



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO DE UNA APLICACIÓN
INFORMÁTICA PARA ANÁLISIS Y
SIMULACIÓN DE LOS DISTINTOS
TIPOS DE MÁQUINA ELÉCTRICA.**

Alumno: Alberto Huertas Hervás

Tutor: Manuel Valverde Ibañez
Depto.: Ingeniería Eléctrica

JUNIO, 2016

RESUMEN

El presente trabajo fin de grado tiene como propósito analizar de forma interactiva las distintas máquinas eléctricas. Como punto de partida, se explica el contexto teórico esencial de cada máquina para comprender mejor su posterior análisis, a través de un programa que se ha creado mediante interfaces gráficas con MATLAB y la aplicación GUIDE. Se ha creado el programa para poder abarcar el máximo espectro de resultados y poder, así, aumentar la interacción por parte del usuario. Al final, se presenta una serie de ejemplos, en los cuales se muestra la funcionalidad del programa, para cada una de las máquinas.

Como resultado de este proyecto se ha obtenido un software que sirve como una herramienta útil y sencilla para el cálculo de las distintas máquinas eléctricas.

Palabras clave: Máquinas eléctricas, GUIDE, análisis eléctrico.

ABSTRACT

This electrical machines final degree project is MATLAB software based. Its objective is to interactively analyze the different electrical machines. The fundamental theoretical context of each machine is explained to better understand their later analysis at the beginning. Software has been created using graphical interfaces with MATLAB and GUIDE to analyze maximum quantity of possible results and thus, increase interaction by the user. At the end, several examples are presented for each different machine to prove functionality of the software.

This MATLAB GUI-based program offer user useful and easy tool to display electrical machines calculations.

Keyword: electrical machines, GUIDE, electrical analysis

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Objetivo.....	2
2. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	2
2.1. Introducción	2
2.2. Máquinas de corriente continua	3
2.3. Máquinas sincronas	15
2.4. Transformadores	31
2.5. Máquinas asincronas	50
3. METODOLOGÍA	64
3.1. ¿Qué es GUI?	64
3.2. Creación de GUI	66
4. RESULTADOS Y EJEMPLOS	79
5. CONCLUSIONES.....	114
6. BIBLIOGRAFÍA	115

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo

El objetivo que se plantea con este proyecto es la realización de un entorno gráfico que permita el cálculo de los distintos tipos de máquinas eléctricas mediante la utilización del software MATLAB.

Para ello se deberá conocer los siguientes entornos para desarrollar la aplicación:

- El conocimiento sobre los distintos tipos de máquinas eléctricas.
- La herramienta para el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario (GUIDE).
- El lenguaje de programación propio de MATLAB para poder realizar los cálculos.

2. MAQUINAS ELECTRICAS

2.1. Introducción

Este capítulo inicial pretende desarrollar los conceptos básicos que constituyen las máquinas eléctricas así como describir de manera general sus principales tipologías.

Se puede definir una máquina eléctrica como todo conjunto de mecanismos capaces de generar, aprovechar o transformar la energía eléctrica. Por lo que estas máquinas pueden convertir energía mecánica en energía eléctrica o viceversa. En base a este punto de vista, las máquinas eléctricas se pueden clasificar en cuatro grupos:

- Máquinas de corriente continua
- Máquinas síncronas
- Transformadores
- Máquinas asíncronas

2.2. MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

2.2.1. Aspectos constructivos

Desde un punto de vista constructivo la máquina de corriente continua está constituida por una parte fija o estator, donde se encuentran el circuito magnético inductor y los polos, constituidos por los núcleos polares y una parte móvil o rotor, formada por el inducido y el colector de delgas (conmutador). (Figura 1.1)

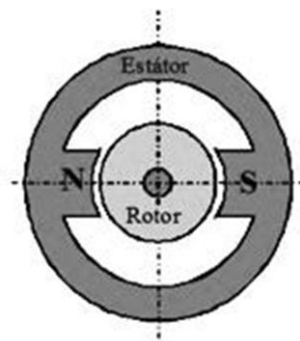


Figura 1.1. Máquina de corriente continúa

2.2.2. Principio de funcionamiento

En las máquinas de corriente continua, el inductor (campo) produce el campo magnético necesario para que se produzcan corrientes inducidas. En el inducido se desarrollan las corrientes inducidas por medio campo magnético producido en el inductor.

Finalmente, el colector es el órgano que recoge las corrientes producidas por el inducido, obteniéndose corriente continua; esto, en el caso de un generador. O, por el contrario, sirve para recoger la corriente de la línea de alimentación para que, por reacción sobre el campo magnético inductor se produzca un movimiento rotatorio, en el caso de un motor.

