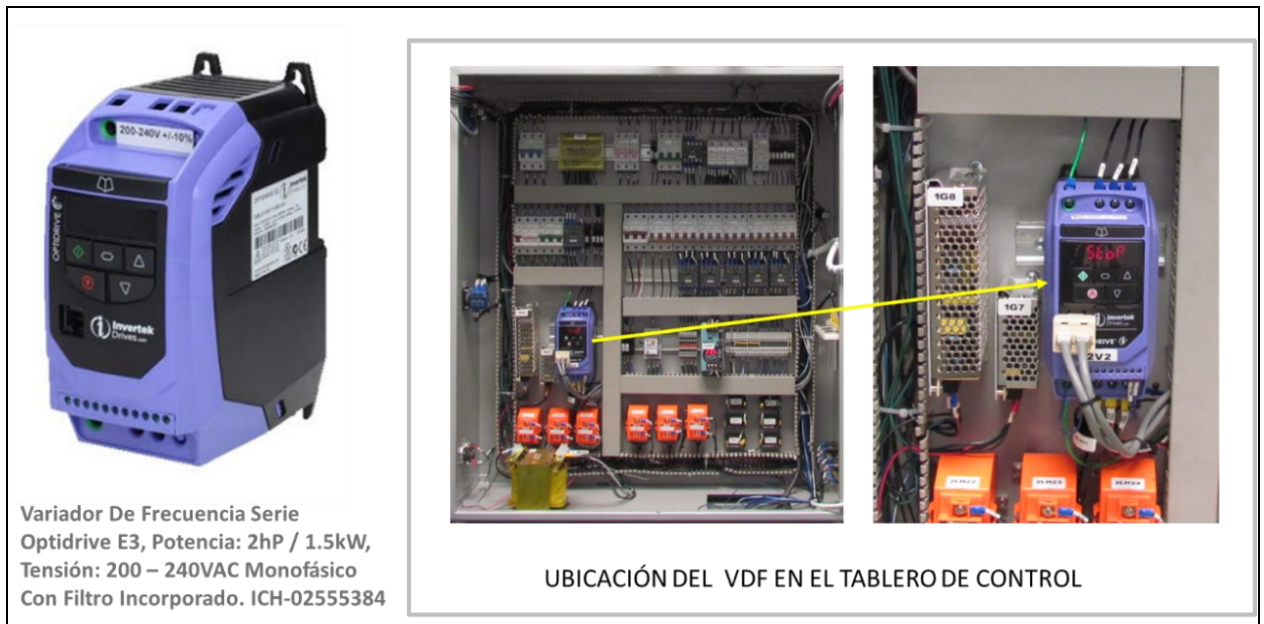


Figura 16.1 Información relacionada con el VDF. Abajo se observan dos portadas anexos relacionados con la instalación, la programación y la parametrización del VDF que asiste al motor del grupo M - G .



Guía del Usuario

OPTIDRIVE™ E^3

Salida Monofásica

IP20 & IP66 (NEMA 4X)

Convertidor de Frecuencia

0.37 – 1.1kW (0.5 – 1.5HP)

110 – 230V

Instrucciones de Instalación y Operación



Ver este manual en los anexos del trabajo

Manual utilizado para la programación del VDF.



Optidrive Applications Support Library

Application Note	AN-ODE-3-038
Title	Modbus RTU Control and Register Mapping
Related Products	Optidrive E3
Level	1 – Fundamental - No previous experience necessary 2 – Basic – Some Basic drives knowledge recommended 3 – Advanced – Some Basic drives knowledge required 4 – Expert – Good experience in topic of subject matter recommended
3	

Overview

Optidrive E3 drives support Modbus RTU communication, allowing a network of drives to be controlled and monitored by any Modbus RTU capable PLC or control system. The Optidrive is always a Slave to an external Modbus RTU Master. This document describes the registers and functions available.

Modbus RTU Protocol Specification

Protocol	Modbus RTU
Error check	CRC
Baud rate	9600bps, 19200bps, 38400bps, 57600bps, 115200bps (default)
Data format	1 start bit, 8 data bits, 1 stop bits, no parity.
Physical signal	RS 485 (2-wire)
User interface	RJ45

Modbus Telegram Structure

The following Modbus RTU Commands are supported

- 03 Read Holding Registers
- 06 Write Single Holding Register

The telegram structure is as follows:-

Command 03 – Read Holding Registers				Command 06 – Write Single Holding Register			
Master Telegram	Length	Slave Response	Length	Master Telegram	Length	Slave Response	Length
Slave Address	1 Byte	Slave Address	1 Byte	Slave Address	1 Byte	Slave Address	1 Byte
Function Code (03)	1 Byte	Function Code (03)	1 Byte	Function Code (06)	1 Byte	Function Code (06)	1 Byte
1 st Register Address	2 Bytes	Data Length	1 Byte	Register Address	2 Bytes	Register Address	2 Bytes
No. Of Registers	2 Bytes	1 st Register Value	2 Bytes	Value	2 Bytes	Register Value	2 Bytes
CRC Checksum	2 Bytes	2 nd Register Value	2 Bytes	CRC Checksum	2 Bytes	CRC Checksum	2 Bytes
		Etc...					
		CRC Checksum	2 Bytes				

Ver este manual en los anexos del trabajo

Manual utilizado para la parametrización de la red MODBUS.



Figura 16.2 Información relacionada con el Encoder del grupo M - G. Abajo se observa la hoja técnica de los encoders usados en este banco de trabajo. Cada grupo M - G posee un encoder. La parte resaltada en amarillo corresponde a los valores reales con se fabrico la unidad.

E50S Series

Diameter ø50mm Shaft type Incremental Rotary Encoder

Line-up

Features

- 12-24VDC power supply of line driver output(Line-up)
- Suitable for measuring angle, position, revolution, speed, acceleration and distance
- Power supply : 5VDC, 12-24VDC ±5%

Applications

- Various tooling machinery, packing machine and general industrial machinery etc.



⚠ Please read "Caution for your safety" in operation manual before using.



Ordering information (Former name : ENB)

E50S	8	8000	3	N	24	
Series	Shaft diameter	Pulse/1 Revolution	Output phase	Output	Power supply	Cable
Diameter ø50mm, shaft type	ø8mm	Refer to resolution	2: A, B 3: A, B, Z 4: A, A, B, B 6: A, A, B, B, Z, Z	T: Totem pole output N: NPN open collector output V: Voltage output L: Line driver output	5 :5VDC ±5% 24:12-24VDC ±5%	No mark: Cable type C: Connector cable type(※) CR: Axial connector type CS: Radial connector type

※Standard : E50S8-LINE-UP-3-N-24

※Cable length: 250mm

Specifications

Item	Diameter ø50mm shaft type of incremental rotary encoder	
Resolution(P/R) ^{※1}	•1, •2, •5, 10, 12, 15, 20, 23, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 75, 100, 120, 125, 150, 192, 200, 240, 250, 256, 300, 360, 400, 500, 512, 600, 800, 1000, 1024, 1200, 1500, 1800, 2000, 2048, 2500, 3000, 3600, 5000, 6000, 8000	
Output phase	A, B, Z phase(Line driver : A, A, B, B, Z, Z phase)	
Phase difference of output	Phase difference between A and B : $\frac{T}{2} \pm \frac{T}{8}$ (T=1cycle of A phase)	
Control output	Totem pole output	• Low - Load current:Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC • High - Load current: Max. 10mA, Output voltage(Power voltage 5VDC): Min. (Power voltage-2.0)VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC):Min. (Power voltage-3.0)VDC
	NPN open collector output	Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC
	Voltage output	Load current : Max. 10mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC
	Line driver output	• Low - Load current : Max. 20mA, Residual : Max. 0.5VDC • High - Load current : Max. -20mA, Output voltage(Power voltage 5VDC) : Min. 2.5VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC) : Min. (Power voltage-3.0)VDC
Response time (Rise/Fall)	Totem pole output	Max. 1μs
	NPN open collector output	
	Voltage output	
	Line driver output	
Max. Response frequency	300kHz	
Power supply	• 5VDC ±5%(Ripple P-P : Max. 5%) • 12-24VDC ±5%(Ripple P-P : Max. 5%)	
Current consumption	Max. 80mA(disconnection of the load), Line driver output : Max. 50mA(disconnection of the load)	
Insulation resistance	Min. 100MΩ(at 500VDC megger between all terminals and case)	
Dielectric strength	750VAC 50/60Hz for 1 minute(Between all terminals and case)	
Connection	Cable type, 250mm connector cable type, Connector type(Axial, Radial)	
Mechanical specification	Starting torque	Max. 70gf·cm(0.007N·m) ^{※2} / Max. 800gf·cm(0.08N·m) ^{※3}
	Moment of inertia	Max. 80g·cm ² (8×10 ⁻⁶ kg·m ²) ^{※2} / Max. 400g·cm ² (4×10 ⁻⁵ kg·m ²) ^{※3}
	Shaft loading	Radial : 10kgf, Thrust : 2.5kgf
	Max. allowable revolution ^{※4}	5000rpm
Vibration	1.5mm amplitude or 300m/s ² at frequency of 10 to 55Hz(for 1 min.) in each of X, Y, Z directions for 2 hours	
Shock	Approx. Max. 75G	
Environment	Ambient temperature	-10 to 70°C, storage : -25 to 85°C
	Ambient humidity	35 to 85%RH, storage : 35 to 90%RH
Protection	Cable type, Connector cable type: IP50(IEC standard) ^{※5} , Connector type: IP65(IEC standard)	
Cable	ø5, 5-wire, Length : 2m, Shield cable(Line driver output : ø5, 8-wire)(AWG 24, Core diameter : 0.08mm, Number of cores : 40, Insulator out diameter : ø1)	
Accessory	ø8mm coupling, bracket	
Approval	Cable type (Except for line driver output)	
Unit weight	Approx. 275g, Connector type : 180g	

※1: "" pulse is only for A, B phase(Line driver output is for A, A, B, B phase). ※2: This value is for Cable type, Connector cable type(Protection: IP50).

※3: This value is for Cable type, Connector cable type(Protection: IP64)/Connector type (Protection: IP65)

※4: Make sure that max. response revolution should be lower than or equal to max. allowable revolution when selecting the resolution.

Max. response resolution(rpm) = $\frac{\text{Max. response frequency}}{\text{Resolution}} \times 60 \text{ sec}$ ※5: *Cable type, Connector cable type is option as IP64 protection.

※ Environment resistance is rated at no freezing or condensation.

F-18

Autonics

Ver este manual en los anexos del trabajo

Manual utilizado para la instalación del Encoder y la parametrización del PLC.



Samba 3.5™- Programmable
Logic Controller + Superb HMI
Marca Unitronics
MOD. SM35-J-RA22

Controlador lógico programable (PLC) de funciones completas con pantalla táctil a todo color de alta resolución incorporada y configuraciones de E / S integradas.

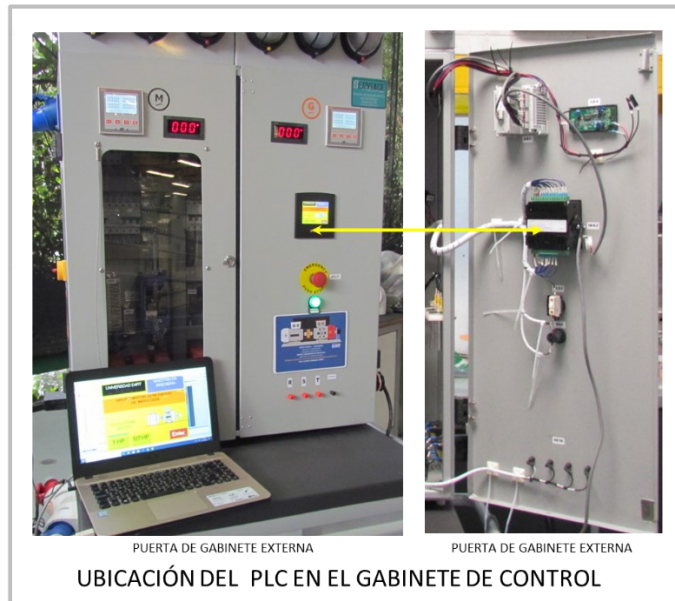


Figura 16.3 Información relacionada con el PLC del grupo M - C . Se observan abajo hojas técnicas de instalación y cableado del PLC así como también los manuales de programación tanto de la parte lógica como la de la parte del HMI. Incluye también la parte de comunicaciones y la parte de programación de la función PID.

La parte resaltada en amarillo en la siguiente hoja corresponde al modelo del PLC usado en este trabajo.

Samba™ PLC+HMI		Installation Guide	
SM35-J-RA22/SM43-J-RA22	<ul style="list-style-type: none"> 12 Digital Inputs, including 1 HSC/Shaft-encoder Inputs, 2 Analog Inputs, 2 PT100/TC inputs 		
SM70-J-RA22	<ul style="list-style-type: none"> 8 Relay Outputs 2 Analog Outputs 		
General Description			
All of the controllers covered in this guide are micro-PLC+HMI, rugged programmable logic controllers that comprise built-in operating panels and on-board I/Os.			
Item	SM35-J-RA22	SM43-J-RA22	SM70-J-RA22
On-board I/O	Model Dependent		
Screen	3.5" Color Touch	4.3" Color Touch	7" Color Touch
Keypad or Function Keys	None		
Programming Com Port, Built-in			
RS232	Yes	None	None
USB device, mini-B	None	Yes	Yes
Com Ports, separate order, user-installed	The user may install a CANbus module (V100-17-CAN), and one of the following: <ul style="list-style-type: none"> RS232/RS485 port (V100-17-RS4/V100-17-RS4X) Ethernet (V100-17-ET2) 		
Standard Kit Contents			
Item	SM35-J-RA22	SM43-J-RA22	SM70-J-RA22
Controller	Yes		
Terminal Blocks	Yes		
Battery	Yes (installed)	Yes (installed)	Yes
Mounting Brackets	Yes (2 parts)	Yes (4 parts)	Yes (6 parts)
Rubber Seal	Yes		
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p style="color: red;">Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.</p> </div>			
Unitronics		1	

Guía de instalación del PLC.

Vision™ OPLC™



V130 COM Modules: V100-17-CAN, V100-17-RS4/X, V100-17-ET2

This guide shows you how to install an additional communication module in a V130 controller. Instructions and technical specifications are included for modules:


- V100-17-CAN (CANbus)
- V100-17-RS4 (RS232/RS485, not isolated)
- V100-17-RS4X (RS232/RS485, isolated)
- V100-17-ET2 (Ethernet)

Danger Symbols

When any of the following symbols appear, read the associated information carefully.


Symbol	Meaning	Description
	Danger	The identified danger causes physical and property damage.
	Warning	The identified danger could cause physical and property damage.
Caution	Caution	Use caution.

- Before using this product, the user must read and understand this document.
- All examples and diagrams are intended to aid understanding, and do not guarantee operation. Unitronics accepts no responsibility for actual use of this product based on these examples.
- Please dispose of this product according to local and national standards and regulations.
- Only qualified service personnel should open this device or carry out repairs.

 Failure to comply with appropriate safety guidelines can cause severe injury or property damage.

- Do not attempt to use this device with parameters that exceed permissible levels.
- To avoid damaging the system, do not connect/disconnect the device when power is on.

Environmental Considerations

 Do not install in areas with: excessive or conductive dust, corrosive or flammable gas, moisture or rain, excessive heat, regular impact shocks or excessive vibration.

- Do not place in water or let water leak onto the unit.
- Do not allow debris to fall inside the unit during installation.

General

- Turn off power before making communications connections.
- Do not touch live wires

- Unused pins should not be connected. Ignoring this directive may damage the device.
- Double-check all wiring before turning on the power supply.

Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.

Unitronics

Modulo adicional de comunicaciones MODBUS para comunicación RS485.



SOFTWARE MANUAL

VISILOGIC - GETTING STARTED

V230-21-G23 Rev: 3:00

Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.



Este manual proporciona una visión general del entorno del programa VisiLogic, configuración de hardware, configuración del controlador, acceso remoto, utilidades y herramientas, además de apéndices sobre las formas de solución de problemas y del controlador de visión.



SOFTWARE MANUAL

VISILOGIC: LADDER PROGRAMMING

V230-21-G23 Rev. 3:00

Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.



El manual de programación Ladder del programa VisiLogic se utiliza para crear el diagrama de escalera que comprende su aplicación de control. Los diagramas de escalera se componen de contactos, bobinas y elementos de bloque de funciones dispuestos en redes. En un diagrama de escalera, los contactos representan condiciones de entrada. Estos comandan la energía desde el riel izquierdo de la escalera al riel derecho. Por eso el primer elemento de una red siempre debe tocar el carril izquierdo. Las bobinas representan instrucciones de salida. Para poder activar bobinas de salida, el estado lógico de los contactos debe permitir la poder fluir a través de la red hasta la bobina. Por eso los elementos de una red deben estar todos conectados.

Cada red debe contener solo un peldaño.

Utilice el editor de escalera para:

Colocar y conectar elementos de escalera.

Aplique en todo lo anterior las funciones Comparar, Matemáticas, Lógica, Reloj, Almacenar y Vector.

Permite además Insertar bloques de función (FB) en el programa.

Y permite crear módulos y subrutinas en el programa y permite además crear y utilizar subrutinas internas

Otras funciones:

- Saltos y etiquetas.
- Colocar comentarios en las redes de escalera.
- Los elementos y funciones de escalera se pueden arrastrar y soltar entre redes.



SOFTWARE MANUAL

VISILOGIC: HMI APPLICATIONS

V230-21-G23 Rev. 3.00

Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.



El editor de pantallas HMI se utiliza para crear las pantallas que muestra el controlador en su pantalla después de descargar el programa.

Cuando hace clic en HMI en el árbol del explorador de proyectos, se abre una réplica de pantalla.

La réplica refleja el tipo de controlador de visión que ha seleccionado en la configuración de hardware de su proyecto.

Las pantallas les dicen a sus operadores qué hacer. Puede hacer que sus operadores inicien sesión con una contraseña, ingrese los puntos de ajuste y otros datos, e instruya al operador qué hacer en caso de un problema del sistema o una alarma.

Una pantalla puede contener tanto texto e imágenes.
El texto y las imágenes pueden ser tanto fijos como variables.
Si el proyecto se basa en un controlador de pantalla táctil, también puede asignar toque propiedades a los objetos en pantalla.



SOFTWARE MANUAL

VISILOGIC: UTILITIES

V230-21-G23 Rev: 3:00

Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.




El manual de Utilidades ofrece una amplia gama de opciones, para este trabajo utilizamos sobre todo la función PID SERVER para el control del voltaje de salida del generador con la frecuencia de entrada del motor como punto de consigna (set point).



The image shows the cover of a manual titled "Comunicación Modbus con Unitronics Tutorial". The cover features the "SIDE" logo at the top left, a small image of a control panel, and the "UNITRONICS" logo in the center. A red box contains the text "Ver este manual en los archivos anexos del trabajo." Below this, there is a table with technical details. At the bottom, there is a small image of industrial equipment and a footer with the text "Created with novaPDF Printer (www.novaPDF.com). Please register to remove this message."

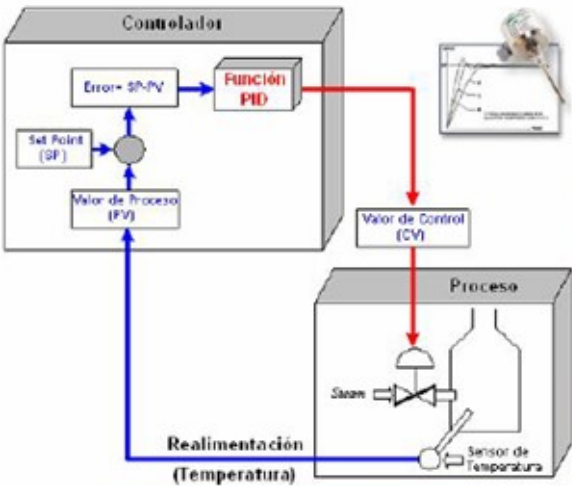
Contenido:	En este tutorial veremos como configurar el unitronics para una comunicación Modbus
Familia:	Unitronics
Autor:	Departamento Postventa / Departamento Ingeniería
Revisión:	1.0 – Abril'10

Utilizamos este manual, el cual tiene ejemplos gráficos, para programar el PLC y para trabajar como maestro en una comunicación MODBUS RS485.




TUTORIAL UNITRONICS

Función PID



Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.

Contenido:	Explicación detallada de la función PID en un sistema de calefacción con Unitronics.
Familia:	Unitronics
Autor:	José Ignacio Redondo
Revisión:	1.0 03-11-2008



Utilizamos este manual, el cual tiene un ejemplo gráfico completo para usar la función PID SERVER, para programar y configurar el PID que regula el voltaje de salida del generador ©.