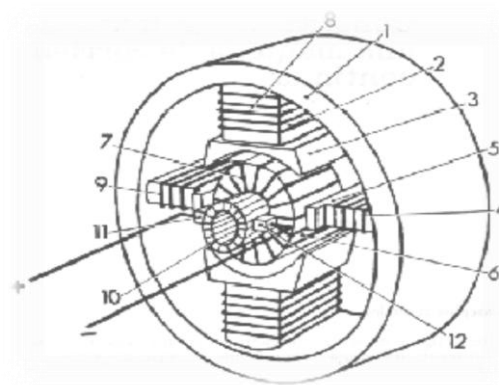


Figura 1.2 -Representación de las partes esenciales de una máquina de corriente

1. – Culata o carcasa	7. – Devanado del inducido
2. – Núcleo polar de un polo inductor	8. – Devanado de excitación
3. – Pieza polar de un polo inductor	9. – Devanado de conmutación
4. – Núcleo polar de un polo de conmutación	10. – Colector
5. – Pieza polar de un polo de conmutación	11. – Escobilla positiva
6. – Inducido	12. – Escobilla negativa

Tabla 1.1 -Leyenda de las partes esenciales de una máquina de corriente continua

2.2.2.1. Funcionamiento del inductor (campo)

El sistema inductor produce el campo magnético necesario para crear las corrientes inducidas. Este campo magnético puede ser producido por imanes permanentes o por electroimanes.

Generalmente, el campo magnético inductor está producido por electroimanes montados sobre la carcasa de la máquina; estos se llaman polos inductores y están constituidos por un núcleo magnético de hierro o de acero y un arrollamiento conductor que lo rodea (arrollamiento de excitación o devanados de campo).

Las bobinas que constituyen los arrollamientos de excitación de los diferentes polos, están conectadas entre sí de manera que formen, alternativamente, un polo Norte y un polo Sur.

2.2.2.2. Funcionamiento del inducido

El inducido de una máquina de corriente continua, consta de un núcleo formado por chapas magnéticas de hierro, de la calidad denominada chapa de dinamo o chapa de inducido, aisladas entre sí por medio de papel o barniz; esto se hace así para disminuir las corrientes de Foucault que se producen en el núcleo magnético, hasta límites admisibles.

2.2.2.3. Colector-conmutador

Se denomina colector a un conjunto de láminas conductoras o delgas, generalmente de cobre, dispuestas en forma cilíndrica y aislada entre sí, que giran al mismo tiempo que el inducido. Ahora, se colocan unos frotadores flujos o escobillas, a los que se unen los conductores exteriores generales. Cualquiera que sea la posición del inducido, los conductores de la izquierda producen fuerzas electromotrices hacia atrás y los conductores de la derecha producen fuerzas electromotrices dirigidas hacia delante; por lo tanto, cada una de las escobillas recogerá siempre corriente de un solo sentido, es decir, que la corriente saldrá de la máquina por una escobilla, atravesará la resistencia de carga R y retornará a la máquina por la otra escobilla.

2.2.2.4. Línea neutra

El eje que forma la alineación de las escobillas se denomina línea neutra. Esta línea tiene gran importancia, pues indica las posiciones en las que se produce la inversión de la f.e.m. en las bobinas del inducido pasando las espiras correspondientes de una rama paralelo a la otra.

La posición exacta de la línea neutra se determina experimentalmente moviendo el collar de las escobillas hasta encontrar el punto en el que se producen las mínimas chispas en el colector de delgas.

2.2.2.5. Determinación de las magnitudes

En el conjunto de todas las espiras del devanado del inducido se inducirá una tensión que será proporcional a la que se induce en cada espira, y que depende de la velocidad de giro de la máquina, sus dimensiones y el valor del campo magnético. En general se puede expresar la f.e.m. producida en el inducido como:

$$E = K_E * \Phi * n \quad (1.1)$$

Donde K_E , es una constante determinada para cada máquina. De esta expresión se deduce que la f.e.m. puede regularse variando la velocidad del rotor o cambiando el flujo inductor mediante el ajuste de la corriente de excitación de los polos.

El giro de la máquina es el resultado de la interacción del flujo del inductor con las corrientes del inducido al contar este a una red de corriente continua, lo que provoca una f.e.m. de reacción en el rotor que se opone al sentido de la corriente y que recibe el nombre de fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.).

El paso de una corriente continua por los conductores del inducido provoca en el rotor un par electromagnético que tiene carácter motor. Podemos expresar el par electromagnético, resultado:

$$T = K_T * \Phi * I_i \quad (1.2)$$

O bien en función de la f.e.m. del inducido;

$$T = \frac{E * I_i}{2 * \pi * \frac{n}{60}} \quad (1.3)$$

El numerador representa la potencia electromagnética que se extrae de la máquina y que es en definitiva el producto del par por la velocidad angular, es decir:

$$P_a = E * I_i = T * 2\pi * \frac{n}{60} \quad (1.4)$$

2.2.3. Reacción de inducido

Cuando el motor está en carga el flujo del inductor se distorsiona debido al flujo magnético creado por la corriente del inducido, el cual es perpendicular al flujo magnético principal creado por los polos inductores.

Por lo tanto es el efecto de desplazamiento de la zona neutra que sufre el campo magnético de la máquina cuando están excitados tanto el inducido como el campo y se debe a la interacción de los dos campos magnéticos de rotor (inducido) y estator.

En general el plano neutro se desplaza en sentido contrario a la dirección del movimiento en un motor. Además, la magnitud del desplazamiento depende de la cantidad de corriente en el rotor y por tanto de la carga que tenga la máquina.

El resultado final es la formación de un arco de chispas en las escobillas. Este es un problema delicado, puesto que conduce a la disminución de la vida útil de las escobillas, picadura de los segmentos del colector (delgas) e incremento de los costes de mantenimiento.