El PID SERVER es una herramienta muy útil para realizar el AUTO-TUNE o para monitorear el sistema.



**DMG 610 LOVATO
ELECTRIC**

Medidor de parámetros
de red; para panel; digital,
montaje

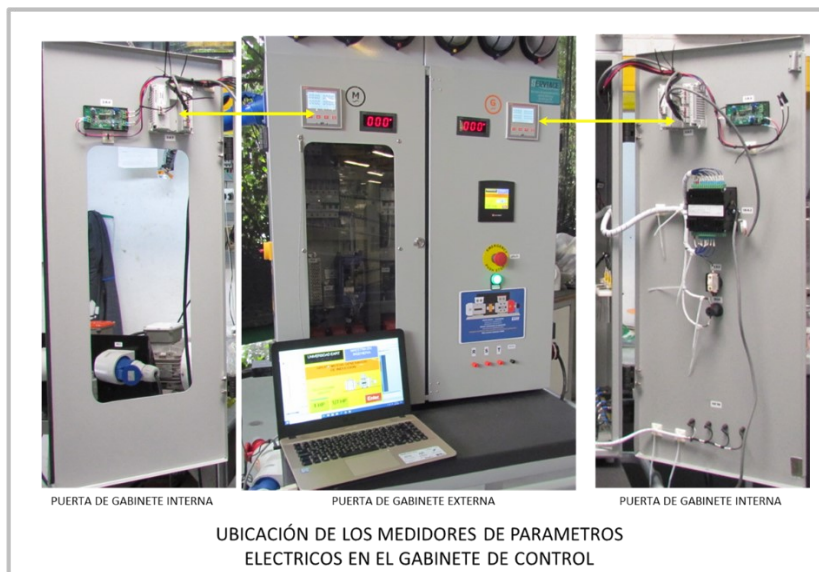


Figura 16.4 Información relacionada con los medidores de variables eléctricas del banco de trabajo.

Cada parte posee un medidor : \textcircled{M} posee un medidor y \textcircled{G} posee un medidor.

Abajo se muestran las portadas de los manuales de uso y programación de estos multímetros así como también la portada del manual para la comunicación MODBUS.



LOVATO ELECTRIC S.P.A.
24020 GORLE (BERGAMO) (ITALIA)
VIA DOR E. MAZZA, 12
TEL. 035 4282111
TELEFAX (Nazionale): 035 4282200
TELEFAX (International): +39 035 4282400
Web: www.LovatoElectric.com
E-mail: info@LovatoElectric.com



DMG600 – DMG610

Multímetro digital

MANUAL DE INSTRUCCIONES



DMG600 – DMG610

Digital multimeter

INSTRUCTIONS MANUAL



H11EGB0614



ADVERTENCIA

- Leer atentamente el manual antes de instalar y utilizar el multímetro.
- Este dispositivo debe ser instalado por personal cualificado conforme a la normativa de instalación vigente a fin de evitar daños personales o materiales.

- Antes de realizar cualquier operación en el dispositivo, desconectar el contenido de las entradas de alimentación y medida y cortocircuitar los transformadores de corriente.
- El fabricante no se responsabiliza de la seguridad eléctrica en caso de que el dispositivo no se utilice de forma adecuada.
- Los productos descritos en este documento se pueden actualizar o modificar en cualquier momento. Por consiguiente, las descripciones y los datos técnicos aquí contenidos no tienen valor contractual.
- La instalación eléctrica del edificio debe disponer de un interruptor o disyuntor. Este debe encontrarse cerca del dispositivo, en un lugar al que el usuario puede acceder con facilidad. Además, debe estar identificado como tal (IEC/EN 61010-1 § 6.11.2).
- Limpiar el dispositivo con un trapo suave; no utilizar productos abrasivos, detergentes líquidos o disolventes.

Índice	Página
Introducción	1
Descripción	2
Funciones de las teclas frontales	2
Indicaciones en pantalla	2
Visualización de medidas	3
Tabla de páginas de la pantalla	4
Desplazamiento por las páginas de la pantalla	5
Indicación de los contadores de energía	5
Indicación del contador horario	5
Indicación del estado de los límites (LIMn)	6
Capacidad de expansión	6
Puerto de programación IR	7
Configuración de parámetros mediante un ordenador, una tableta o un smartphone	7
Menú principal	8
Configuración de parámetros (setup) mediante el panel frontal	8
Tabla de parámetros	8
Alarmas	13
Menú de comandos	14
Prueba de conexión	14
Uso de la llave CX01	15
Uso de la llave CX02	15
Instalación	16
Esquemas de conexión	17
Disposición de los terminales	18
Dimensiones mecánicas y escotadura del panel (mm)	19
Características técnicas	19
Historial de revisiones del manual	20

Introducción

Los multímetros DMG600 y DMG610 están diseñados para ofrecer máxima facilidad de uso con una gran variedad de funciones avanzadas. Realizados para montarse en panel con tamaño estándar de 96x96 mm, combinan el moderno diseño del frontal con una instalación práctica y la posibilidad de expansión por la parte trasera, en la que se puede alojar un módulo de expansión (EXP). El frontal dispone de la interface óptica de infrarrojos que permite realizar la programación por USB o WiFi. La pantalla LCD retroiluminada proporciona una interface de usuario clara e intuitiva. Además, el modelo DMG610 dispone de una interface de comunicación RS485 aislada con protocolo Modbus para permitir la supervisión.

Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.



WARNING!

- Carefully read the manual before the installation or use.
- This equipment is to be installed by qualified personnel, complying to current standards, to avoid damages or safety hazards.

- Before any maintenance operation on the device, remove all the voltages from measuring and supply inputs and short-circuit the CT input terminals.
- Products illustrated herein are subject to alteration and changes without prior notice.
- Technical data and descriptions in the documentation are accurate, to the best of our knowledge, but no liabilities for errors, omissions or contingencies arising there from are accepted.
- A circuit breaker must be included in the electrical installation of the building. It must be installed close by the equipment and within easy reach of the operator. It must be marked as the disconnecting device of the equipment: IEC/EN 61010-1 § 6.11.2.
- Clean the instrument with a soft dry cloth; do not use abrasives, liquid detergents or solvents.

Index	Page
Introduction	1
Description	2
Keyboard functions	2
Display indications	2
Viewing of measurements	3
Table of display pages	4
Display pages navigation	5
Indication of energy meters	5
Indication of hour meter	5
Indication of limit thresholds (LIMn)	6
Expandability	6
IR programming port	7
Parameter setting through PC, Tablets or Smartphones	7
Main menu	8
Setting of parameters (setup) from front panel	8
Parameter table	8
Alarms	13
Commands menu	14
Wiring test	14
CX01 dongle usage	15
CX02 dongle usage	15
Installation	16
Wiring diagrams	17
Terminals position	18
Mechanical dimensions and front Panel cutout (mm)	19
Technical characteristics	19
Manual revision history	20

Introduction

The DMG600 and DMG610 multimeters have been designed to combine the maximum possible easiness of operation together with a wide choice of advanced functions. The flush-mount 96x96mm housing joins the modern design of the front panel with the tool-less mounting of the device body and the expansion capability of the rear panel, where it is possible to mount plug-in one module of EXP... series. The front panel is equipped with an infrared optical interface that allows programming through USB or WiFi dongles. The backlit LCD display offers a user-friendly interface. Model DMG610 is also provided with a isolated RS-485 interface with Modbus protocol to consent remote supervision.






Los medidores de parámetros eléctricos LOVATO DMG610 están diseñados para ofrecer máxima facilidad de uso con una gran variedad de funciones avanzadas. Estos combinan el moderno diseño del frontal con una instalación práctica y la posibilidad de expansión por la parte trasera, en la que se puede alojar un módulo de expansión (EXP). La parte frontal dispone de la interface óptica de infrarrojos que permite realizar la programación por USB o WiFi.


La pantalla LCD retroiluminada proporciona una interface de usuario clara e intuitiva. Además, el modelo DMG610 dispone de una interface de comunicación RS485 aislada con protocolo Modbus para permitir la supervisión.

Este manual es la base para la puesta en funcionamiento de este medidor.

Se utilizo un medidor para la función  Motor y un medidor para la función  Generador.

<p>3116244</p> <p>1317IGB05_15</p>  <p>LOVATO ELECTRIC S.P.A. 24020 GORLE (BERGAMO) ITALIA VIA DON E. MAZZA, 12 TEL. 035 4282111 TELEFAX (Nazionale): 035 4282200 TELEFAX (Internazionale): +39 035 4282400 Web: www.LovatoElectric.com E-mail: info@LovatoElectric.com</p>	<p> SERIE DMG</p> <p>Multimetri - analizzatori digitali</p> <p>PROTOCOLLO DI COMUNICAZIONE MODBUS®</p>	<p> DMG SERIES</p> <p>Digital multimeters-analyzers</p> <p>MODBUS® COMMUNICATION PROTOCOL</p>
---	---	---

Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.

 Doc. I317IGB05_15.doc 19/05/2015 P. 1 / 43

PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN MODBUS

El multímetro digital DMG600-610, DMG700, DMG800 y DMG900 admiten la comunicación protocolos Modbus RTU, Modbus ASCII y Modbus TCP en los módulos de expansión:

- EXP 10 10 USB
- EXP 10 11 RS232
- EXP 10 12 RS485
- EXP 10 13 Ethernet

Usando esta función es posible leer el dispositivo estado y para controlar las unidades a través del software eléctrico Xpress de Lovato, para relacionarse con terceros tales como, HMI, SCADA, PLC's u otros dispositivos inteligentes.

Acá lo usaremos para trabajar una red Modbus RS485 en donde un PLC es el maestro y los demás dispositivos son esclavos.

Este manual lo utilizaremos para escoger las variables que se llevarán al PLC vía MODBUS y con las cuales se realizará control.

VARIABLES tales como: Frecuencia de salida, voltaje real del motor, voltaje de salida del generador, etc.

MANUALES DE INSTALACIÓN Y GUÍA DE OPERACIÓN DEL FRECUENCIMETRO



MARCA DHC
MOD. DHC3PB-VAZ

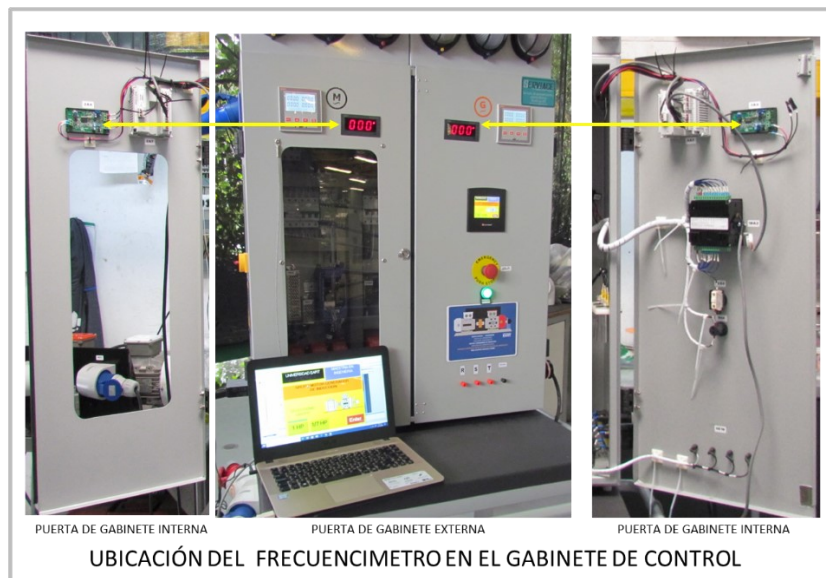


Figura 16.5 Información relacionada con los medidores de frecuencia ubicados en la parte frontal del banco de trabajo.

Cada parte posee un frecuencímetro : \textcircled{M} posee un medidor de frecuencia y \textcircled{A} posee un medidor de frecuencia..

Abajo se muestra la hoja técnica de este equipo. A pesar de que esta en lenguaje mandarín es muy intuitivo y se puede operar fácilmente.

La hoja se muestra como una referencia del frecuencímetro utilizado.

■ 特点

- DHC3PB-VAZ 同时具备测量交流电压、交流电流、频率 3 功能，并有单一功能板供用户选择
- 通过面板按钮选择显示当前功能测量值(多功能表)
- 交流电流功能自带电流互感器，可直接测量 100A 以下交流电流
- 高性价比，显示大，美观



■ 型号说明

DHC3PB-VAZ——3 位交流电压、电流、频率 3 功能表（自带交流电流互感器，测量功能通过面板按钮切换）

DHC3PB-AV——3 位交流电压表

DHC3PB-AA——3 位交流电流表（自带交流电流互感器）

DHC3PB-HZ——3 位频率表

以下型号产品另附说明书：

DHC3PB-3X——三相电压表（通过面板按钮切换显示一相电压）

DHC3PB-DV——3 位半直流电压表

DHC3PB-4AV——4 位交流电压表

DHC3PB-4DV——4 位直流电压表

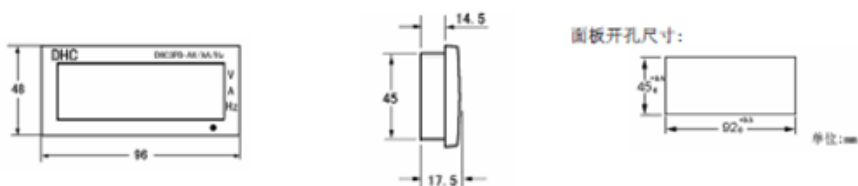
DHC3PB-4AA——4 位交流电流表

DHC3PB-4DA——4 位直流电流表

■ 技术参数

- 电 源：DC12V±10%
- 交流整流线路：正弦波平均值检波
- 精 度：±(1%FS+1个字)
- 采样速率：约5次/秒
- 测量范围：电压测量范围：10V~600V
电流测量范围：1.0A~99.9A
频率测量范围：10.0~99.9Hz
- 最大输入：各规格量程的110%
- 响应速度：约4.5秒（最大范围）
- 显 示：3位0.8英寸LED数显
- 开孔尺寸：45×92mm
- 重 量：净重约90g(含约30g的互感器重量)
- 安装方式：面板式
- 功 耗：<1W
- 工作环境温度：0~50℃
- 工作环境湿度：35~85%RH

■ 外型尺寸



Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.

El medidor de tablero DHC₃PB-VAZ tiene 3 funciones para medir Voltaje CA, Corriente CA y Frecuencia al mismo tiempo.

Se cuenta con una secuencia de tablero para cada función que los usuarios elijan: Seleccionar y mostrar el valor de medición de la función actual a través de los botones del panel (medidor multifunción)

La función de corriente CA viene con un transformador de corriente, que puede medir directamente la corriente CA por debajo de 100A

Rendimiento de alto costo, pantalla grande y apariencia agradable.
Lo usaremos en este trabajo sobre todo para visualizar en el tablero el valor de la frecuencia tanto en M como en G .

MANUALES DE INSTALACIÓN Y GUÍA DE OPERACIÓN MOTORES Y GENERADORES ASINCRONOS



MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO

Serie MS

MARCA TECHTOP

Motores trifásicos asíncronos con cubierta de aluminio

Características:

- Desempeño estable, seguro y funcionamiento confiable.
- Aspecto agradable y de fácil mantenimiento.
- Bajo nivel de ruido, poca vibración.
- Peso ligero y de estructura sencilla.
- Para uso en general.



Figura 16.6 Información relacionada con los motores y los generadores asíncronos de inducción trifásicos..

Cabe anotar que la información relacionada menciona a los equipos tal como si fuesen a ser utilizados en el modo motor M .

Precisamente este estudio puede ayudar a saber que tipos de maquinas asíncronas de inducción pueden ser las más aptas para seleccionarse para trabajar en el modo generador G . Ver el capítulo 1: Marco teórico. Es interesante anotar que los motores de jaula de ardilla simple son más aptos para el trabajo como Generador G que los de jaula doble.

Ver abajo los ítems resaltados con amarillo, los cuales corresponden a las máquinas seleccionadas en este trabajo.



Catálogo General



Ver este manual en los archivos anexos del trabajo.

CATALOGO GENERAL TECHTOP

Este es el catalogo de las maquinas asíncronas utilizadas en este proyecto, unas de ellas se usan como motor (M) y otras como generador (G).

Estas maquinas son marca TECHTOP y pertenecen a la serie MS, la cual esta diseñada y construida acorde a los estándares europeos de eficiencia IE1 e IE2.

Forma constructiva B3/B5

Grado de protección IPE 55

Selección de maquina a utilizar en el proyecto.

Valores eléctricos (50Hz) - Clase de eficiencia energética IE1-4 Polos

Tamaño de carcasa	Potencia (KW)	Corriente (A)			Corriente (A)			Corriente (A)			RPM	Rend (%)	(Coseφ)	Ms/ Mn	Mmax/ /Mn	Mn (nM)	Is/ In	dB(A)	Peso (kg)
		220V	380V	660V	230V	400V	690V	240V	415V	720V									
MS 561-4	0,06	0,64	0,37	0,21	0,61	0,35	0,2	0,58	0,34	0,19	1360	50	0,56	2,3	2,4	0,48	4	50	2,9
MS 562-4	0,09	0,82	0,47	0,27	0,78	0,45	0,26	0,75	0,43	0,25	1360	52	0,59	2,3	2,4	0,48	4	50	3,2
MS 563-4	0,12	1	0,58	0,33	0,95	0,55	0,32	0,92	0,53	0,31	1360	52	0,64	2,2	2,4	0,93	4	52	3,7
MS 631-4	0,18	1,28	0,74	0,43	1,21	0,7	0,4	1,17	0,67	0,39	1310	57	0,65	2,2	2,4	1,28	4	52	4,2
MS 632-4	0,25	1,66	0,96	0,55	1,58	0,91	0,53	1,52	0,88	0,51	1340	60	0,66	2,2	2,2	1,77	4	54	5,0
MS 633-4	0,25	1,52	0,88	0,51	1,45	0,84	0,48	1,39	0,81	0,46	1350	60	0,72	2,2	2,4	1,78	6	55	5,0
MS 711-4	0,37	2,02	1,17	0,67	1,92	1,11	0,64	1,85	1,07	0,62	1370	65	0,74	2,2	2,4	2,62	6	55	5,8
MS 712-4	0,55	2,92	1,69	0,97	2,78	1,6	0,93	2,67	1,55	0,89	1380	66	0,75	2,2	2,4	3,86	6	57	6,5
MS 713-4	0,55	2,87	1,66	0,96	2,74	1,58	0,91	2,63	1,52	0,88	1370	67	0,75	2,2	2,4	3,87	6	58	8,1
MS 801-4	0,75	3,5	2,03	1,17	3,34	2,33	1,11	3,21	1,86	1,07	1380	72	0,78	2,2	2,4	5,27	6	58	9,1
MS 802-4	1,1	4,86	2,81	1,62	4,63	2,87	1,54	4,45	2,67	1,48	1390	76,2	0,78	2,2	2,4	7,61	6	60	11,0
MS 803-4	1,1	4,8	2,78	1,6	4,57	2,84	1,52	4,4	2,54	1,47	1400	76,2	0,79	2,2	2,4	7,6	6	61	11,7

Ⓜ y Ⓞ del grupo de 1/7HP

Ⓜ y Ⓞ del grupo de 1.2HP

Ver esta información en los archivos anexos del trabajo.

Hojas técnicas.

Veremos a partir de esta parte del capítulo, una serie de hojas técnicas de elementos utilizados en el montaje del equipo y que nos parece relevante mencionarlos.

- Sensor de temperatura RTD.
- Toma trifásicos para motores.
- Tomas para múltiples señales.
- Contactores trifásicos para motores.
- Protecciones de corto circuito para motores

HOJA TECNICA SENSOR DE TEMPERATURA

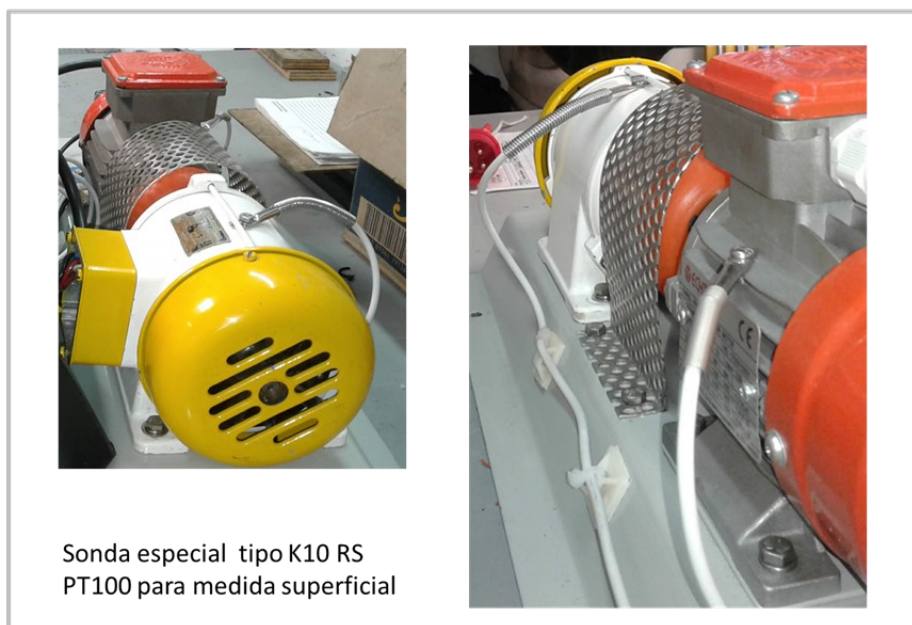


Figura 16.7 *Sondas térmicas para los motores. Medición de la temperatura de la carcasa. PT100 de contacto.*



Cable-sensor

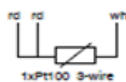
Type K10RS

Issue 11/19

Ver esta hoja técnica en los archivos
anexos del trabajo. Datasheets.

Sensor

1 x Pt100 F0,3 (old cl. B) acc. to DIN EN 60751
3-wire-circuit



Protective tube material

Aluminium (200°C)
Stainless steel (400°C)

Cable

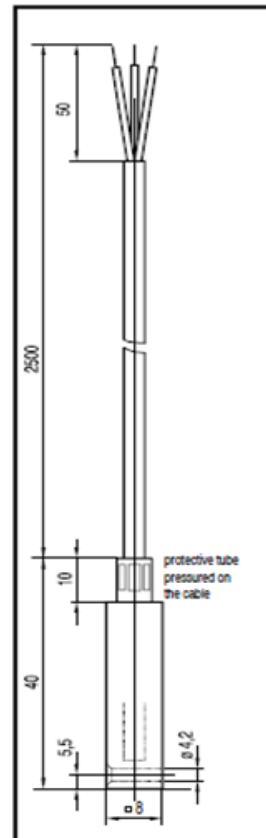
TeSi 3x0,34 (200°C)
GIGIV 3x0,22 (400°C)

Cable length

2500 mm

Order Example

K10-E-3LS-200



Subject to change without notice

D- 99331 Geratal OT Geraberg, Gewerbepark 6

Tel: +49 (0) 3677/7956-0 // Fax: +49 (0) 3677/ 795 625

E-Mail: info@electrotherm.de

Internet: www.electrotherm.de

Tipo K10 — Sensor de cable para altas temperaturas, PT100 Termómetro de resistencia para medidas de superficie

Medida y control de temperatura en diversos lugares de aplicación

Rango de temperaturas: -50 °C → +200 °C o +400 °C

Resorte antipliegue

Carcasa de aluminio (8 x 8 x 40 mm) con centro de fijación y cable de conexión

Circuito de tres conductores

Precisión de clase B

Cable de conexión de 2,5 m

Versión de 400 °C con funda de cable reforzada con fibra de vidrio.

Especificaciones

Atributo	Valor
Tipo de Termopar	PT 100
Diámetro de Sonda	M4
Longitud de Sonda	40mm
Máxima Temperatura Detectada	+400°C
Tipo de Terminación	Cable
Longitud del Cable	2.5m

Ver este manual en los archivos anexos del trabajo. Datasheets.



**CATÁLOGO
DE PRODUCTO**
• 2016-2017 •

SOLUCIONES DE CONECTIVIDAD
INDUSTRIAL



Laumayer
EN EQUIPOS ELÉCTRICOS Y CONECTIVIDAD EN PROFESOR TOTAL.

Ver este catálogo en los archivos anexos del trabajo. Datasheets.

Las tomas y clavijas VCP de fabricación austriaca están certificadas bajo las normas internacionales IEC 60309-1 e IEC 60309-2, las cuales han sido aceptadas como las normas estándar mundiales para las tomas y clavijas industriales. Al certificarse bajo estas normas, implica que de manera obligatoria se debe cumplir con 27 requisitos de producto muy exigentes y que no se pueden obviar; estos requisitos cubren y superan los requerimientos que hace el RETIE para este tipo de

producto. De hecho, los productos de diferentes fabricantes estandarizados bajo la IEC 60309 son compatibles unos con otros.

De los múltiples requisitos que imponen las normas IEC 60309-1 e IEC 60309-2, los que más resaltan son los siguientes: niveles de corriente, rangos de voltaje, código de colores, número de polos, posición del polo a tierra y protección IP.

Rango de trabajo usados en este trabajo: 32 A.

Para este trabajo usamos tomas y clavijas industriales marca VCP para diferenciar el trabajo de la parte de motor M (color azul) y de la parte de generación G (color rojo).

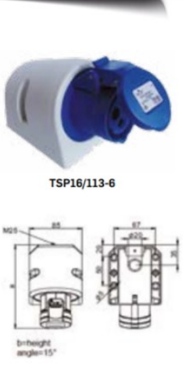

Nota: la acometida de potencia del tablero comprende una instalación en tomas industriales color azul en el tablero, por un lado y en tomas industriales de media vuelta LEVITON para conectarse con la toma de la universidad por el otro. Ver figuras 16.8, 16.9 y 16.10

HOJA TECNICA DE TOMAS Y CLAVIJAS INDUSTRIALES

Tomas de Sobreponer IP44 de 16 A y 32A					
Amp.	Polos	Referencia	Referencia	Referencia	Referencia
		110V 4h	220V 3p=6h 4p+5p=9h	440V 3p=9h / 4p+5p=6h	500V 4p=7h 5p=7h
16	2P+T	TSP16/113-4	TSP16/113-6		
16	3P+T	TSP16/114-4	TSP16/114-9	TSP16/114-6	TSP16/114-7
16	3P+N+T		TSP16/115-9	TSP16/115-6	
32	2P+T	TSP32/123-4			
32	3P+T	TSP32/124-4	TSP32/124-9	TSP32/124-6	TSP32/124-7
32	3P+N+T		TSP32/125-9	TSP32/125-6	

Polos	16 Amp			32 Amp		
	2P+T	3P+T	3P+N+T	2P+T	3P+T	3P+N+T
a (mm)	142	145	144	155	155	157
b (mm)	97	98	104	106	106	111
M (mm)	25	25	25	25	25	25
Peso (gr)	226	240	259	271	291	318

Unidad Básica W x H x D=170 x 118 x 172; 1 x M40; 2 x M32



Tomas hembra localizados en el tablero de control y en los soportes de los grupos M G

Figura 16.8. Clavijas industriales de alto desempeño usadas en las conexiones principales del banco de trabajo. Las marcas con amarillo cooresponden a las referencias utilizadas en este trabajo.

HOJA TECNICA DE TOMAS Y CLAVIJAS INDUSTRIALES

Tomas de Incrustar IP44 de 16 A y 32 A

Amp.	Polos	Referencia	Referencia	Referencia	Referencia
		110V 4h	220V 3p=6h 4p=5p=9h	440V 3p=9h / 4p=5p=6h	500V 4p=7h 5p=7h
16	2P+T	TIN16/413-4	TIN16/413-6		
16	3P+T	TIN16/414-4	TIN16/414-9	TIN16/414-6	TIN16/414-7
16	3P+N+T		TIN16/415-9	TIN16/415-6	
32	2P+T	TIN32/423-4			
32	3P+T	TIN32/424-4	TIN32/424-9	TIN32/424-6	TIN32/424-7
32	3P+N+T		TIN32/425-9	TIN32/425-6	

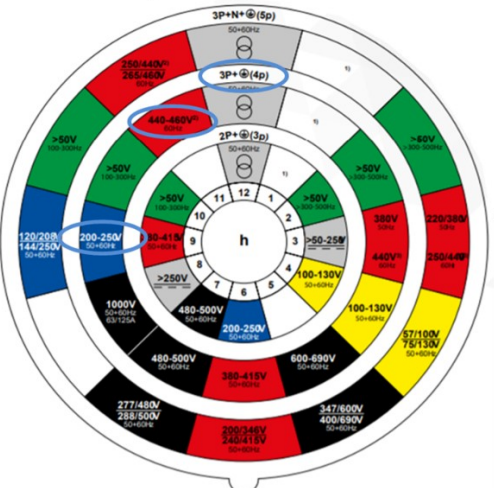



TIN32/424-9



Tomas y clavija de la acometida principal del lado del tablero de control.

Figura 16.9. Clavija y toma de tipo industrial de alto desempeño usados en la acometida principal del equipo. Ubicada a un costado del tablero principal.





Clavijas Industriales IP44 de 16 A y 32 A

Amp.	Polos	Referencia	Referencia	Referencia	Referencia
		110V 4h	220V 3p=6h 4p=5p=9h	440V 3p=9h / 4p=5p=6h	500V 4p=7h 5p=7h
16	2P+T	CLA16/013-4	CLA16/013-6		
16	3P+T	CLA16/014-4	CLA16/014-9	CLA16/014-6	CLA16/014-7
16	3P+N+T		CLA16/015-9	CLA16/015-6	
32	2P+T	CLA32/023-4			
32	3P+T	CLA32/024-4	CLA32/024-9	CLA32/024-6	CLA32/024-7
32	3P+N+T		CLA32/025-9	CLA32/025-6	

Tomas industriales marca VCP usados en las conexiones de motor (M) (azul) y de generador (rojo).

Figura 16.10. Selección de tomas industriales para las clavijas utilizadas en este trabajo.

Color azul : Para el motor y la acometida principal
 Color rojo : Para el generador.

HOJA TECNICA DE TOMAS Y CLAVIJAS INDUSTRIALES
TOMACORRIENTES Y CLAVIJAS CON SEGURO DE GIRO

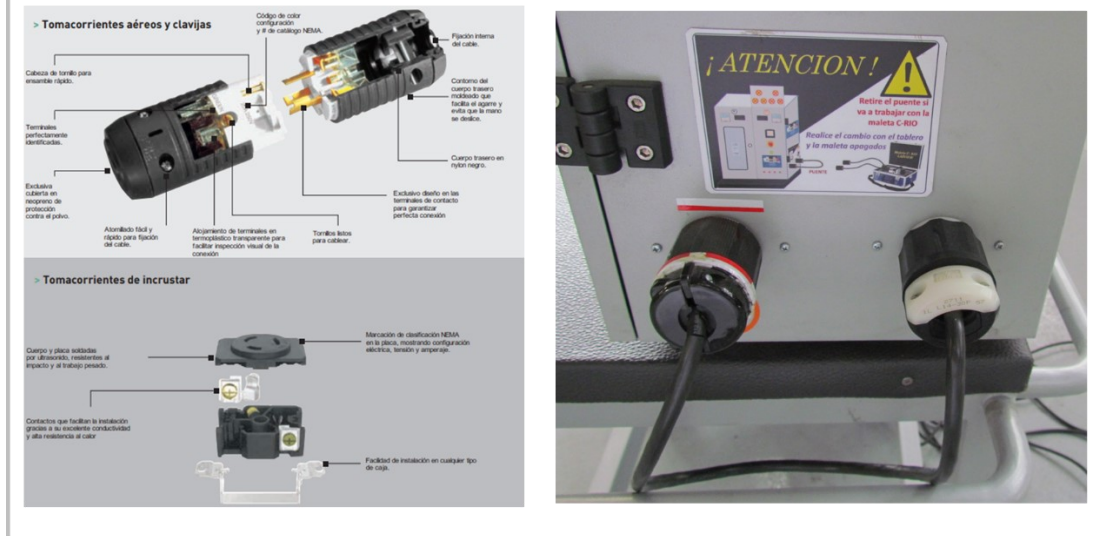


Figura 16.11. Clavija y toma de tipo industrial de con seguro de giro usados en la acometida principal en la toma al laboratorio y en el puente exterior para la maleta LabVIEW.
Abajo se muestran detalles de la selección de estos tomas.

Tomacorrientes y clavijas con seguro de giro Turnlok® configuración Nema SEE MORE

2 polos, 3 hilos con tierra			15 Amperios		20 Amperios		30 Amperios	
			Tomacorrientes	Clavija	Tomacorrientes	Clavija	Tomacorrientes	Clavija
125 Voltios	L5							
			5 - 15R	5 - 15P	5 - 20R	5 - 20P	5 - 30R	5 - 30P
250 Voltios	L6	2P + T						
			6 - 15R	6 - 15P	6 - 20R	6 - 20P	6 - 30R	6 - 30P
277 Voltios	L7							
			7 - 15R	7 - 15P	7 - 20R	7 - 20P	7 - 30R	7 - 30P
3 polos, 3 hilos sin tierra			15 Amperios		20 Amperios		30 Amperios	
			Tomacorrientes	Clavija	Tomacorrientes	Clavija	Tomacorrientes	Clavija
3Ø250 Voltios	L11	3P						
					11 - 20R	11 - 20P	11 - 30R	11 - 30P
3 polos, 4 hilos con tierra			15 Amperios		20 Amperios		30 Amperios	
			Tomacorrientes	Clavija	Tomacorrientes	Clavija	Tomacorrientes	Clavija
125/250 Voltios	L14	3P + T						
	L16							
					14 - 20R	14 - 20P	14 - 30R	14 - 30P
					16 - 20R	16 - 20P	16 - 20R	16 - 30P
4 polos, 4 hilos sin tierra			15 Amperios		20 Amperios		30 Amperios	
			Tomacorrientes	Clavija	Tomacorrientes	Clavija	Tomacorrientes	Clavija

Este tipo de tomas de energía trifásicos de media vuelta son los utilizados en el laboratorio de la universidad, para sus conexiones de potencia y se usaron en el proyecto para conectar el tablero al laboratorio y para las conexiones de la maleta LabVIEW. Ver figura 16.11

HOJA TECNICA DE CONTACTORES DE POTENCIA

NOARK®
Catálogo
Contactores y relés
Arrancadores de motor manuales
Series Ex9C, Ex9R, Ex9CD, Ex9RD, Ex9CK, Ex9CKT, Ex9S32 y Ex9SN

CONTACTORES NOARK REF. EX9CS9AMP MINIATURA
INSTALACION EN GABINETE DE CONTROL

Ver este catálogo en los archivos anexos del trabajo. Datasheets.

Figura 16.12. Contactores eléctricos trifásicos utilizados en la maniobra del tablero de control.

Contadores IEC
Ex9CS 9 A Miniatura

- Contactos auxiliares incorporados; contactos auxiliares adicionales montados en el frente
- No reversibles
- Especificaciones: páginas A27-31



Certificaciones
IEC/EN 60947-1, 60947-4-1
UL 60947-1, 60947-4-1

A

Tensión de bobina	9 A • 3 polos				9 A • 4 polos				
	3 NA • Contactos auxiliares: 1 NA3		3 NA • Contactos auxiliares: 1 NC		4 NA		2 NA + 2 NC		
	Producto	Número de pieza	Producto	Número de pieza	Producto	Número de pieza	Producto	Número de pieza	
V CA • 50/60 Hz	24	Ex9CS0910B7	1320019	Ex9CS0901B7	1320073	Ex9CS09B7C	1320127	Ex9CS09B7B	1320433
	36	Ex9CS0910C7	1320020	Ex9CS0901C7	1320074	Ex9CS09C7C	1320128	Ex9CS09C7B	1320434
	42	Ex9CS0910D7	1320021	Ex9CS0901D7	1320075	Ex9CS09D7C	1320129	Ex9CS09D7B	1320435
	48	Ex9CS0910E7	1320022	Ex9CS0901E7	1320076	Ex9CS09E7C	1320130	Ex9CS09E7B	1320436
	110	Ex9CS0910F7	1320023	Ex9CS0901F7	1320077	Ex9CS09F7C	1320131	Ex9CS09F7B	1320437
	120	Ex9CS0910G7	1320024	Ex9CS0901G7	1320078	Ex9CS09G7C	1320132	Ex9CS09G7B	1320438
	208	Ex9CS0910X7	1320036	Ex9CS0901X7	1320090	Ex9CS09X7C	1320144	Ex9CS09X7B	1320450
	220	Ex9CS0910M7	1320025	Ex9CS0901M7	1320079	Ex9CS09M7C	1320133	Ex9CS09M7B	1320439
	230	Ex9CS0910P7	1320026	Ex9CS0901P7	1320080	Ex9CS09P7C	1320134	Ex9CS09P7B	1320440
	240	Ex9CS0910U7	1320028	Ex9CS0901U7	1320082	Ex9CS09U7C	1320136	Ex9CS09U7B	1320442
	277	Ex9CS0910N7	1320027	Ex9CS0901N7	1320081	Ex9CS09N7C	1320135	Ex9CS09N7B	1320441
	380	Ex9CS0910Q7	1320029	Ex9CS0901Q7	1320083	Ex9CS09Q7C	1320137	Ex9CS09Q7B	1320443
	400	Ex9CS0910V7	1320030	Ex9CS0901V7	1320084	Ex9CS09V7C	1320138	Ex9CS09V7B	1320444
	415	Ex9CS0910Z7	1320031	Ex9CS0901Z7	1320085	Ex9CS09Z7C	1320139	Ex9CS09Z7B	1320445
	440	Ex9CS0910R7	1320032	Ex9CS0901R7	1320086	Ex9CS09R7C	1320140	Ex9CS09R7B	1320446
	480	Ex9CS0910T7	1320033	Ex9CS0901T7	1320087	Ex9CS09T7C	1320141	Ex9CS09T7B	1320447
	500	Ex9CS0910S7	1320034	Ex9CS0901S7	1320088	Ex9CS09S7C	1320142	Ex9CS09S7B	1320448
V CC	12	Ex9CS09D10A	1320330	Ex9CS09D01A	1320345	Ex9CS09DAC	1320360	Ex9CS09DAB	1320528
	24	Ex9CS09D10B	1320331	Ex9CS09D01B	1320346	Ex9CS09DBC	1320361	Ex9CS09DBB	1320529
	48	Ex9CS09D10E	1320332	Ex9CS09D01E	1320347	Ex9CS09DEC	1320362	Ex9CS09DEB	1320530
	110	Ex9CS09D10F	1320333	Ex9CS09D01F	1320348	Ex9CS09DFC	1320363	Ex9CS09DFB	1320531
	220	Ex9CS09D10M	1320334	Ex9CS09D01M	1320349	Ex9CS09DMC	1320364	Ex9CS09DMB	1320532
	250	Ex9CS09D10W	1320554	Ex9CS09D01W	1320557	Ex9CS09DWC	1320560	Ex9CS09DWB	1320572

Ver esta información en el catálogo mencionado arriba.

Los contactores Ex9C son aptos para diversas aplicaciones, incluidas las industriales de servicio pesado. La división en cuatro tamaños de bastidor permite la optimización de los parámetros eléctricos y las dimensiones mecánicas. Todos estos tamaños de bastidor comparten contactos auxiliares como accesorios. Los relés de sobrecarga tienen diferentes tamaños de bastidor, a fin de adaptarse al respectivo contactor de corriente nominal dada.

HOJA TECNICA DE PROTECCIONES DE CORTOCIRCUITO



Figura 16.12. Interruptores eléctricos trifásicos utilizados en las protecciones de cortocircuito del tablero de control.

CARACTERISTICAS

- La gama completa de disyuntores en miniatura listados UL 489 y UL 489A hasta una corriente nominal de 63 A.
- Los interruptores se montan en riel DIN estándar de 35 mm
- Clasificaciones estándar de 35 mm 10 kA a 480Y/277 Vac y 10 kA a 125 Vcc
- Adecuado para la protección del dispositivo de circuito ramal.
- Disparo de derivación instalable en campo y montaje posterior del interruptor auxiliar
- Ancho del módulo de sólo 0,71 en (18 mm) por polo
- Indicador de posición de contacto (rojo/verde)
- Posibilidad de bloquear la palanca en posición ON o OFF.