El problema que se origina con la Reacción del inducido es el debilitamiento del flujo del campo magnético del estator. El debilitamiento del flujo causa problemas tanto en el generador como en el motor.

En los motores, el efecto puede ser más serio, cuando el flujo en un motor disminuye, su velocidad aumenta. Pero aumentar la velocidad de un motor se puede aumentar la carga, lo que se traduce en un mayor debilitamiento del flujo.

Es posible que algunos motores de corriente continua en derivación esta velocidad se mantenga en aumento hasta que la máquina se desconecta de la línea de potencia o hasta que ella misma se destruye.

Tiene como inconvenientes lo citado anteriormente;

- Disminución de la f.e.m. en carga.
- Disminución indirecta del rendimiento del motor.
- Crea peligros de chispas en el colector.
- Aumenta las dificultades para realizar una buena conmutación.

2.2.4. Conmutación

La conmutación es el proceso por medio del cual se convierten las tensiones y las corrientes de corriente alterna del inducido de una máquina de corriente continua, en tensiones y corrientes de corriente continua en sus terminales. Es la parte más crítica en el diseño y funcionamiento de cualquier máquina de corriente continua.

Una buena conmutación debe realizarse sin la formación de chispas en el colector, mientras que una mala conmutación, concurrente con la formación de chispas, produciendo para un trabajo prologado de la máquina, un deterioro notable de la superficie del colector perturbando así, el buen funcionamiento de la máquina.

El chisporroteo entre las escobillas y el colector es producido a causas mecánicas y eléctricas. Referente a las causas mecánicas figuran defectos en el ajuste de las escobillas con el colector, resalte de algunas delgas, desequilibrio del rotor, etc.; todos estos factores empeoran el contacto entre las escobillas y el colector. Las causas eléctricas del chisporroteo se originan principalmente por la elevación de la tensión entre delgas adyacentes del colector, que pueden ser provocadas por los fenómenos de autoinducción de las secciones del arrollamiento del inducido.

Debido a la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso de conmutación, resulta muy difícil hacer un análisis riguroso del mismo.

En la práctica la conmutación jamás será lineal debido a la aparición de una f.e.m. de autoinducción y de inducción mutua en la sección conmutada debido a la variación de la corriente existente en la propia sección y en la adyacente, denominada fuerza electromotriz reactiva.

Para evitar el chisporroteo originado por la aparición de esta f.e.m., será necesario compensarla con otra f.e.m. de signo opuesto y de igual magnitud, esto se consigue incorporando en la zona de conmutación (línea neutra) un polo auxiliar que cree una determinada inducción en la sección conmutada.

2.2.5. Generadores (dinamos)

No existe diferencia real entre un generador y un motor excepto la dirección del flujo de potencia. Un generador es la máquina que transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

Los generadores de corriente continua se clasifican según el método que usan para proporcionar corriente de campo que excite los imanes del mismo.

2.2.5.1. Generadores con excitación independiente

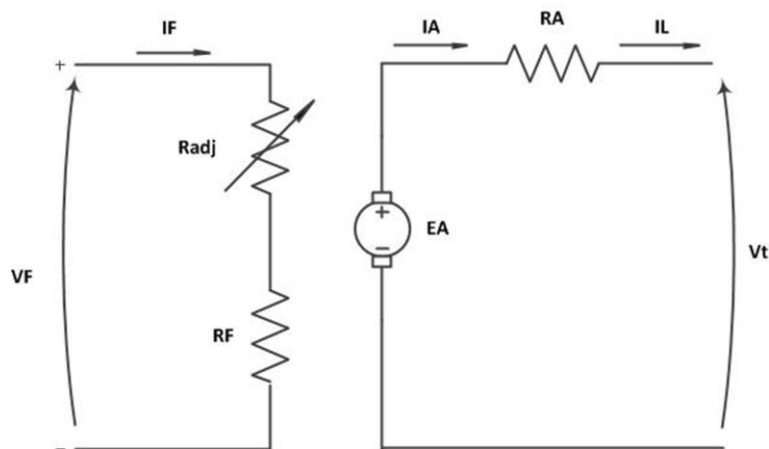


Figura 1.3 -Circuito equivalente generador con excitación independiente.

$$V_T = E_A - I_A * R_A \quad (1.5)$$

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \quad (1.6)$$

$$I_L = I_A \quad (1.7)$$

2.2.5.2. Generadores con excitación en derivación (shunt)

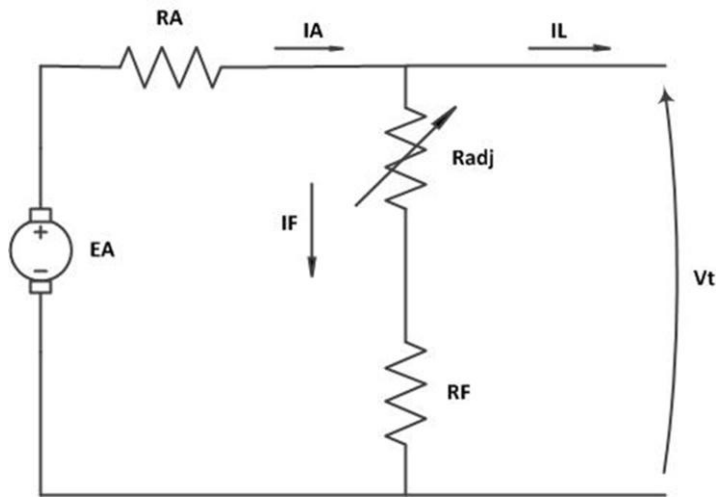


Figura 1.4 -Circuito equivalente generador con excitación en derivación.