APLICACIONES TÍPICAS

- ✓ Protección de circuitos ramales
- ✓ Circuitos de receptáculo de conveniencia (internos/externos)
- ✓ Circuitos de control del motor
- ✓ Circuitos de carga que salen del equipo (externo)
- ✓ Equipo HVACR: calefacción, ventilación, aire acondicionado, refrigeración (interna/externa)
- ✓ Puntos de E/S de P PLC
- ✓ Fuentes de alimentación
- ✓ Instrumentación de control
- ✓ Relés
- ✓ UPS
- ✓ Acondicionadores de potencia

HOJA TECNICA DE CONECTORES MULTIPOLARES INDUSTRIALES

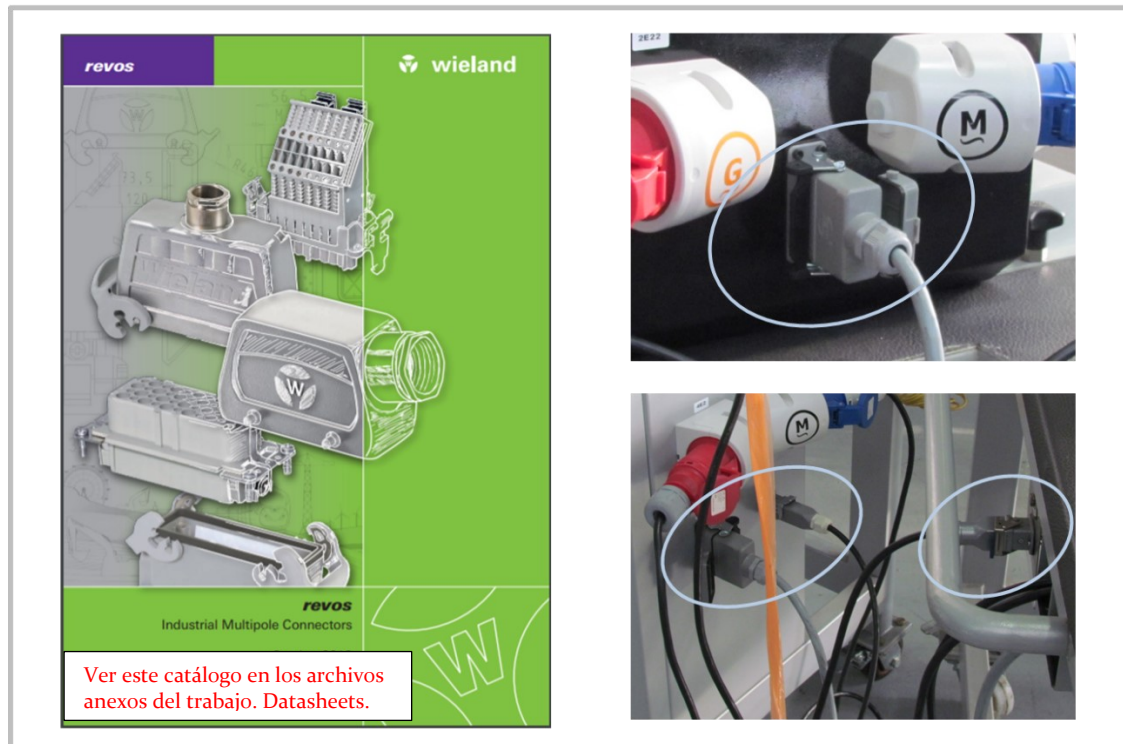


Figura 16.13. Conectores multipolares. Usados en la toma de señales de la mesa de trabajo del equipo. Tomas de alto desempeño y protección IP65

Overview of the industrial multipole connector range *revos*

Contact inserts:

revos MINI



The contact inserts for the *revos* MINI connector series are very compact and available with 3 to 12 poles.

You will find the contact inserts for the *revos* MINI connectors on pages 28-31.

revos BASIC



The proven connectors and multipole adapters are available in 6 to 92 pole design with screw, spring clamp and crimp connection technology.

You will find *revos* BASIC contact inserts on pages 32-57; You can find terminal block adapters and inserts with integral cable strain relief on pages 78-91.

revos DD



High contact density in the most compact space – this is what the space-saving contact inserts of *revos* DD offer. The inserts fit into the BASIC housing sizes 6/6H, 10/10H, 16/16H, 24/24H. Connection is made with the proven turned crimp contacts, with a diameter of Ø 1.6 mm, which offer a connection range from 0.14 to 2.5 mm² at a rated voltage of 250 V (600 V CSA/UL).

You will find *revos* DD contact inserts on pages 58-59.

revos HD



Contact inserts and multipole adapters with 15 to 64 poles and for currents up to 10 A designed according to DIN EN 175301-801 (previously DIN 46352). The contact inserts are designed in crimp connection technology.

You will find *revos* HD contact inserts on pages 60-67 and terminal block adapters on pages 92-95.

revos POWER



The contact inserts and multipole adapters are designed for >16 A currents; they are also available with mixed contacts and screw connection.

You will find *revos* POWER contact inserts and terminal block adapters on pages 68-77.

revos FLEX



The modular system for the economical and clever mixture of contact inserts. With this flexible system you can customize your connector, to meet the requirements of your application.

You will find *revos* FLEX CC

Ver este catálogo en los archivos anexos del trabajo. Datasheets.

La línea de conectores *revos*

Constituyen una visión general de los conectores de servicio pesado.

Los conectores de servicio pesado están diseñados específicamente para su uso en condiciones de entorno especialmente difíciles. Las principales áreas de uso son la industria automotriz, en maquinaria y equipos de embalaje, así como para equipos de instrumentación, control y automatización.







Permiten una instalación sencilla y de ahorro de tiempo de maquinaria y equipos. Sus carcasas protegen contra impactos mecánicos y evitan la entrada de agua pulverizada y polvo.

Todas las partes del sistema pueden someterse a un control de calidad interno, lo que simplifica la instalación y la puesta en marcha en su ubicación de uso final.

Tomas de señales de instrumentación entre la mesa y el tablero de control







Señal de Temperatura de (M) en °C
 Señal de Temperatura de (G) en °C
 Señal de velocidad angular de (G) en RPM

Contact inserts






Contact inserts für revos HD-housings		
Size	HD 10/16 250 V / 16 A	HD 15/25 250 V / 10 A
10/ 15	 10 + ground	 15 + ground
16/ 25	 16 + ground	 25 + ground
32/ 50	 32 + ground	 50 + ground

Tomas de las paradas de emergencia de la mesa de trabajo. La señal va al tablero de control.

1 toma 3 + ground va a la mesa de trabajo y otro 4 + ground va instalado en el tablero de control.

Contact inserts for revos MINI-housings						
Size	250 - 400 V / 10 A	400 V / 10 A	400 V / 16 A	50 - 250 V / 10 A	50 V / 10 A	690 V / 10 A
3	 3 + ground	 4 + ground	 5 + ground	 7 + ground	 8	 12

Contact inserts for revos Ex-housings

Size	6Ex	10Ex	16Ex	24Ex	48Ex
90 V 16 A	 6 + PE	 10 + PE	 16 + PE	 24 + PE	 48 + PE

Ver este catálogo en los archivos anexos del trabajo. Página 22 del catálogo REVOS.

Diagramas a mano.

- Concepto general del proyecto
- Diseño inicial tablero de control.
- Diseño inicial tomas de alimentación
- Concepto del proyecto
- Diseño inicial estudio PAT.
- Diseño preliminar informe parcial de tesis
- Concepto general del proyecto
- Diseño inicial tomas LabVIEW

Ver las figuras desde la 16.14 hasta la 16.21.

DIAGRAMAS A MANO
DISEÑO INICIAL TOMAS DE ALIMENTACION

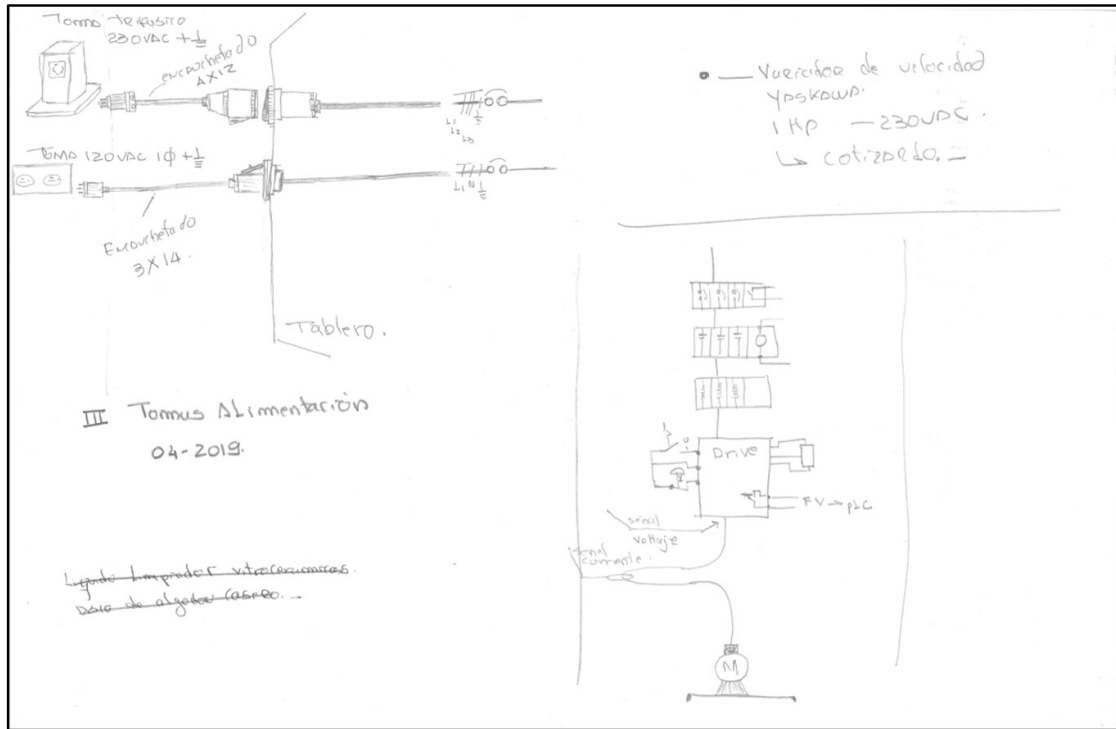


Figura 16.16. Tomas de alimentación.

DIAGRAMAS A MANO
CONCEPTO DEL PROYECTO

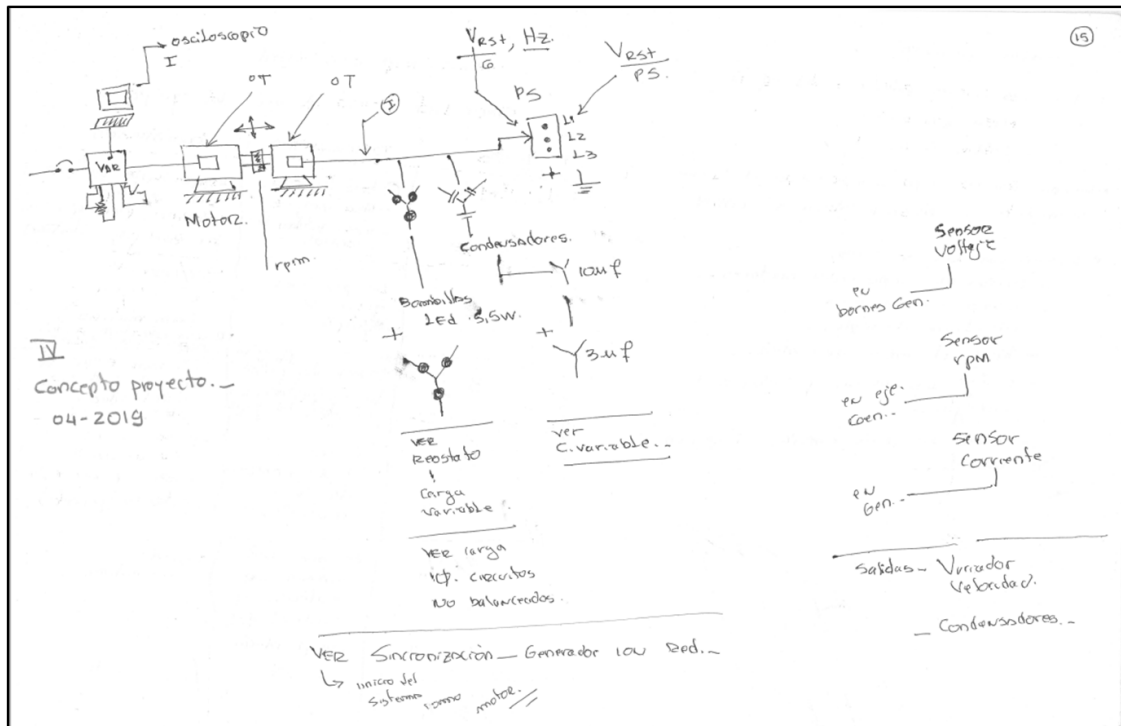


Figura 16.17. Concepto general del proyecto. Mediciones con el osciloscopio y colocación de algunos sensores.

DIAGRAMAS A MANO
DISEÑO INICIAL ESTUDIO PAT

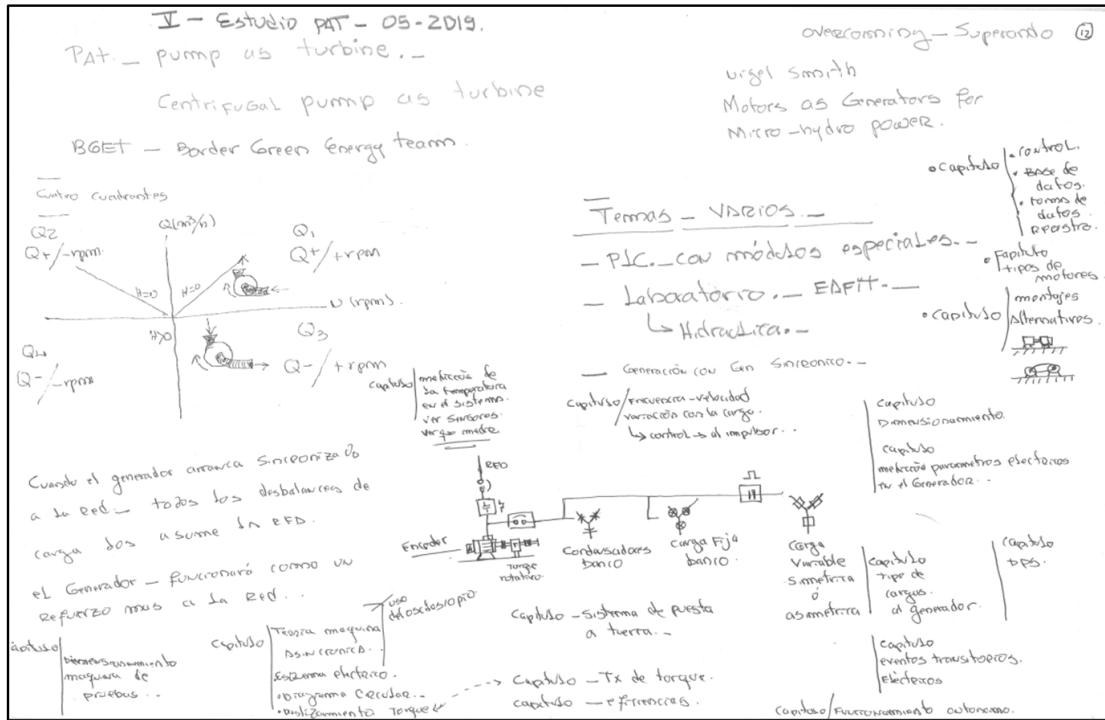


Figura 16.18. Estudio del concepto de PAT.

DIAGRAMAS A MANO
DISEÑO PRELIMINAR INFORME PARCIAL DE TESIS

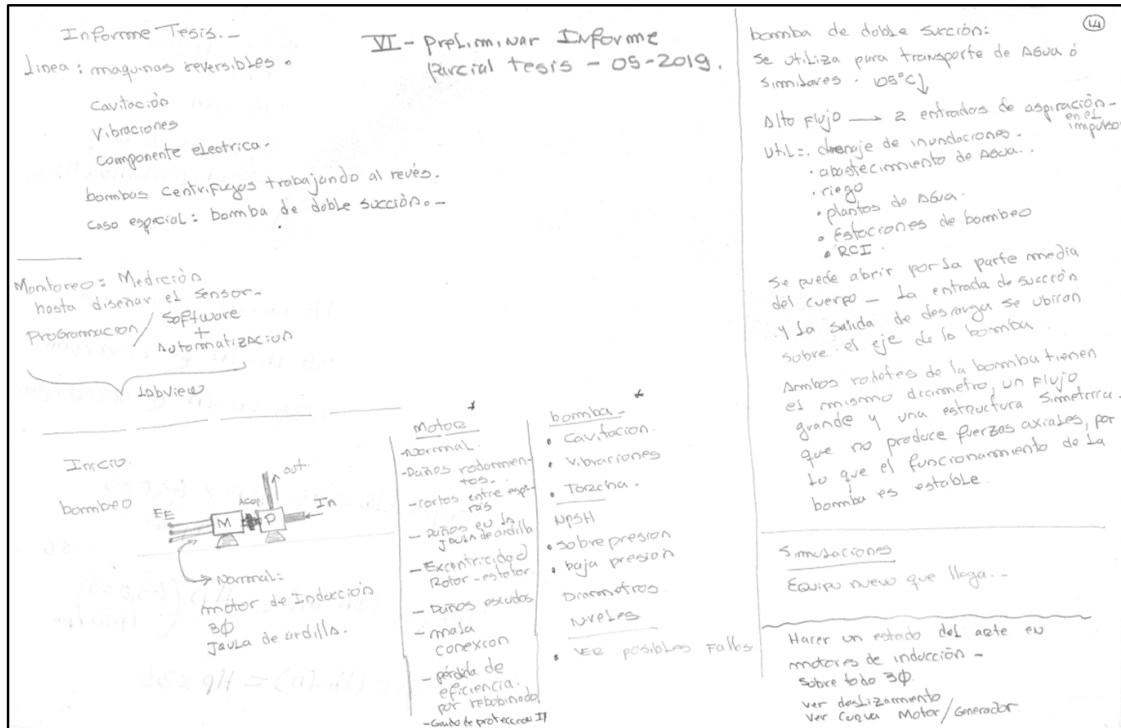


Figura 16.19. Diagramación preliminar de un informe parcial de este trabajo.

DIAGRAMAS A MANO
DISEÑO INICIAL ESTUDIO PAT

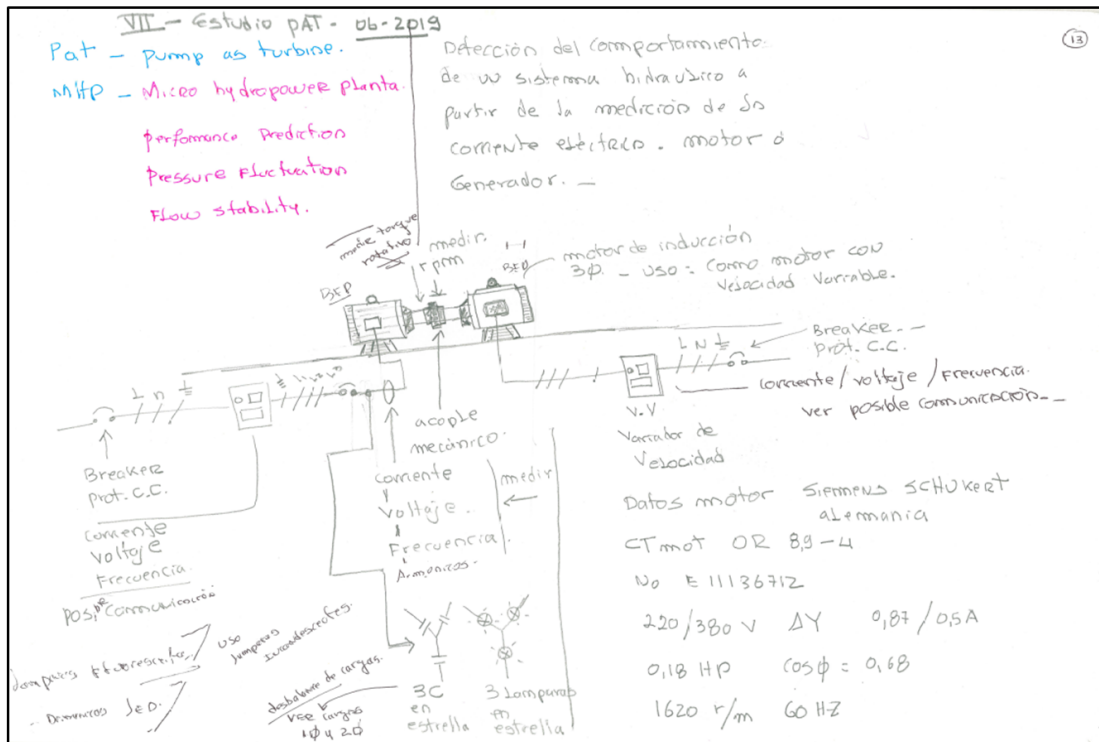


Figura 16.20. Continuación del estudio de las PAT.