$$V_T = E_A - I_A * R_A \quad (1.8)$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (1.9)$$

$$I_A = I_F - I_L \quad (1.10)$$

2.2.5.3. Generadores con excitación serie

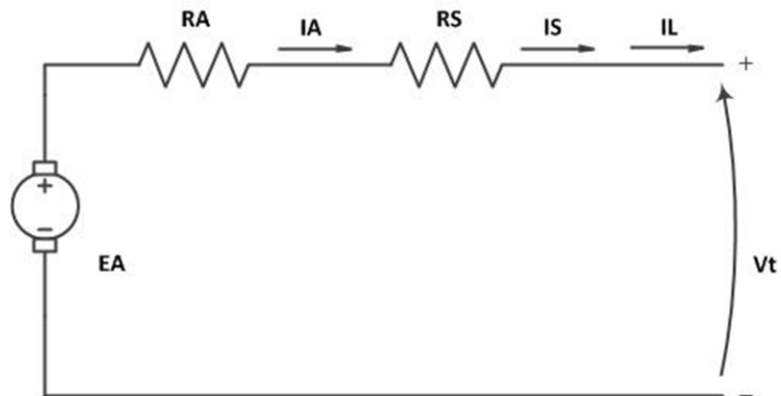


Figura 1.5 -Circuito equivalente generador con excitación serie.

$$V_T = E_A - I_A * (R_A + R_S) \quad (1.11)$$

$$I_A = I_S = I_L \quad (1.12)$$

2.2.6. Motores

En general, los motores de corriente continua son similares en su construcción a los generadores. De hecho podrían describirse como generadores que funcionan al revés. Un motor es la máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica.

Los motores de corriente continua se clasifican según el método que usan para proporcionar corriente de campo que excite los imanes del mismo.

2.2.6.1. Motores con excitación independiente

Un motor con excitación independiente es un motor cuyo circuito de campo es alimentado por una fuente de potencia separada, de tensión constante.

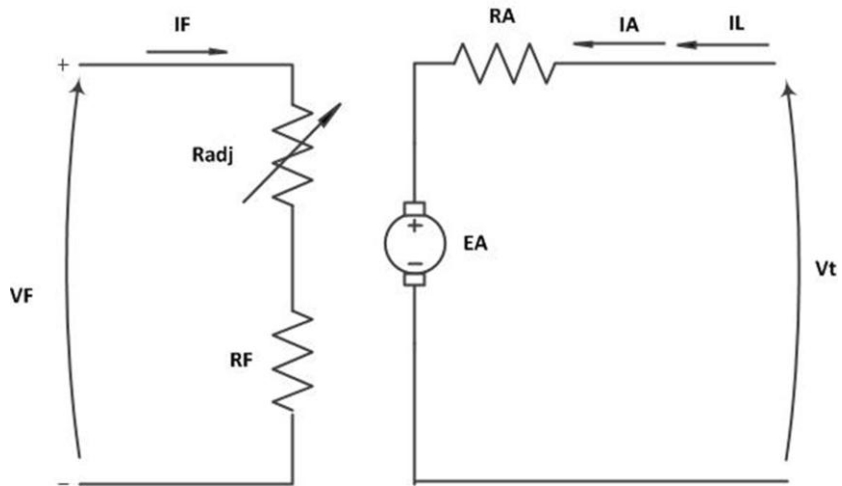


Figura 1.6 -Circuito equivalente motor con excitación independiente.

Ecuaciones características de un motor con excitación independiente:

$$V_T = E_A + I_A * R_A \quad (1.13)$$

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \quad (1.14)$$

$$I_L = I_A \quad (1.15)$$

2.2.6.2. Motor con excitación en derivación (shunt)

Un motor con excitación en derivación es aquel cuyo circuito de campo obtiene su potencia directamente de los terminales del inducido del motor. No existe casi diferencia entre este motor y el motor con excitación independiente, ya que ambos tienen el mismo comportamiento.

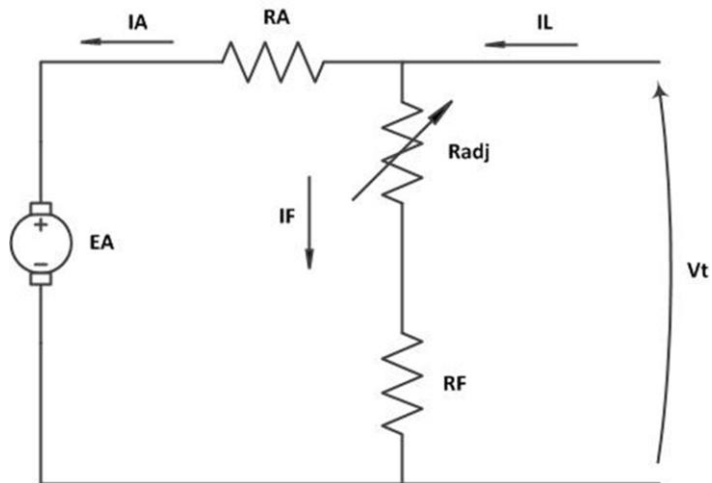


Figura 1.7 -Circuito equivalente motor con excitación en derivación.