DIAGRAMAS A MANO
DISEÑO INICIAL TOMAS LABVIEW

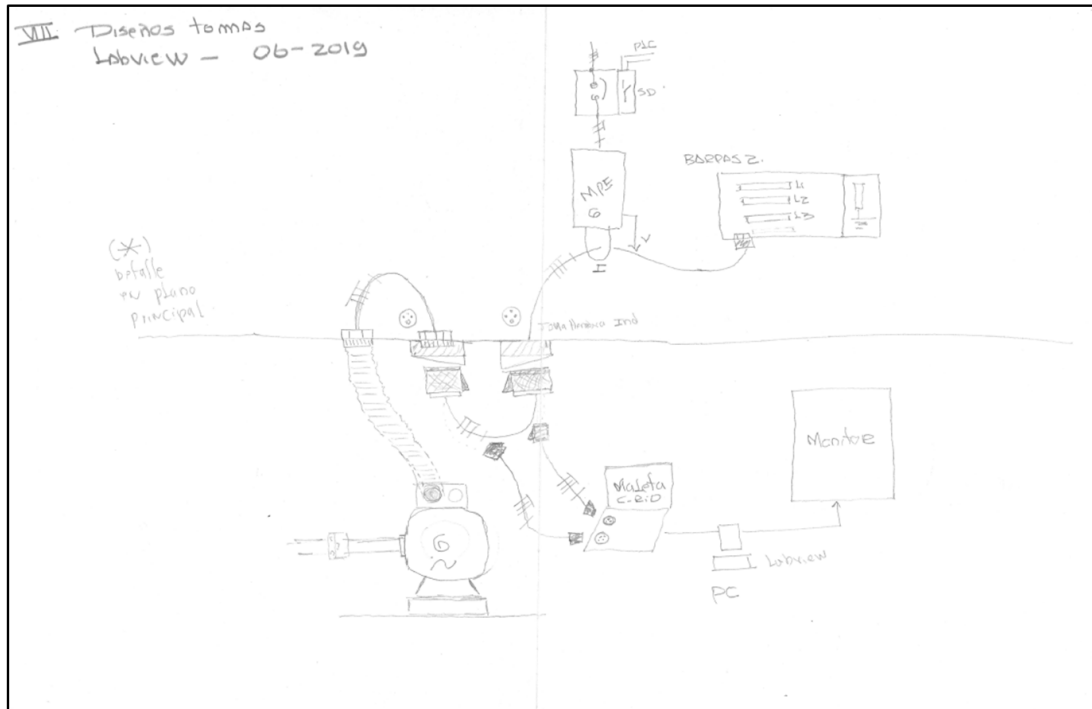


Figura 16.21. Estudio de la conectividad de la maleta LabVIEW.

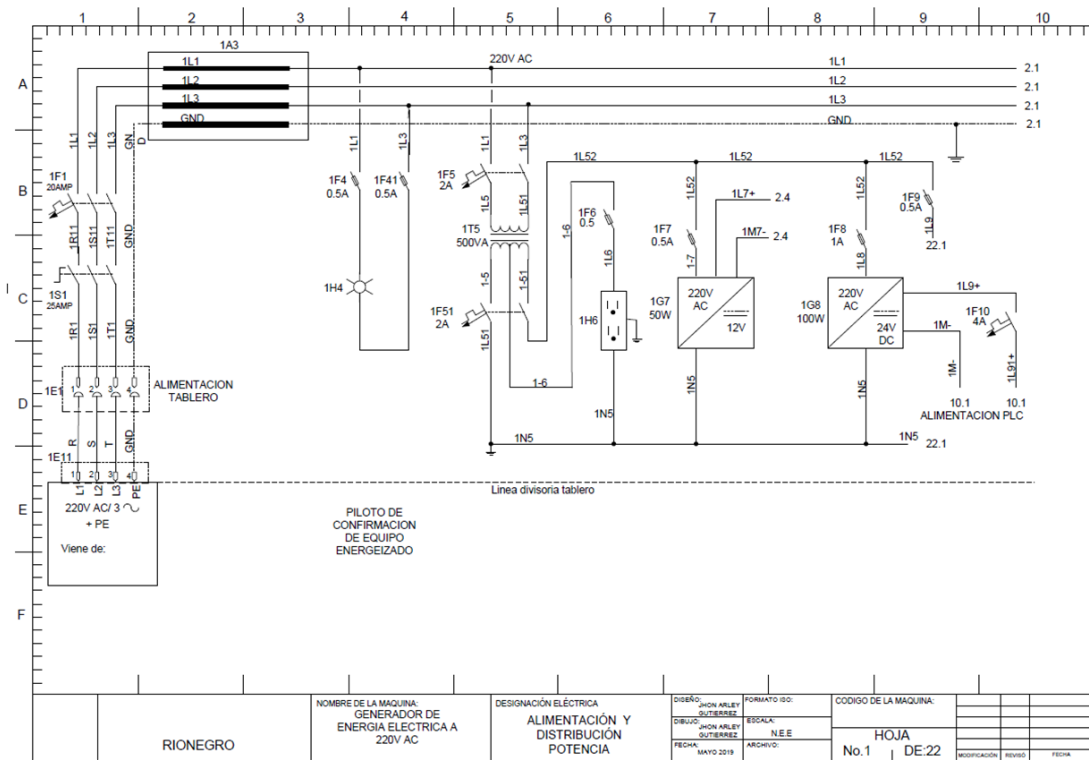
Planos. Ver las siguientes figuras hasta el final del capítulo. Todas están relacionadas con los planos eléctricos del banco de trabajo del grupo $\text{M} - \text{G}$. Estos planos se encuentran en un archivo adjunto en los anexos de este trabajo.

- Grupo motor generador de inducción.
- Información técnica.
- Alimentación y distribución de potencia.
- Hardware.
- Entradas digitales.
- Entradas análogas.
- Salidas digitales.
- Control vario.
- Alimentación y distribución de potencia.
- Toma macho Leviton de media vuelta.

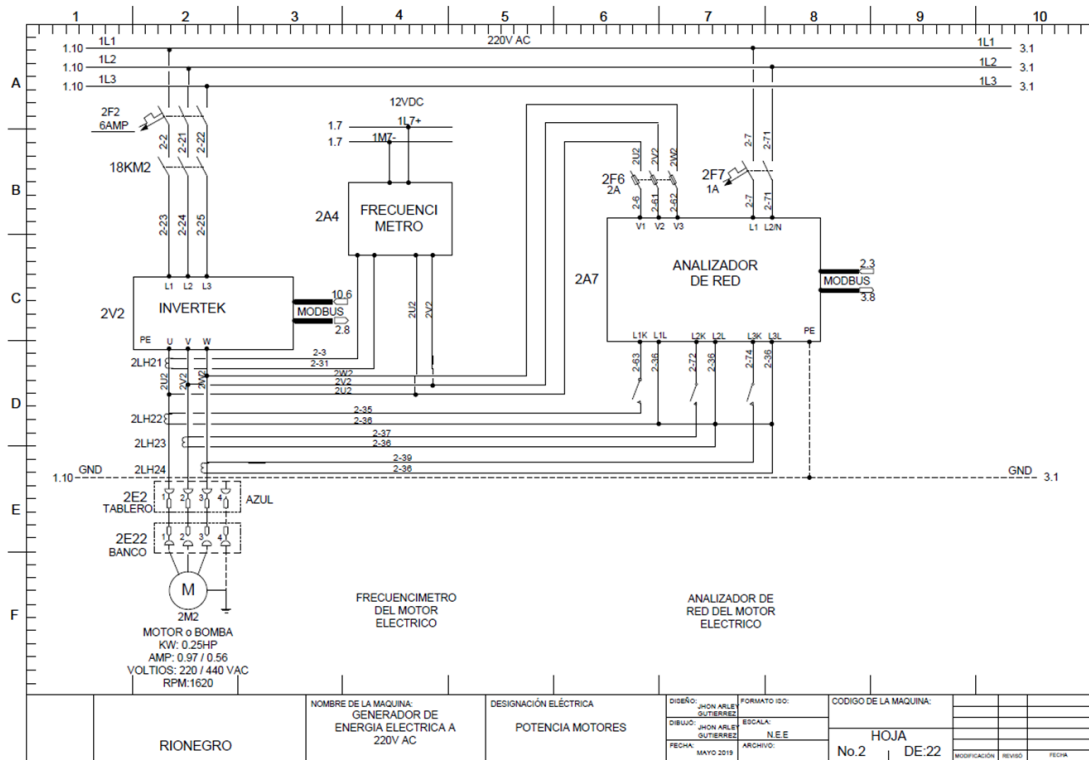
PLANOS INFORMACION TECNICA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
A	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> DATOS DE OPERACION VOLTAJE DE ALIMENTACION : 3x220 Vac + GND FRECUENCIA : 60 Hz CORRIENTE MAXIMA TABLERO : 40AMP VOLTAJES DE CONTROL : 220VAC </td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> DIMENSION DE LOS CABLES EN INTERIOR TABLERO POTENCIA : Según potencia del motor 24V DC : 22 AWG </td> </tr> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> COLOR DE LOS CABLES EN INTERIOR TABLERO SEGÚN CODIGO RETIE POTENCIA : Negro 110V AC : Negro 24V DC : ROJO 0 V dc : AZUL </td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> ESPECIFICACIONES DE BORNERAS X1 : BORNERAS DE CONTROL ENTRADAS DIGITALES </td> </tr> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> IDENTIFICACION DE LOS ELEMENTOS <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px; margin-right: 5px;">18 K 2</div> <div style="margin-left: 5px;"> → UBICACIÓN CAMPO DENTRO DE LA PAGINA → DEFINICIÓN DEL ELEMENTO → NÚMERO DE LA PAGINA DONDE SE ORIGINO ELEMENTO </div> </div> </td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> DIMENSION DE CADA TABLERO ALTO : 80 cm. ANCHO : 40 cm. PROFUNDIDAD : 20 cm. </td> </tr> </table>									DATOS DE OPERACION VOLTAJE DE ALIMENTACION : 3x220 Vac + GND FRECUENCIA : 60 Hz CORRIENTE MAXIMA TABLERO : 40AMP VOLTAJES DE CONTROL : 220VAC	DIMENSION DE LOS CABLES EN INTERIOR TABLERO POTENCIA : Según potencia del motor 24V DC : 22 AWG	COLOR DE LOS CABLES EN INTERIOR TABLERO SEGÚN CODIGO RETIE POTENCIA : Negro 110V AC : Negro 24V DC : ROJO 0 V dc : AZUL	ESPECIFICACIONES DE BORNERAS X1 : BORNERAS DE CONTROL ENTRADAS DIGITALES	IDENTIFICACION DE LOS ELEMENTOS <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px; margin-right: 5px;">18 K 2</div> <div style="margin-left: 5px;"> → UBICACIÓN CAMPO DENTRO DE LA PAGINA → DEFINICIÓN DEL ELEMENTO → NÚMERO DE LA PAGINA DONDE SE ORIGINO ELEMENTO </div> </div>	DIMENSION DE CADA TABLERO ALTO : 80 cm. ANCHO : 40 cm. PROFUNDIDAD : 20 cm.
DATOS DE OPERACION VOLTAJE DE ALIMENTACION : 3x220 Vac + GND FRECUENCIA : 60 Hz CORRIENTE MAXIMA TABLERO : 40AMP VOLTAJES DE CONTROL : 220VAC										DIMENSION DE LOS CABLES EN INTERIOR TABLERO POTENCIA : Según potencia del motor 24V DC : 22 AWG					
COLOR DE LOS CABLES EN INTERIOR TABLERO SEGÚN CODIGO RETIE POTENCIA : Negro 110V AC : Negro 24V DC : ROJO 0 V dc : AZUL										ESPECIFICACIONES DE BORNERAS X1 : BORNERAS DE CONTROL ENTRADAS DIGITALES					
IDENTIFICACION DE LOS ELEMENTOS <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px; margin-right: 5px;">18 K 2</div> <div style="margin-left: 5px;"> → UBICACIÓN CAMPO DENTRO DE LA PAGINA → DEFINICIÓN DEL ELEMENTO → NÚMERO DE LA PAGINA DONDE SE ORIGINO ELEMENTO </div> </div>										DIMENSION DE CADA TABLERO ALTO : 80 cm. ANCHO : 40 cm. PROFUNDIDAD : 20 cm.					
B															
C															
D															
E															
F															
RIONEGRO	NOMBRE DE LA MAQUINA: GENERADOR DE ENERGIA ELECTRICA A 220V AC	DESIGNACIÓN ELÉCTRICA INFORMACIÓN TÉCNICA	DISEÑO: HON ARLEY SUITERRES	FORMATO ISO: RESQUA: N.E.E ARCHIVO:	CODIGO DE LA MAQUINA: HOJA	MODIFICACION REVISO FECHA									