Ecuaciones características de un motor con excitación en derivación:

$$V_T = E_A + I_A * R_A \quad (1.16)$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (1.17)$$

$$I_L = I_F + I_A \quad (1.18)$$

2.2.6.3. Motor con excitación serie

Un motor con excitación serie es un motor cuyos devanados de campo están conectados en serie con el circuito inducido del motor, los devanados de campo cuentan con pocas vueltas.

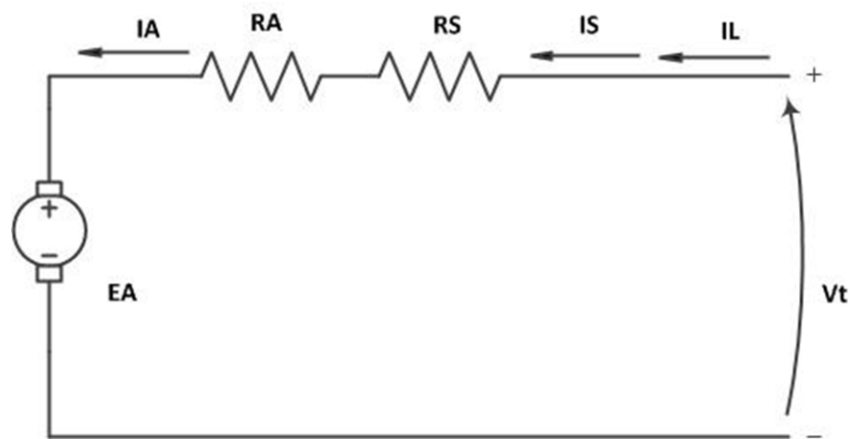


Figura 1.8 -Circuito equivalente motor con excitación serie.

Ecuaciones características de un motor con excitación serie:

$$V_T = E_A + I_A * (R_A + R_S) \quad (1.19)$$

$$I_L = I_A = I_S \quad (1.20)$$

2.3. MÁQUINAS SINCRONAS

2.3.1. Introducción

Una máquina síncrona es una máquina rotativa de corriente alterna cuya velocidad de rotación del eje y la frecuencia eléctrica están sincronizadas y son mutuamente dependientes, la máquina puede operar tanto como motor y generador. Como motor síncrono convierte la energía eléctrica en energía mecánica y la velocidad de rotación del eje dependerá de la frecuencia de la red eléctrica que se le suministre o bien convierte energía mecánica en energía eléctrica, siendo en este caso utilizada como generador síncrono y la frecuencia entregada en las terminales dependerá de la velocidad en la que el eje esté girando.

Las máquinas síncronas se utilizan en mayor medida como generadores de corriente alterna que como motores de corriente alterna, ya que no presentan par de arranque y hay que emplear diferentes métodos de arranque y aceleración hasta la velocidad de sincronismo. También se utilizan para controlar la potencia reactiva de la red por su capacidad para, manteniendo la potencia activa desarrollada constante, variar la potencia reactiva que absorbe o cede a la red.

2.3.2. Aspectos constructivos

La máquina síncrona al igual que todos las maquinas rotativas está constituido por dos devanados independientes:

- Un devanado inductor, construido en forma de arrollamiento concentrado o bien distribuido en ranuras, alimentado por corriente continua, que da lugar a los polos de la máquina.

- Un devanado inducido distribuido formando un arrollamiento trifásico recorriendo por corriente alterna

Respecto a la disposición del devanado inductor e inducido, existe dos tipos de construcción, en función de la potencia del mismo:

- a) Para potencias pequeñas $< 10\text{MVA}$, el devanado inductor se coloca en forma concéntrica en el estator sobre expansiones magnéticas también llamadas polos salientes, por lo que el inducido se sitúa en el rotor formando tres fases, (figura 2.1).

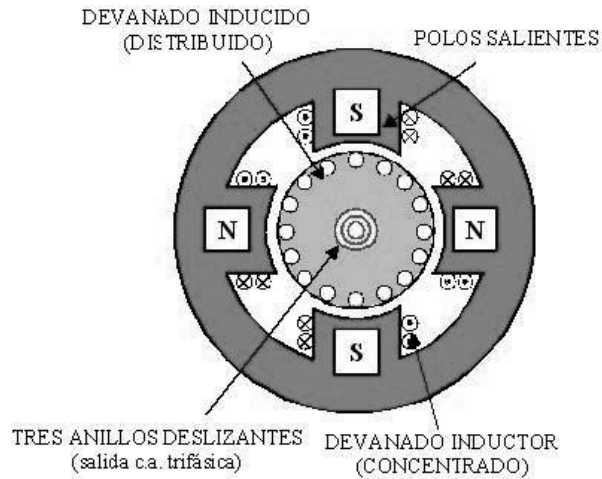


Figura 2.1. Máquina síncrona de baja potencia.

- b) Para potencias grandes $> 10\text{MVA}$, tanto el devanado inductor como los polos se colocan en el rotor y el devanado trifásico (inducido) se coloca en el estator. En estas máquinas existen dos versiones del rotor, una de ellas es en forma de polos salientes y la otra en forma de rotor cilíndrico, (figura 2.2).

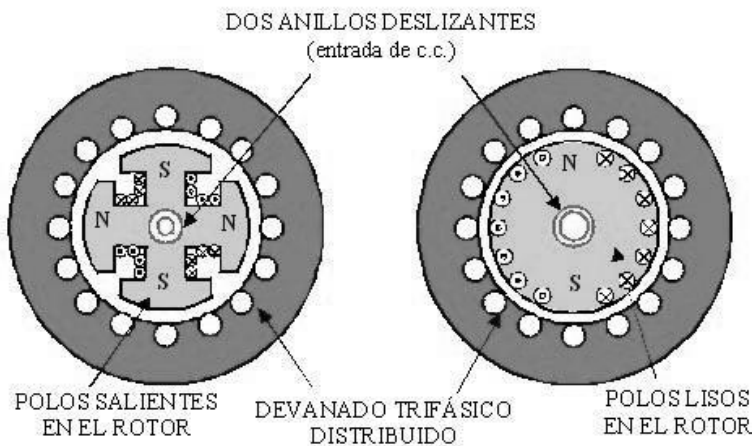


Figura 2.2. Tipos constructivos de máquina síncrona.

2.3.3. Generador síncrono (alternador)

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna.

Es necesario suministrar una corriente continua al devanado inductor, la cual se puede suministrar desde una fuente de corriente continua externa a través de anillos rozantes y escobillas, o bien, desde una fuente de corriente continua especial montada directamente en el eje del generador.

2.3.3.1. Velocidad de rotación

Los alternadores son máquinas síncronas, por lo que la frecuencia eléctrica producida esta sincronizada con la tasa mecánica de rotación del generador, es decir, la velocidad del rotor es la misma que la velocidad que genera el campo magnético. La frecuencia eléctrica del estator viene expresada por la siguiente ecuación, la cual relaciona dicha frecuencia con la velocidad de rotación del rotor:

$$f_e = \frac{n_m * P}{120} \quad (2.1)$$

Donde, n_m es la velocidad del rotor y P es el número de polos.

Teniendo en cuenta que la potencia eléctrica se genera a 50 o 60 Hz, la velocidad del alternador depende exclusivamente del número de polos de la máquina.

2.3.3.2. Tensión interna generada

La magnitud de tensión inducida en el estator depende del flujo Φ , de la frecuencia y de la construcción de la máquina. La ecuación que relaciona todos estos parámetros se expresa así:

$$E_A = K\Phi\omega \quad (2.2)$$

Donde K es una constante que representa la construcción de la máquina y ω representa la velocidad de rotación o frecuencia, expresada en radianes eléctricos por segundo.

2.3.3.3. Circuito equivalente

Para estudiar el comportamiento de la máquina síncrona es necesario hacer uso del circuito equivalente, en el cual se analizarán los parámetros necesarios para poder sentar las bases de un procedimiento de análisis válido.

La tensión E_A es la tensión interna generada en una fase, la cual es igual a la tensión de salida V_ϕ siempre y cuando no fluya ninguna corriente inducida por la máquina, es decir, la máquina está parada. Sin embargo cuando fluye una corriente inducida en la máquina esta tensión no es la misma tensión que aparece en los terminales de la máquina

Esta diferencia se debe a varios factores:

- La reacción de inducido
- Las resistencias de las bobinas del inducido
- La autoinductancia de las bobinas del inducido
- El efecto de la forma de los polos saliente del rotor

Para realizar el circuito equivalente se ignorará los efectos de la forma de los polos, se supondrá que la máquina tiene rotor cilíndrico.

Cuando gira el rotor de un generador se induce una tensión E_A en las bobinas del mismo. Al conectar una carga a los terminales del generador se produce un campo magnético propio en la máquina, que distorsiona el campo magnético del rotor cambiando la tensión de fase resultante. A este efecto se le conoce como reacción de inducido y la tensión de salida en una fase se transformaría entonces en:

$$V_{\phi} = E_A - jXI_A \quad (2.3)$$

Además de los efectos de la reacción de inducido, los devanados del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. En la resistencia y en la correspondiente reactancia se produce una caída de tensión en cada una de ellas. Por lo que la diferencia entre la tensión interna generada y la tensión de salida, viene definida totalmente por esta ecuación:

$$V_{\phi} = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad (2.4)$$

Tanto la reacción de inducido como la autoinductancia son representadas mediante reactancias, y se suelen combinar entre ellas creando así la llamada reactancia síncrona de la máquina:

$$X_S = X + X_A \quad (2.5)$$

El circuito equivalente final es el representado en la figura (2.3) y la ecuación final que describe la tensión de salida de la máquina es:

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (2.7)$$

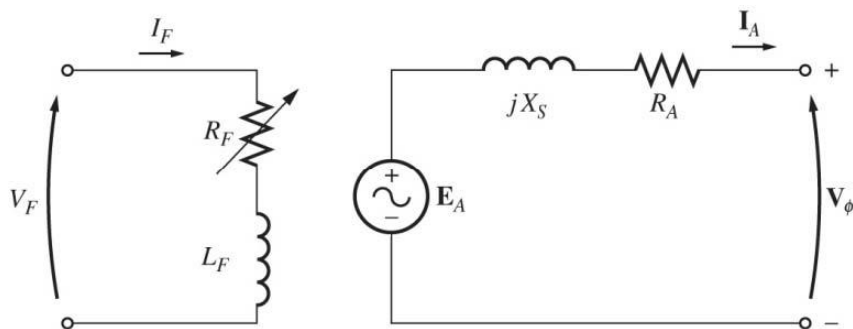


Figura 2.3. Circuito equivalente de un generador síncrono.