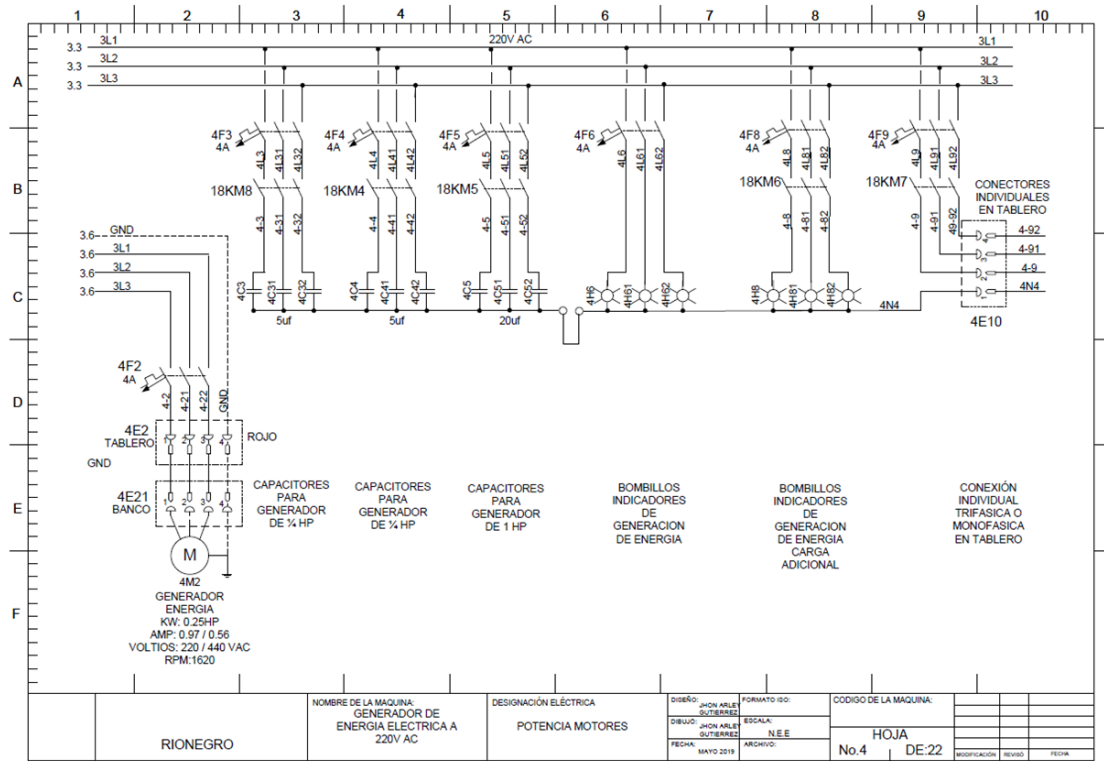
PLANOS ALIMENTACION Y DISTRIBUCION DE POTENCIA



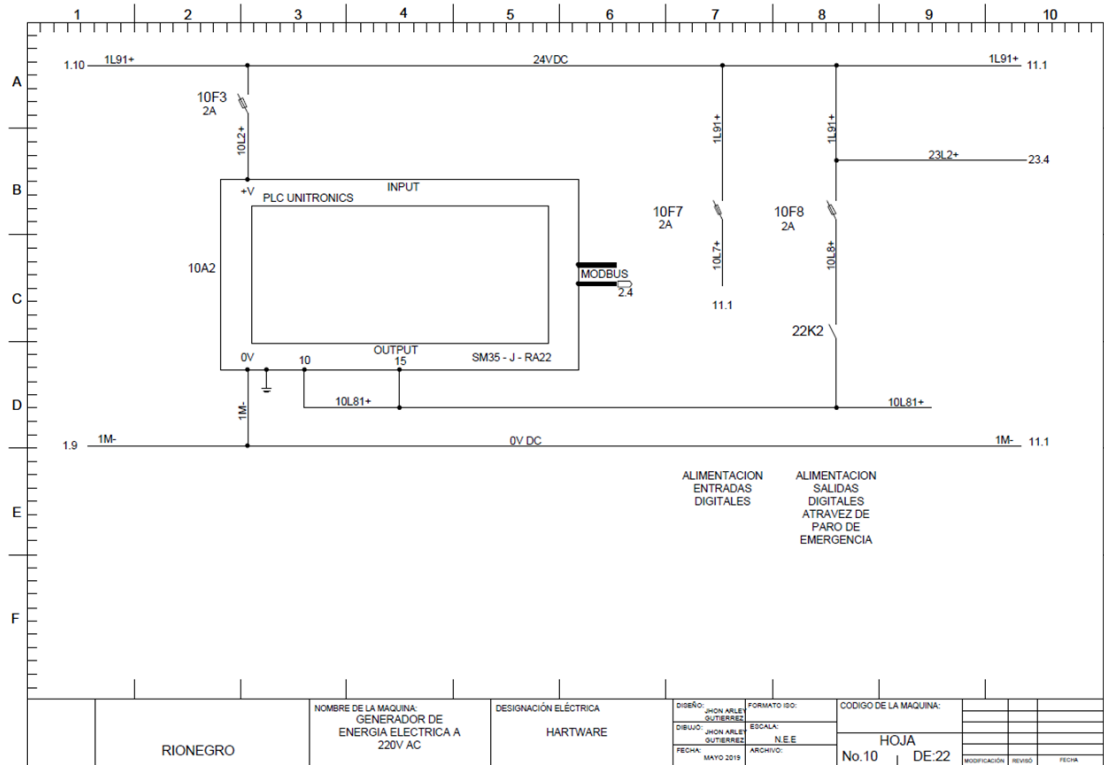
PLANOS POTENCIA DE MOTORES



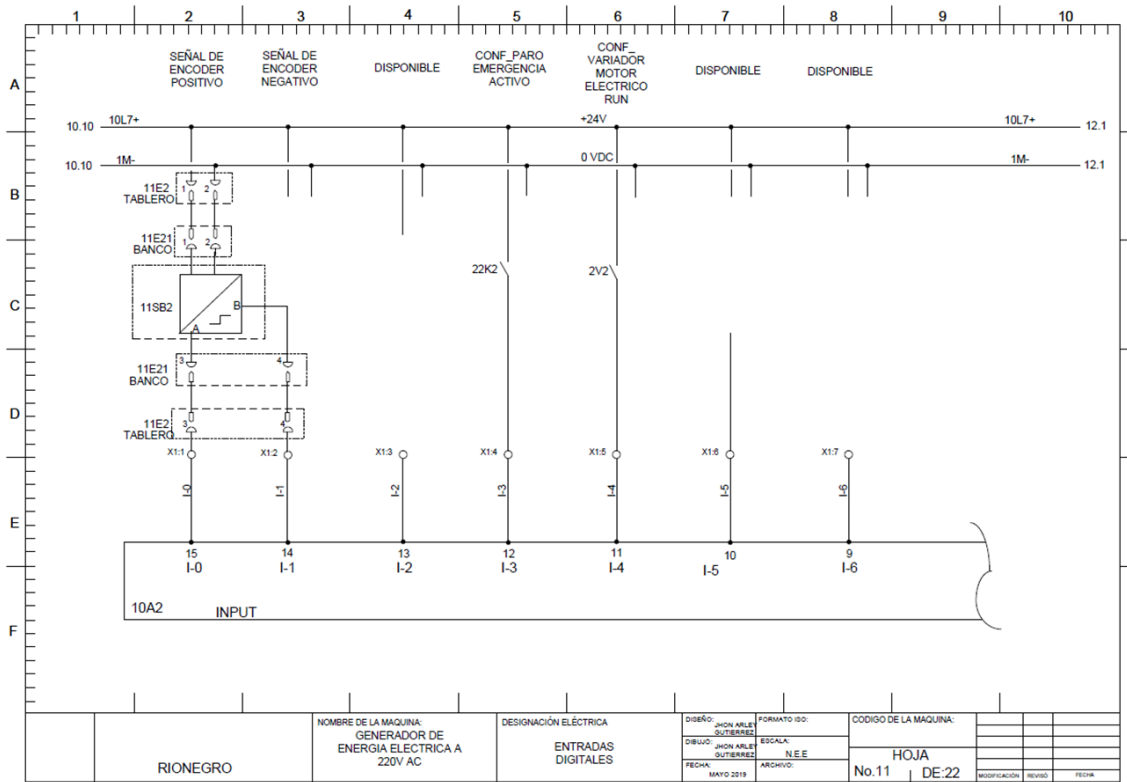
PLANOS POTENCIA DE MOTORES



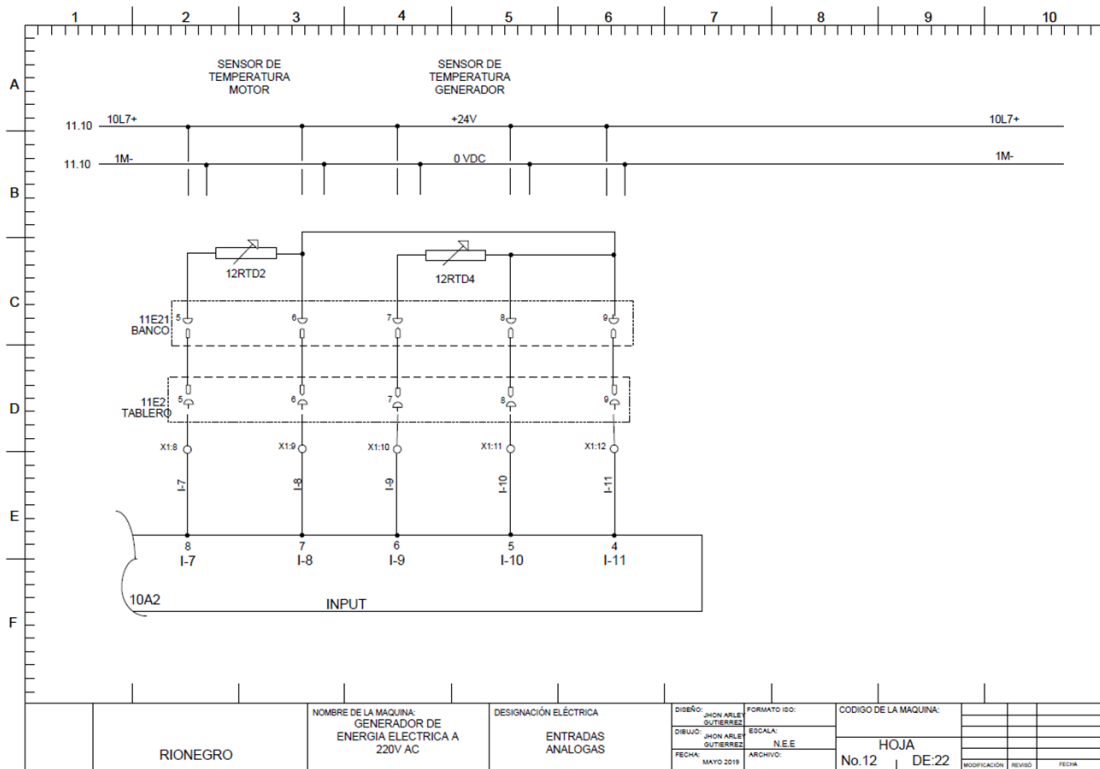
PLANOS HARDWARE



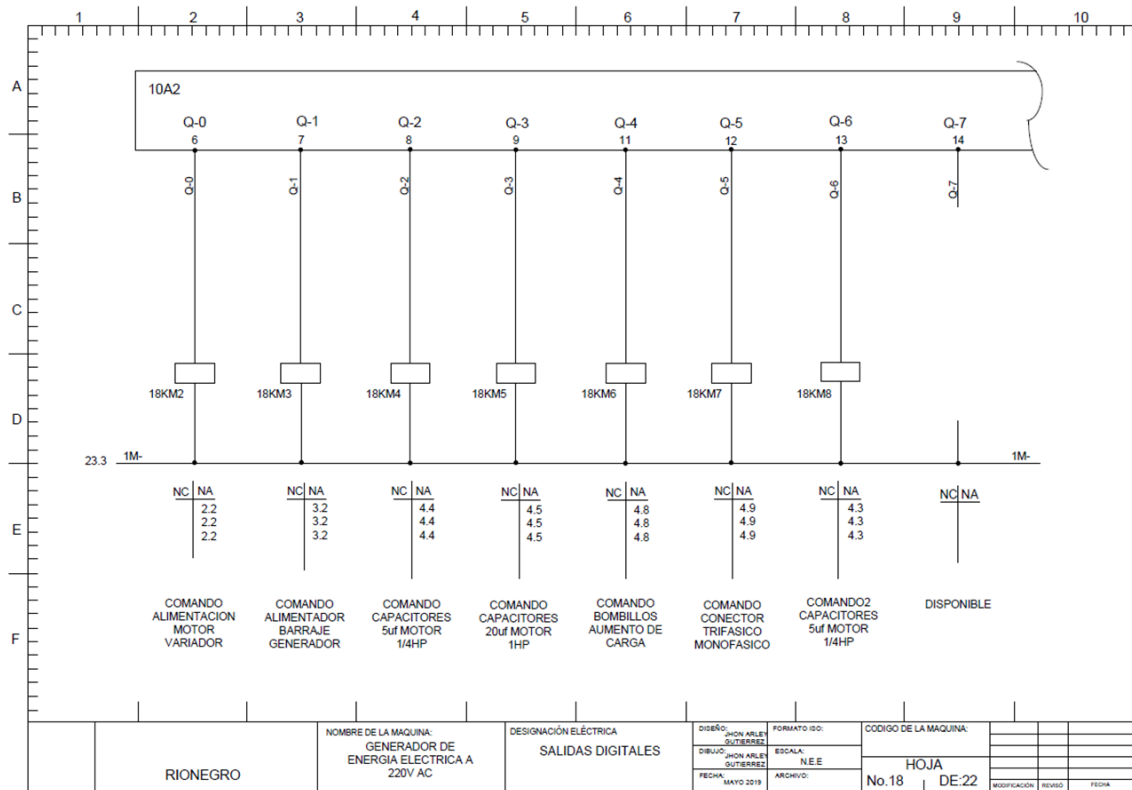
PLANOS ENTRADAS DIGITALES



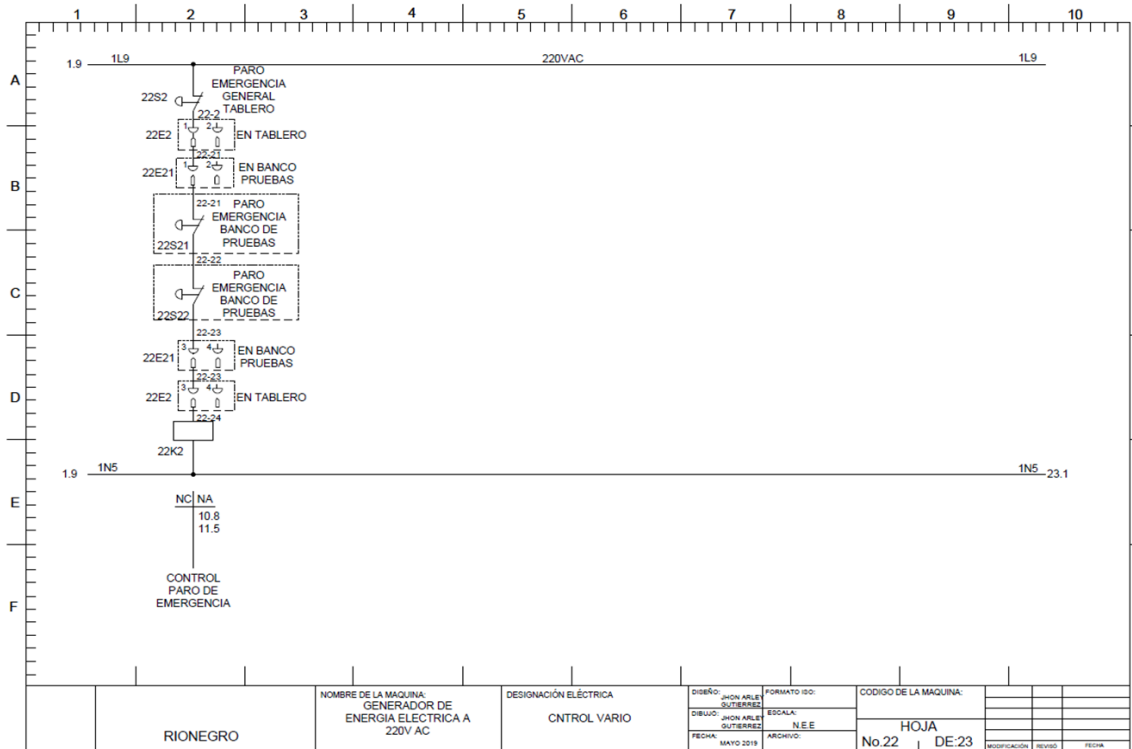
PLANOS ENTRADAS ANALOGAS



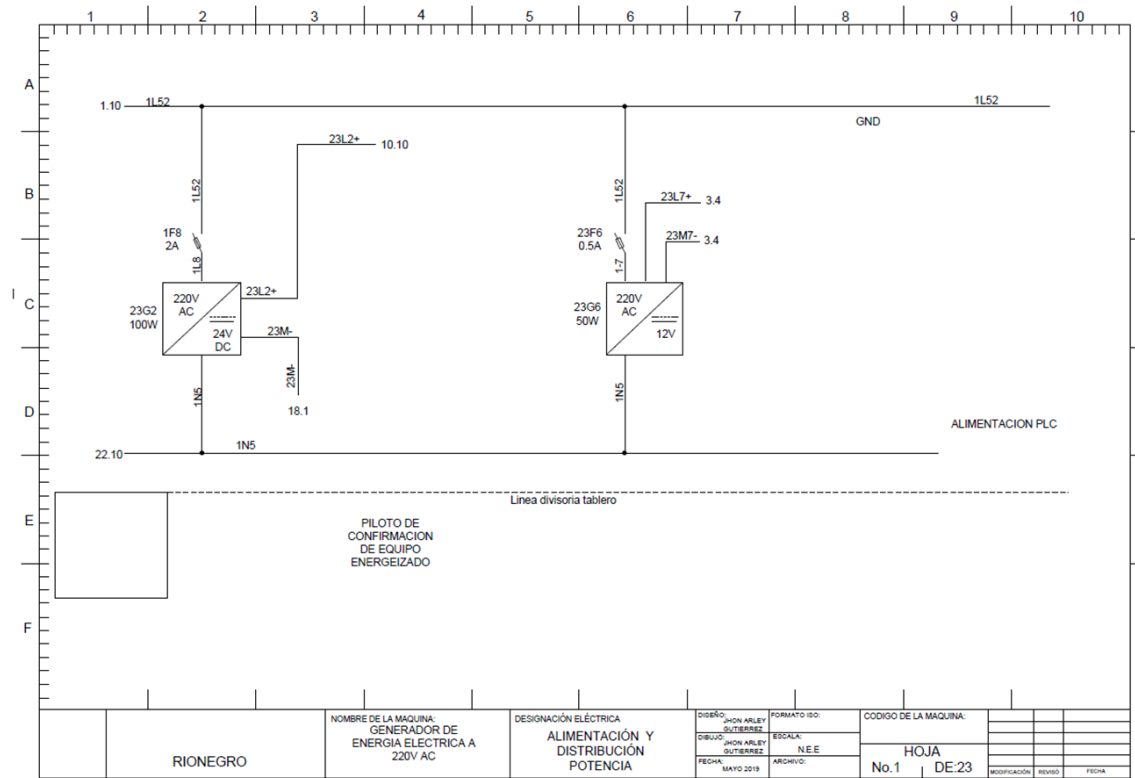
PLANOS SALIDAS DIGITALES



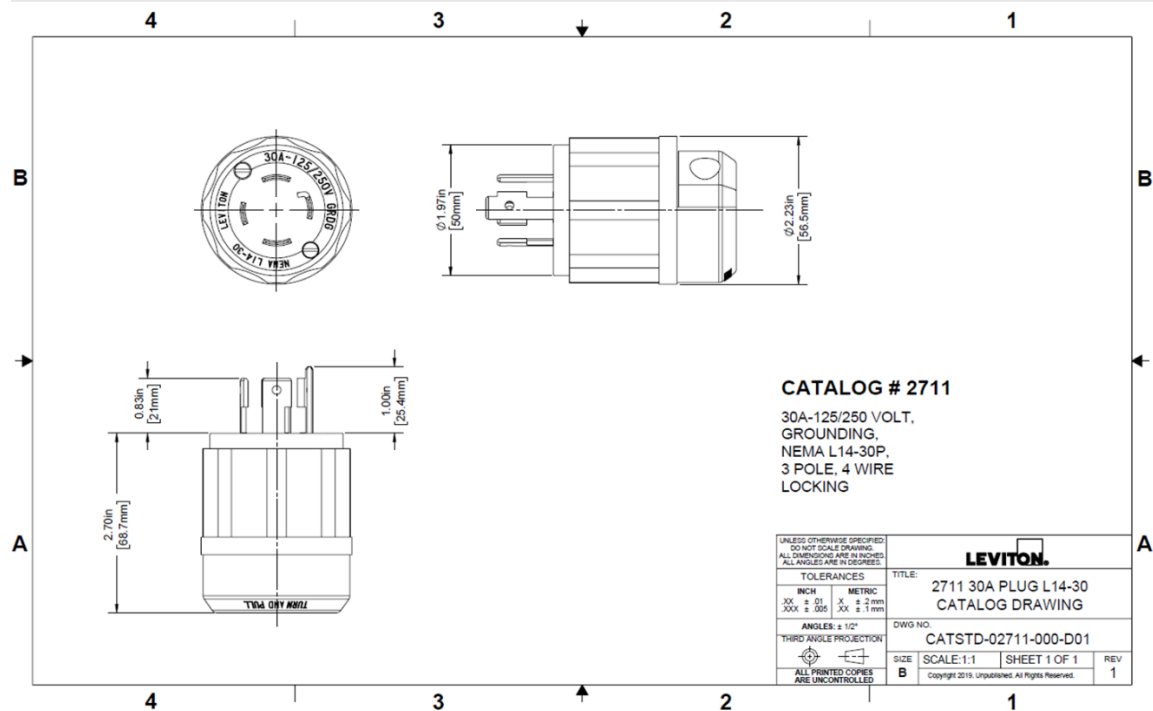
PLANOS CONTROLES VARIOS



PLANOS ALIMENTACION Y DISTRIBUCION DE POTENCIA



PLANOS TOMA MACHO LEVITON DE MEDIA VUELTA



Conclusión:

Este capítulo es una ruta para encontrar información técnica de muchos de los equipos de que se compone el banco de trabajo.

Es una *ruta* porque gran parte de la información técnica se encuentra en Internet.

La información propia del banco la componen los manuscritos realizados a mano y los planos eléctricos del equipo.

Este capítulo es un intento por tratar de reunir información técnica relacionada con el banco de trabajo ya sea anexandola como archivo PDF o referenciandola en alguna dirección técnica de Internet.

Capítulo 17

Posibles Adiciones al Sistema.

Objetivo específico:

Se busca acá mencionar nuevos aspectos del banco de trabajo para optimizar su desempeño tanto desde el punto de vista de su respuesta de voltaje y frecuencia, así como desde el punto de vista del manejo de la información que los elementos de medición entregan utilizando LabView.

También este capítulo menciona como el tema de una bomba como turbina, cuando se encuentra asistida por el banco de pruebas de esta tesis. Cabe anotar que el tema de la PAT también se mencionó en el capítulo 5 en donde se menciona el Primo Motor.

Y a modo de un nuevo Grupo $\text{M} - \text{G}$ se menciona un posible nuevo grupo con un *Generador Sincrono* de imanes permanentes impulsado por un motor asíncrono.

A continuación detallaremos 4 posibles adiciones al sistema.

- 1- Banco de capacitores en serie con la carga para estudiar como se mejora el voltaje de salida con la implementación de estas unidades.

Para mejorar la regulación de tensión, puede incluirse un banco de capacitores en serie con la carga como se muestra en las Figuras de este capítulo.

Esto produce una mejora en la regulación de tensión para cargas variables, pero no mejora la regulación para velocidad variable. Tampoco resuelve el problema de que la frecuencia generada sea variable.

Nota:

Este tema se documentó gracias a la Universidad del Valle, la cual participó en 2019 en el Latinoamerican Hydropower and Systems Meeting realizado en la Universidad EAFIT.



Figura 17.1: Tema extractado del artículo: *Conexión de un generador asíncrono auto excitado y auto regulado de la Universidad del Valle, la cual participó en 2019 en el Latinoamerican Hydropower and Systems Meeting realizado en la Universidad EAFIT.*

- a) Circuito equivalente, para régimen permanente, de la máquina de Inducción y los correspondientes capacitores paralelo - serie para su auto excitación y autorregulación.

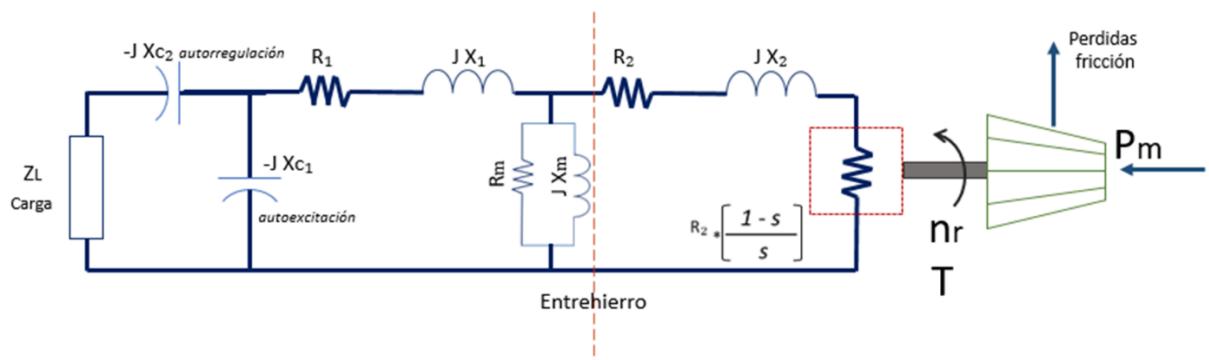


Figura 17.2: *Circuito equivalente de la máquina asíncrona como Generador. Con sus capacitancias de auto excitación y de auto regulación. Diagrama monofásico.*

- b) Registro un banco de capacitores serie proyectado para una posible instalación en este trabajo, posibilitado para operar con los dos grupos (M)-G que actualmente tiene este banco. *Continuación.*



Proceso de autorregulación

Figura 17.3: Registro un banco de capacitores serie proyectado para una posible instalación en este trabajo. Este equipo se encuentra posibilitado para operar con los dos grupos M - G que actualmente tiene este banco.

El siguiente es el calculo de las capacitancias requeridas para los dos grupos M - G que posee el banco de trabajo.
 Aparecen las capacitancias requeridas en shunt (paralelo) para autoexcitación y en serie para la regulación del voltaje de salida del generador. La parte de las capacitancias en serie es la que se plantea como una posible adición al banco de trabajo.

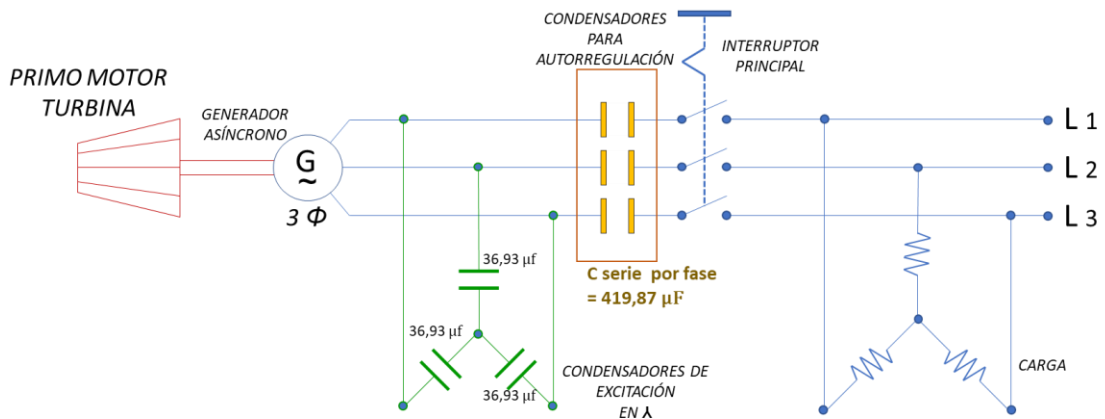
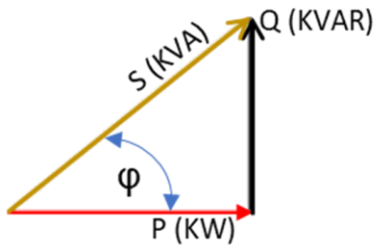


Figura 17.4.1 Banco de condensadores en λ para autoexcitación y banco en serie para autorregulación de voltaje --- Grupo M - G de 1,2 HP



Datos del equipo				
Potencia activa en el eje =	1,2	HP		
Potencia activa en el eje =	0,90	KW		
Voltaje de alimentación trifásica V_L =	260	VAC	Voltaje de fase V_f =	150,12 VAC
Corriente a plena carga I_L =	3,34	AMPS		
Velocidad =	1660	RPM		
Factor de potencia ($\cos(\phi)$) =	0,78			
Frecuencia de la red f =	60	HZ		

Potencia aparente (S) =	1,50	KVA
Potencia activa (P) =	1,17	KW
Potencia reactiva total (Q) =	0,94	KVAR
Factor de potencia ($\cos(\phi)$) =	0,78	
C =	36,93	Microfaradios μ

Cálculo realizado utilizando el Método mediante el uso de los Parámetros nominales del generador.