2.3.3.4. Diagrama fasorial

Teniendo en cuenta que las tensiones en un generador síncronos son alternas, estas se representan como fasores. Esta representación se realiza mediante un dibujo bidimensional. La relación entre las tensiones y la corriente dan lugar al llamado diagrama fasorial.

En este diagrama se representan las siguientes magnitudes:

E_A – Tensión interna generada.

V_ϕ – Tensión de salida.

$jX_S I_A$ – Caída de tensión de la reactancia síncrona.

$R_A I_A$ – Caída de tensión de la resistencia.

I_A – Corriente del inducido.

φ – Angulo de desfase correspondiente a I_A .

δ – Angulo de desfase correspondiente a E_A .

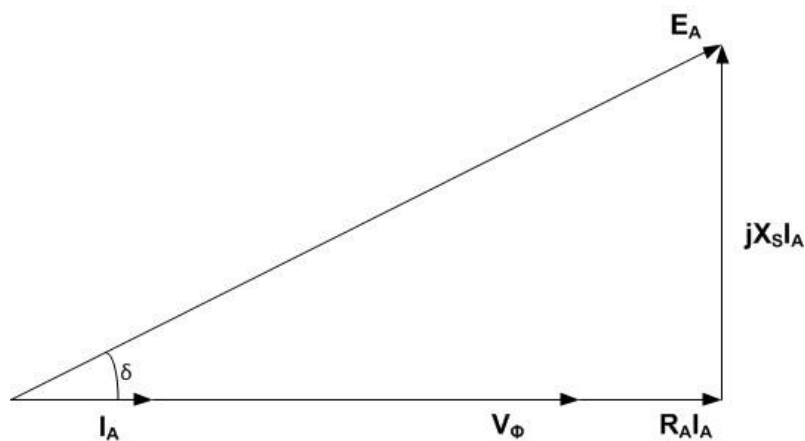


Figura 2.4. Diagrama fasorial de un alternador con factor de potencia unitario.

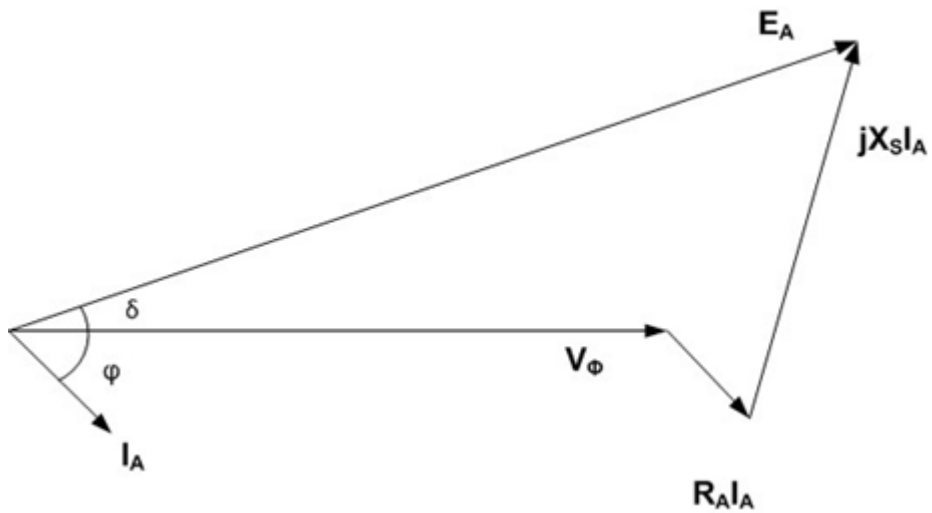


Figura 2.5. Diagrama fasorial de un alternador con factor de potencia en atraso.

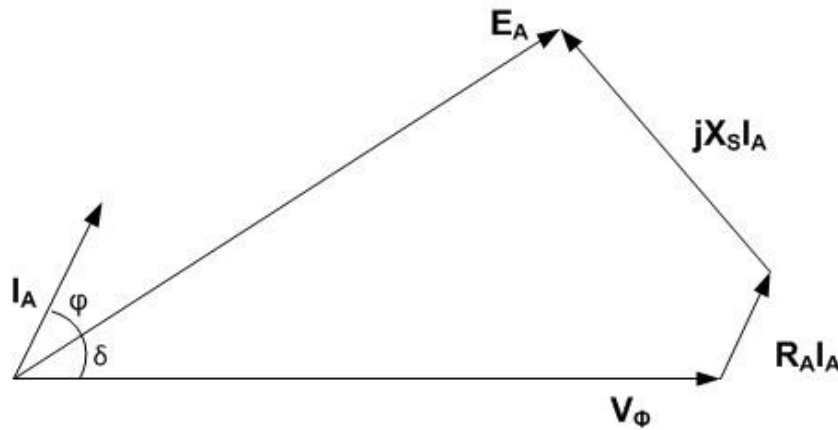


Figura 2.6. Diagrama fasorial de un alternador con factor de potencia en adelante.