Capacitancia Serie para autorregulación	
Constante =	11,07
Potencia activa en el eje =	0,90 KW
Constante =	-0,243
C shunt =	36,93 Microfaradios
$P^{\wedge}(-0,243)$ =	1,03
C serie =	419,97 Microfaradios

Figura 17.4.2: Banco de condensadores en λ para autoexcitación y banco en serie para autorregulación de voltaje --- Grupo $\text{M}-\text{G}$ de 1,2 HP

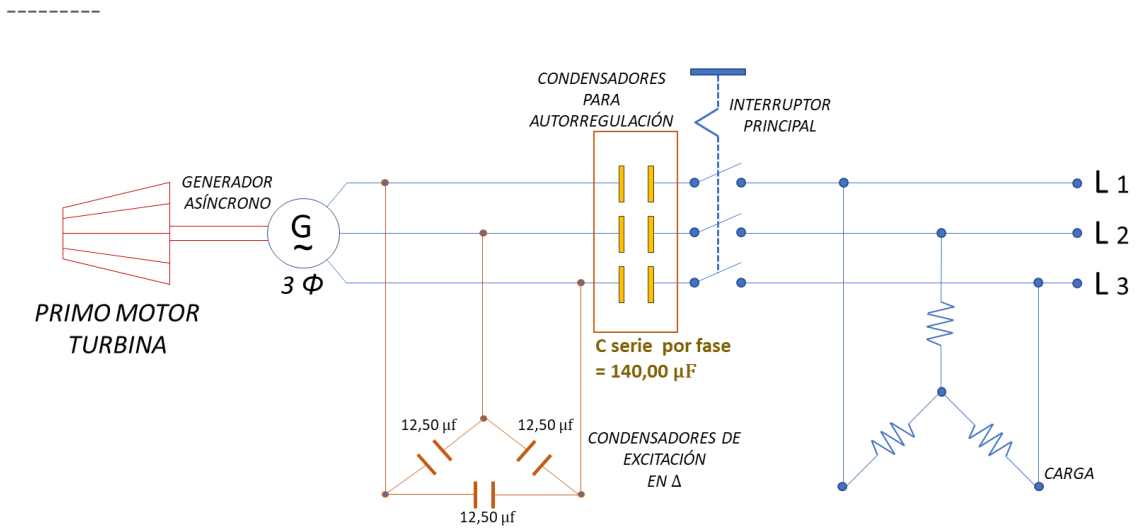
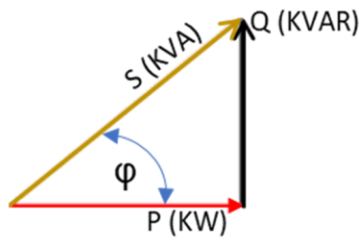


Figura 17.5.1 Banco de condensadores en Δ para autoexcitación y banco en serie para autorregulación de voltaje --- Grupo $\text{M}-\text{G}$ de 1,2 HP



Datos del equipo				
Potencia activa en el eje =	1,2	HP		
Potencia activa en el eje =	0,90	KW		
Voltaje de alimentación trifásica V_l =	260	VAC	Voltaje de fase V_f =	150,12 VAC
Corriente a plena carga I_L =	3,34	AMPS		
Velocidad =	1660	RPM		
Factor de potencia ($\cos(\phi)$) =	0,78			
Frecuencia de la red f =	60	HZ		

Potencia aparente (S) =	1,50	KVA
Potencia activa (P) =	1,17	KW
Potencia reactiva total (Q) =	0,94	KVAR
Factor de potencia ($\cos(\phi)$) =	0,78	
C =	12,50	Microfaradios Δ

Cálculo realizado utilizando el Método mediante el uso de los Parámetros nominales del generador.

Capacitancia Serie para autorregulación	
Constante =	11,07
Potencia activa en el eje =	0,90 KW
Constante =	-0,243
C shunt =	12,31 Microfaradios
$P^{\wedge}(-0,243)$ =	1,03
C serie =	140,00 Microfaradios

Figura 17.5.2 Banco de condensadores en Δ para autoexcitación y banco en serie para autorregulación de voltaje --- Grupo $M-G$ de 1,2 HP

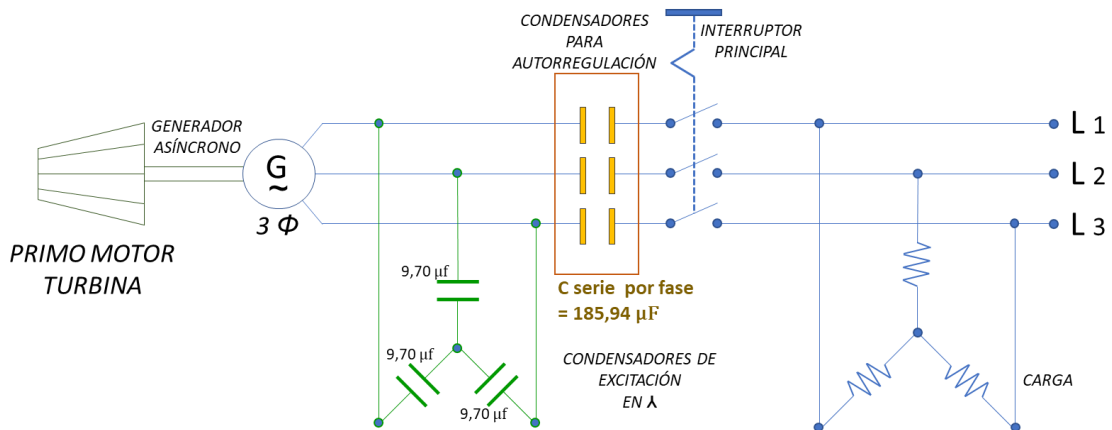
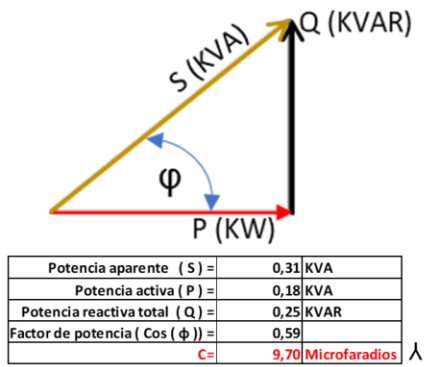


Figura 17.6.1 Banco de condensadores en Δ para autoexcitación y banco en serie para autorregulación de voltaje --- Grupo $M-G$ de 0,14 HP



Cálculo realizado utilizando el Método mediante el uso de los Parámetros nominales del generador.

Datos del equipo			
Potencia activa en el eje =	0,14	HP	
Potencia activa en el eje =	0,10	KW	
Voltaje de alimentación trifásica V _I =	260	VAC	Voltaje de fase V _f = 150,12 VAC
Corriente a plena carga I _L =	0,68	AMPS	
Velocidad =	1680	RPM	
Factor de potencia (Cos (φ)) =	0,59		
Frecuencia de la red f =	60	HZ	

Capacitancia Serie para autorregulación		
Constante =	11,07	
Potencia activa en el eje =	0,10	KW
Constante =	-0,243	
C shunt =	9,70	Microfaradios
P ^Λ (-0,243) =	1,73	
C serie =	185,94	Microfaradios

Figura 17.6.2 Banco de condensadores en λ para autoexcitación y banco en serie para autorregulación de voltaje --- Grupo M – G de 0,14 HP

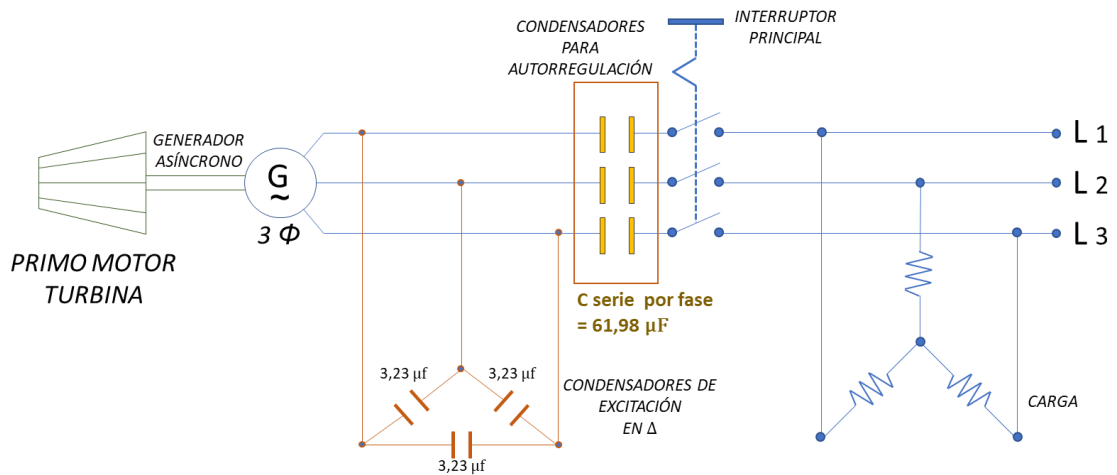


Figura 17.7.1 Banco de condensadores en Δ para autoexcitación y banco en serie para autorregulación de voltaje --- Grupo M – G de 0,14 HP

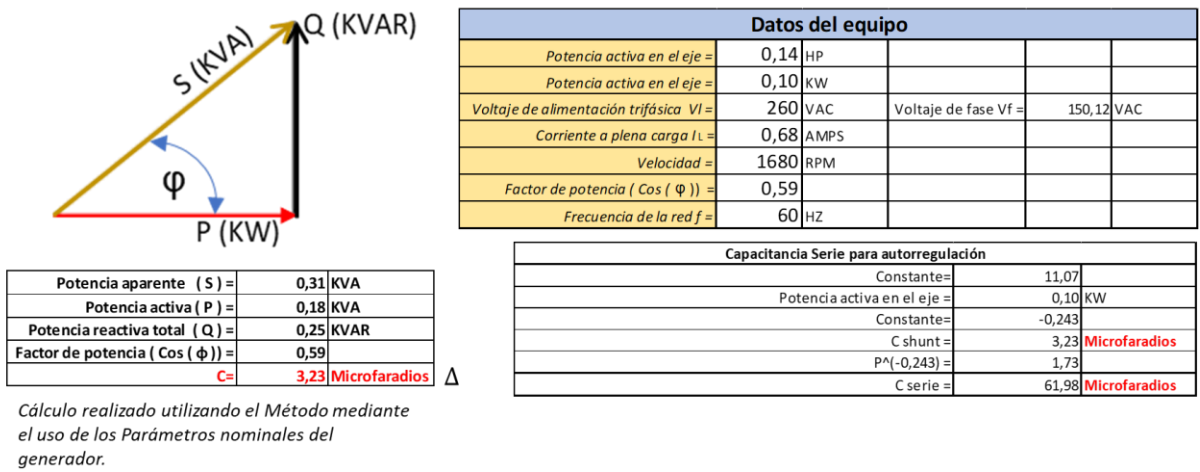


Figura 17.7.2 Banco de condensadores en Δ para autoexcitación y banco en serie para autorregulación de voltaje --- Grupo $\text{M} - \text{G}$ de 0,14 HP

2. Comunicación serial MPE - - - LABVIEW mediante una red RS485:

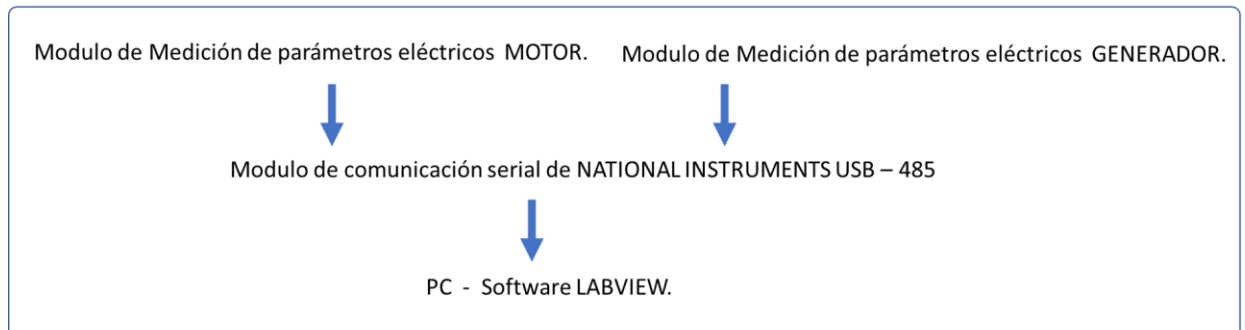


Figura 17.9. Esquema proyectado de comunicación RS-485 para conectar con LabVIEW.



Figura 17.8. *Modulo de comunicación serial de NATIONAL INSTRUMENTS USB – 485*

Comunicación serial medidores de parámetros eléctricos Motor y Generador --- Módulo NI USB -- 485

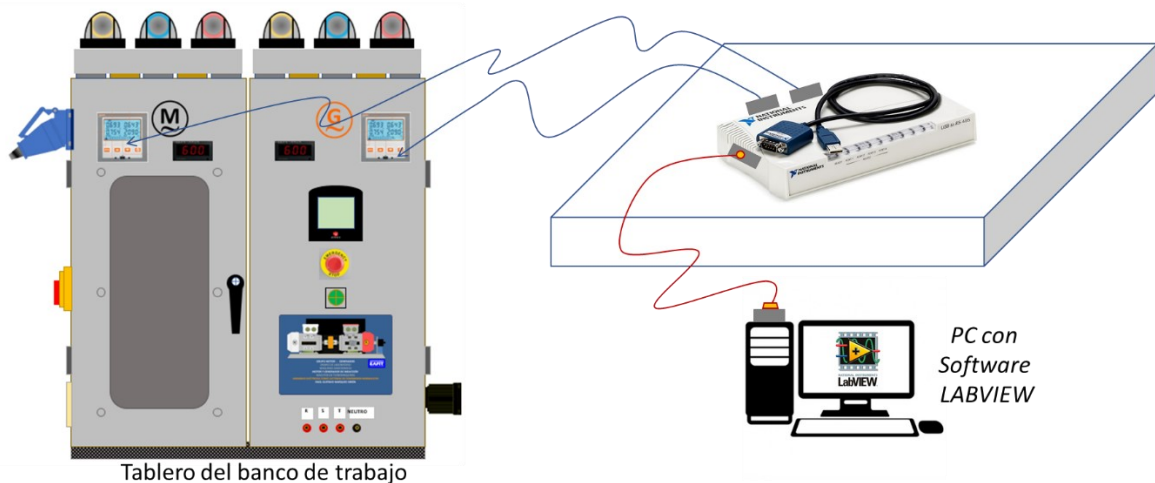


Figura 17.10. *Modulo de comunicación serial de NATIONAL INSTRUMENTS USB – 485 – Vista en el tablero de control.*

3. Elaboración de una plataforma Motor \textcircled{M} – Generador \textcircled{G} utilizando un generador síncrono de imanes permanentes.

Este tipo de ensamble utiliza un generador síncrono el cual produce la inducción del estator mediante imanes que producen el campo magnético.

La utilización de este tipo de generador tiene como ventaja la eliminación de anillos rozantes además de que elimina las pérdidas en el devanado del rotor o en la jaula del rotor (en caso de tratarse de una maquina asíncrona de jaula de ardilla).

Según la disposición de los imanes y la dirección del campo magnético generado, se distinguen, sobre todo, dos tipos de estos generadores:

- Generador de flujo radial.
- Generador de flujo axial.



Figura 17.11. Generador de imanes permanentes- Síncrono.

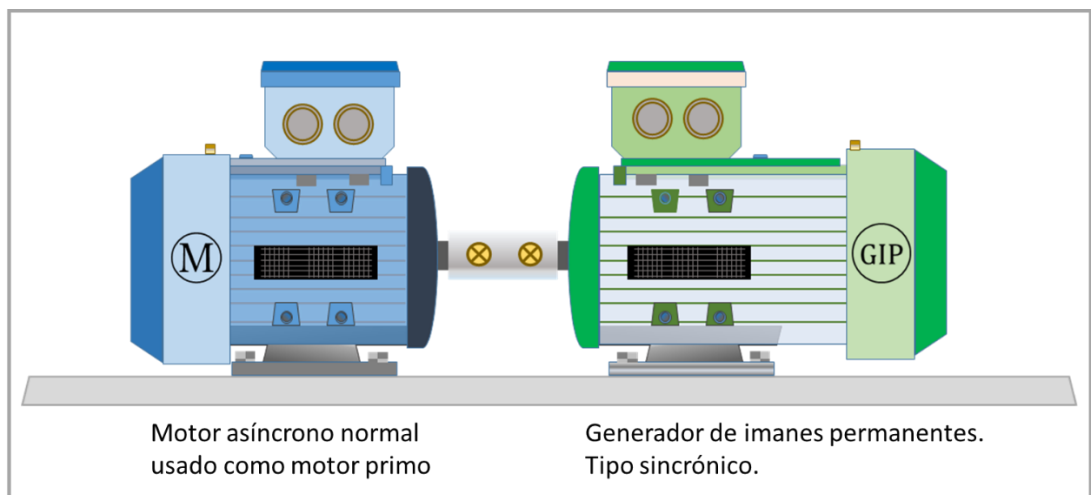


Figura 17.12. Propuesta de grupo motor generador

Este tipo de grupo $\text{M}-\text{G}$ es interesante evaluarlo ya que las maquinas de imanes permanentes representan la próxima generación de motores y generadores comerciales y de bajas potencias como para proyectos de pequeñas centrales o aerogeneradores pequeños.

Para el grupo $\text{M}-\text{G}$ a construir estimo potencias entre 05 HP y 1,5 HP.

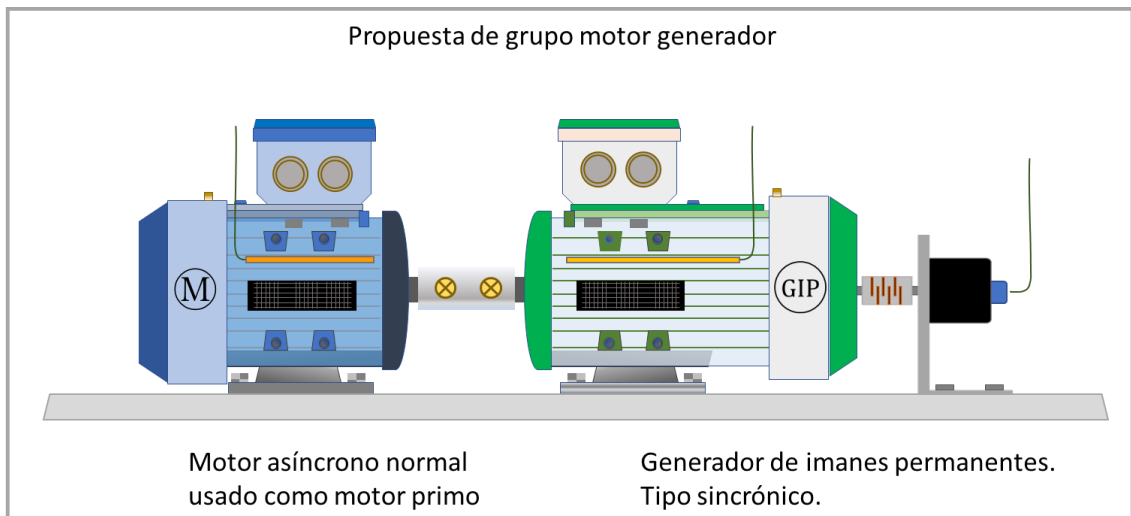


Figura 17.13. Propuesta de grupo motor generador con instrumentación similar a los grupos $\text{M} - \text{G}$ actuales

Igual estimo que se le colocarían sensores de temperatura y de velocidad para proceder a su estudio completo. Basado en la experiencia en este trabajo considero prudente cambiar las sondas PT100 por sondas termocuplas con blindaje para ser inmune a los campo magnéticos de las maquinas. El encoder si dejaría el mismo del trabajo ya que resultado ser muy exacto.

4. Elaboración de una plataforma PAT utilizando una bomba centrífuga existente en el laboratorio de hidráulica.

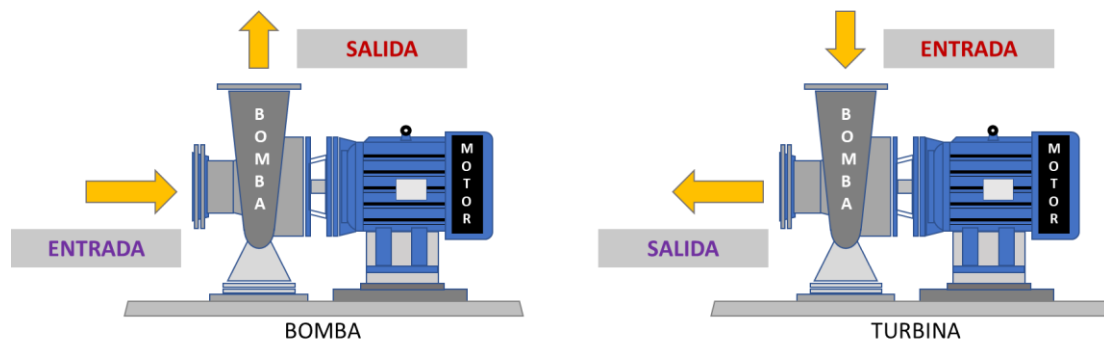


Figura 17.14. Elaboración de una plataforma PAT utilizando una bomba centrífuga existente en el laboratorio de hidráulica.

El objetivo es montar la bomba en una estructura de tal forma que esta pueda montarse en la mesa de trabajo del Banco $\text{M} - \text{G}$. Acá la bomba hará las veces del motor primo.

El siguiente es un registro fotográfico de la posible bomba centrífuga a utilizar en el grupo $\text{M} - \text{G}$.

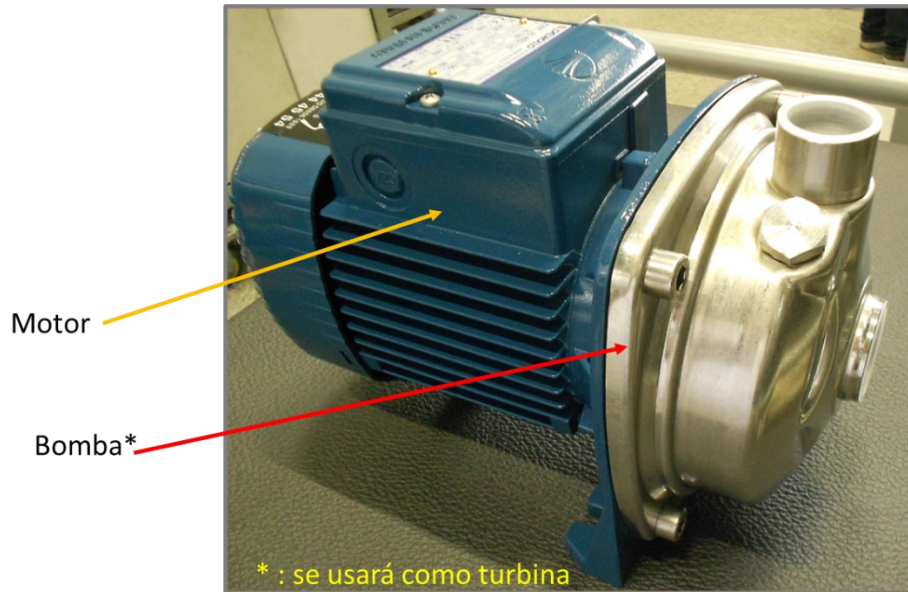


Figura 17.15. Registro fotográfico de la bomba centrífuga posible a utilizar en el proyecto PAT - 1

El siguiente es un registro fotográfico de la bomba centrífuga a utilizar en el grupo M-C , existente en el laboratorio de hidráulica.



Figura 17.16. Registro fotográfico de la bomba centrífuga posible a utilizar en el proyecto PAT - 2

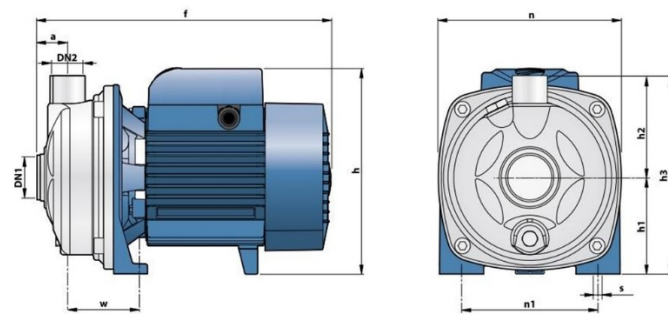
El equipo PEDROLLO AL-RED 135 posee un motor de inducción de 1HP = 0,75 kW el cual puede trabarse con los equipos de maniobra que posee el banco de trabajo de esta tesis.

El siguiente es un registro fotográfico de la bomba centrífuga a utilizar en el grupo M-C , existente en el laboratorio de hidráulica.



Figura 17.17. Registro fotográfico de la bomba centrífuga posible a utilizar en el proyecto PAT - 3

Dimensiones del equipo.

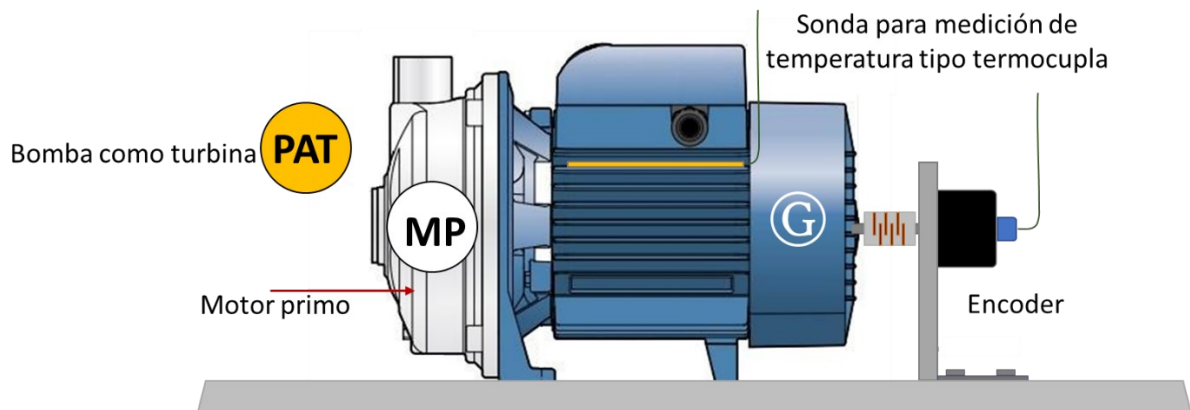


<https://szivattyuk.hu/pedrollo-al-red-135m.html>

MODEL		PORTS		DIMENSIONS mm										kg	
Single-phase	Three-phase	DN1	DN2	a	f	h	h1	h2	h3	n	n1	w	s	1~	3~
AL-RED 135m	AL-RED 135	1 1/4"	1"	31	296	206	97	103	200	186	135	73.5	10	9.1	9.0

Figura 17.18. Dimensiones del equipo.

Dibujo de estructura (M-G).



Todo este ensamble se conectaría en la mesa de trabajo.
Solo se requieren conexiones para el lado de generación G.

Figura 17.19. Estructura de la PAT.

La bomba PEDROLLO AL RED 135 es de alta velocidad y por consiguiente en el funcionamiento como PAT es necesario llevar el impeler, con un flujo de agua, por encima de la velocidad de sincronismo, la cual para este equipo se encuentra en las 3600 rpm ya que la maquina asíncrona de inducción del equipo es de 2 polos.

Dibujo de estructura (M-G)

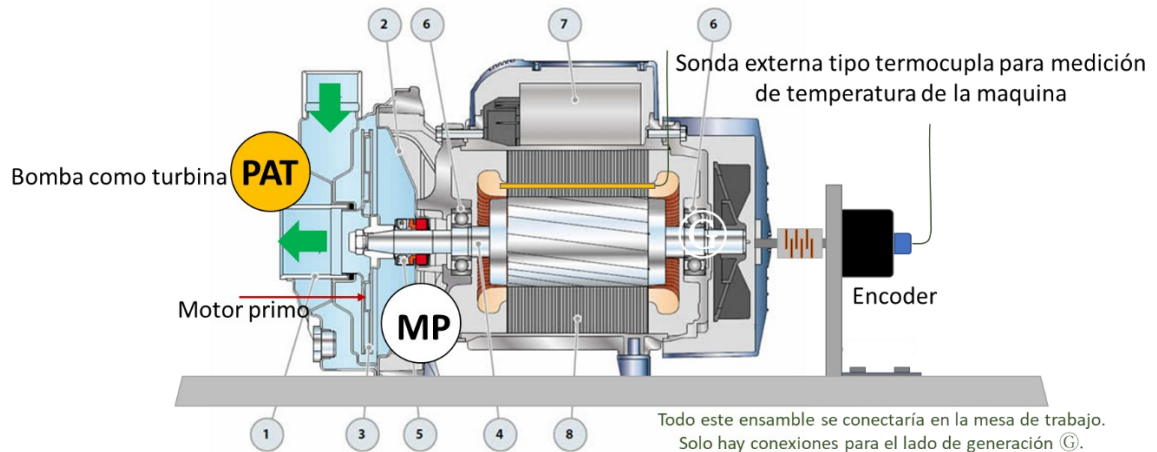


Figura 17.20. Estructura de la PAT. Desglose de partes.

1 Cuerpo de la PAT. 2 Tapa -placa de fondo de la PAT. 3 Rodete (Impeler). 4 Eje del generador asíncrono. 5 Sello mecánico. 6 Rodamientos. 7 Condensador. Solo para motor. 8 Generador eléctrico IE2 .

Conclusión:

El equipo brinda la posibilidad de muchas variantes de ensayo y desarrollo con su hardware instalado. Es interesante imaginarse los muchos ensayos que se pueden originar cuando se trabaja de lleno con este equipo.

Pero también la imaginación técnica y la literatura sobre estas máquinas asíncronas es cada vez más abundante. Esto conlleva a que son muchos los aspectos en donde agregando Hardware, se pueden mejorar y explorar nuevas situaciones útiles con estos equipos.

Además la informática también colabora puesto que es factible imaginarse bases de datos con el equipo funcionando y simulando aspectos de los sistemas de generación reales. El software LabView es muy factible instalarlo en la mesa de trabajo actual y con ello imaginarse y explorar situaciones que enriquecen el estudio de estas máquinas.

Capítulo 18

Bibliografía.

Objetivo específico:

Mostrar la información **bibliográfica más relevante** en este estudio, a pesar de la mucha información consultada para la elaboración de este trabajo.

Rodríguez Pozueta M.A. (2008) **Colección: "Electrotecnia para ingenieros no especialistas"**.

MAQUINAS ASINCRONAS. (1ra Edición)

Universidad de Cantabria España. ED. Publicaciones universidad de Cantabria.

Creative Commons BY-NC-SA 3.0.

Rodríguez Pozueta M.A. (2011) **POTENCIAS, CALENTAMIENTO, RENDIMIENTO, Y CARACTERIZACION DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS 2011.**

Universidad de Cantabria España. ED. Publicaciones universidad de Cantabria.

Creative Commons BY-NC-SA 3.0.

Rodríguez Pozueta M.A. (2015) **Colección: Maquinas Eléctricas I – G862**

Tema 3. Maquinas Asíncronas de Inducción (1ra Edición)

Universidad de Cantabria España. ED. Publicaciones universidad de Cantabria.

Creative Commons BY-NC-SA 4.0.

Rodríguez Pozueta M.A. (2015) **Diagrama del círculo para Maquinas Asíncronas (1ra Edición)**

Universidad de Cantabria España. ED. Publicaciones universidad de Cantabria.
Creative Commons BY-NC-SA 3.0.

Rodríguez Pozueta M.A. (2018) ***Colección: Maquinas Eléctricas II
Tema 4. Maquinas Asíncronas de Inducción.***

(1ra Edición)

Universidad de Cantabria España. ED. Publicaciones universidad de Cantabria.
Creative Commons BY-NC-SA 4.0.

Quiñonez España M.G. (2010) ***CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN MOTOR Y
CONTROLES ELECTRICOS COMO PREVENCION DE RIESGOS EN LA
INDUSTRIA.***

Informe Previa a la obtención del título de: INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION POTENCIA

Escuela Superior Politécnica del Litoral.
Guayaquil – Ecuador.

Extraído de:

<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>

Unidad 11 Motores Eléctricos.

Castillo, J; Marrufo, E. (2015)

CEO – Instalaciones Eléctricas General Motors.

McGraw-Hill Interamericana de España, SL.

Institute for Power Electronics And electrical drives, RWTH Aachen University.

Qi F., Schaferstein. D. ; Weiss .C. (2019)

Infineon Technologies AG

Muller. C ; Schwazers U. (2019)

Motor Handbook.

Munich/Germany ED. Infineon

James L. Kirtley Jr. (2005) ***Class Notes 8: Analytic Desing Evaluaton of Induction
Machines.***

Masachusetts Institute Of Technology – Departament of Electrical Engineering and
Computer Science.

6.685 Electric Machinery

Masachusetts EEUU.

Davis Martínez A.H. (2017) ***METODOS PARA DIMENSIONAR LA CAPACITANCIA
DE UN GENERADOR DE INDUCCION AUTO-EXITADO.***

Trabajo de grado para optar el título de Tecnólogo en Electricidad.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

PEREIRA-COLOMBIA

Chapallaz J.M; Ghali J.D; Eichenberger P; Fisher G. (1.992)

Manual on Induction Motors Used as Generators.

MHPG Series Harnessing Water Power on a Small Scale - Volume 10 of GATE ED.

Vieweg

Germany.

Chapallaz J.M; Eichenberger P; Fisher G. (1.992)

Manual on Pumps Used as Turbines.

MHPG Series Harnessing Water Power on a Small Scale - Volume 11 of GATE ED.
Vieweg
Germany.

Fisher G; Chapallaz J. M; Arter A; Meier U. (1990)

Governor Product Information.

Harnessing Water Power on a Small Scale – Volume 8 of GATE ED. SKAT
St. Gallen, Switzerland.

Arter A; Widmer R. (1992)

Village Electrification.

Harnessing Water Power on a Small Scale – Volume 5 of GATE ED. SKAT
St. Gallen, Switzerland.

Sedghi K. (2020)

Electrical Machines and Energy Conversion. Laboratory Manual.

Department of Electrical and Computer Engineering
California State University Northridge
Northridge CA.

Botterón F; Fernández G.A; Quintana A.P; Gerber J.L Kurtz V.H. (2011) ***ANALISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES ESTRUCTURAS DE COMPENSACION POR CARGA BALASTO, APLICADA A GENERADORES DE INDUCCION AUTOEXITADOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS.***

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15 Ed. ASADES
Argentina.

Aller, J. M. (2006) ***Maquinas Eléctricas Rotativas:***

Introducción a la Teoría General. (1ra Edición)

ED .Equinoccio, Universidad Simón Bolívar.
Caracas Venezuela.

Ibacache Olmos. M.I. (2019) ***Análisis de los torques punzantes que se producen en un motor de inducción trifásico.***

Informe final para optar al título de Ingeniero Eléctrico
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Gobierno de México FIDE / CNEE Guatemala (2010)

Curso Taller. Promotores de Ahorro y Eficiencia de Energía Eléctrica.

Modulo IV Ahorro de Energía Eléctrica mediante Motores Eléctricos de Inducción de Alta Eficiencia.
Guatemala.

Quintero Ramírez J.C; Villamizar Llano A. (2011)

Viabilidad Técnica–Económica de Implementar una Bomba como Pico Turbina para Suministrar Energía Eléctrica a una Escuela Rural.

Proyecto de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico.
Universidad EAFIT.

Medellín.

Extraído de:

www.edibon.com

EDIBON Ingeniería y Equipamiento Didáctico Técnico (2017)

Centrales eólicas con Generador de Inducción. AEL-WPPI.

Madrid España.

Extraído de:

www.alecop.com

Maquinas Eléctricas (2010)

Didactic Equipment.

Gipuzkoa España.

Torres Montalvo E. (2006) Control de Voltaje del Generador de Inducción Autoexcitado para Aplicaciones de micro/mini Generación de Energía Eléctrica.

Tesis para obtener el grado de Maestro en ciencias en la especialidad de Ingeniería Eléctrica.

CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara.

Jalisco Mexico.

Tardón Pantoja N.L. (2019) ***Estudio Comparativo de Costos de Inversión en Motores de Inducción Mas VDF, Según Potencia, Numero de Polos y Rango de frecuencia a Cubrir.***

Informe final para optar al título de Ingeniero Eléctrico

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Valparaíso Chile.

Guerrero Cuesta W. E. (2006)

Estudio de la Variación del Voltaje y la Frecuencia de Generación de una Maquina de Inducción Funcionando como Generador.

Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

Escuela Politécnica Nacional

Quito Ecuador.

Rivera Ruiz F. F. (1987)

La maquina de Inducción como Generador.

Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

Escuela Politécnica Nacional

Quito Ecuador.

Quispe Oqueña E.C; Patiño Mercad J.E. (1995)

El generador de inducción autoexcitado. Modelo matemático para el análisis transitorio y evaluación de parámetros considerando el efecto de la saturación.

Extraido de ENERGIA Y COMPUTACION VOL.4, N° 1 ED. N°9

Universidad del Valle.

Cali Colombia.

Sánchez V.H; Collazos A; Ortiz F. R. (2019)

Extraído de: ***Presentación ppt. Congreso Microcentrales Hidroelectricas con aplicación de Maquinas Reversibles.***

Universidad EAFIT.
Medellín Colombia.

SALIMIKORDKANDY C. (2012)

Shunt Voltage Regulation of self- excited Induction Generator.

Master of Science in electric and electronic Engineering .
School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylul University.
Izmir Turquía.

Chermiti D. Khedher A. (2014)

A New Method Voltage and Frequency Regulation of Self-excited Induction Generator Operating in Stand Alone.

WSEAS TRANSACTIONS ON ENVIROMENT AND DEVELOPMENT (2014)
Susa, Tunez.

Conclusión:

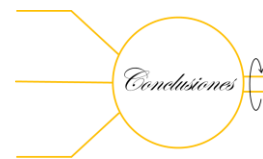
La bibliografía en los temas referentes a los temas del comportamiento de la maquina asíncrona en su modo Generador (G) es relativamente poca, dado que esta maquina inicialmente fue pensada para el trabajo en modo Motor (M).

Pero debido a la robustez, economía y sencillez de esta maquina, su estudio y aplicaciones cada vez se hacen mayores en el modo (G).

Esta máquina asíncrona en modo (G) también se ha vuelto muy importante en los proyectos de baja escala en generación de potencia dada la facilidad y economía en su instalación.

Muchas personas hoy estudian estos equipos y es por esto que los recursos bibliográficos tienden a aumentar considerablemente al respecto.

Conclusiones.



La aplicación de las PAT con generador de inducción asincrónico trifásico dispone de una serie de sensores que permiten al estudiante medir la velocidad de la PAT y el par aplicado para calcular parámetros eléctricos y mecánicos, a través de los cuales es posible profundizar en el estudio de las máquinas hidráulicas con generador de inducción. Lo anterior aplica también para aerogeneradores.

Este trabajo cuenta con todos los elementos de seguridad eléctricos y mecánicos los cuales garantizan su operación segura y confiable.

El banco de trabajo está formado por los siguientes módulos:

- Una alimentación principal industrial.
- 3 Bancos de condensadores conmutables trifásicos.
- Un VDF para motor de 1.5 kW.
- Dos analizadores de redes. Multímetros de tablero. Una para M y una para G .
- Protección eléctrica para el del motor M .
- Contactores para grupos de bombillas (Resistencias) comandado por el PLC.
- Dos grupos M - G de inducción asincrónicos: 1.2 HP y 0.14 hp.
- Un PLC con HMI incorporado.
- Software de programación del PLC con módulo para programación de los diferentes pantallas HMI.
- Software xPRESS para la parametrización y monitorización de los dos analizadores de redes que posee el tablero.

- Una mesa de trabajo para ubicación segura y didáctica del grupo (M) - (G)
- El sistema puede conectarse a una PC y desde allí visualizarse todo en una TV o en un Video Beam.
- El sistema puede operarse remotamente con asistencia técnica en el sitio por personal del laboratorio.

Este banco busca ser una herramienta útil para el cominezo de un mayor enentendimiento de las maquinas asincronas de induccion trifasicas ya que su utilización en los otros modos diferentes a los de motor y sobre todo en el modo generador prometen **cada vez más utilizados** dados los muchos estudios y aplicaciones que se tienen hoy en el campo de las enrgías alternativas y sobre todo a baja escala. Estos estudios aportan muchos beneficios a las aplicaciones en lugares alejados de las ciudades o de las zonas con alta presencia de la energía convencional.