La combinación de los ángulos de desfase φ y δ da como resultado un ángulo γ .

2.3.3.5. Potencia y par

No toda la potencia mecánica que entra en la maquina se convierte en potencia eléctrica a la salida. La diferencia entre la potencia de salida y de entrada define las pérdidas de la máquina.

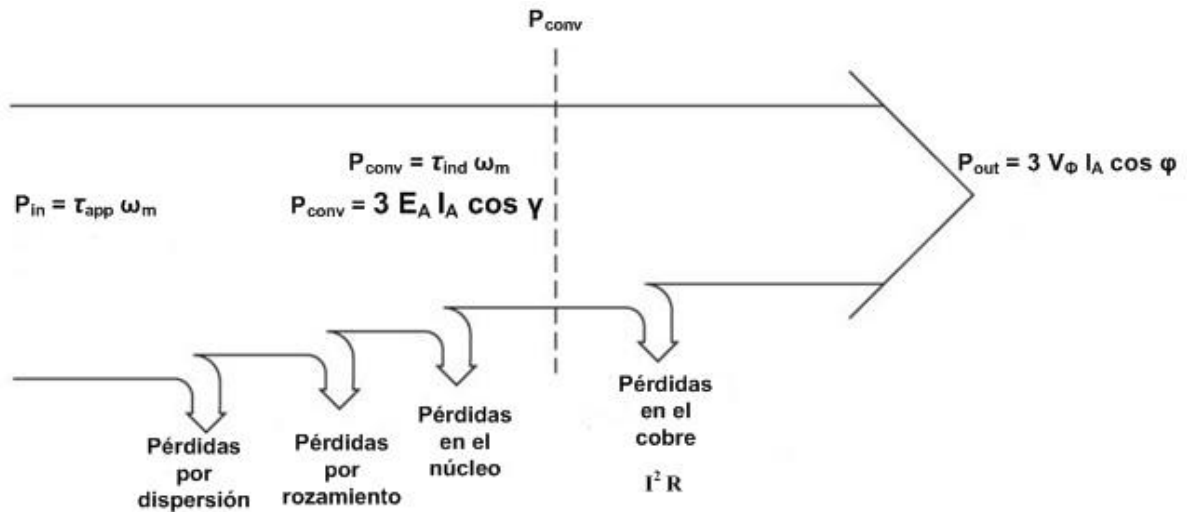


Figura 2.7. Diagrama de flujo de potencia de un alternador (por fase).

La potencia mecánica de entrada es la potencia al eje en el generador P_{in} , mientras que la potencia mecánica convertida en eléctrica está dada por P_{conv} . La potencia eléctrica real de salida del generador está dada por:

$$P_{out} = 3V_{\phi}I_A \cos \varphi \quad (2.8)$$

La potencia reactiva puede ser expresada como;

$$Q_{out} = 3V_{\phi}I_A \sin \varphi \quad (2.9)$$

Si se ignora la resistencia del inducido R_A , por ser ésta despreciable frente a la reactancia síncrona X_s , se consigue una formula muy práctica para aproximar la potencia de salida del generador:

$$P = \frac{3V_{\phi}E_A \sin \delta}{X_s} \quad (2.10)$$

$$Q = \frac{3V_{\phi}E_A \cos \delta - V_{\phi}^2}{X_S} \quad (2.11)$$

La potencia producida por el generador depende del ángulo δ , conocido como ángulo de par. Por lo tanto, la máxima potencia que puede suministrar la maquina ocurre cuando el angulo $\delta = 90^\circ$.

Esto indica el límite de estabilidad estática del generador. Cabe destacar que en máquinas reales este límite se suele encontrar entre 20° y 30° .

Un dato muy útil para conocer la eficiencia del generador, es calcular su rendimiento. De manera general, se define como

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad (2.12)$$

2.3.3.6. Regulación de tensión

Para comprender las características de operación de un generador síncrono, es preciso analizar el efecto de los cambios de carga cuando este opera solo. A continuación se presenta el comportamiento de los generadores en función de las cargas:

- Si se agregan cargas con factor de potencia en atraso al generador, V_{ϕ} y la tensión en los terminales decrecen.
- Si se agregan cargas con factor de potencia unidad, se presenta una ligera disminución en V_{ϕ} y en la tensión en los terminales.
- Si se agregan cargas con factor de potencia en adelanto, V_{ϕ} y la tensión en los terminales se incrementan.

Es posible comparar el comportamiento de dos generadores mediante su regulación de tensión. La regulación de tensión (VR) del generador se define como:

$$VR = \frac{V_n - V_\Phi}{V_\Phi} * 100\% \quad (2.13)$$

2.3.3.7. Curva de capacidad

El límite de calentamiento del rotor y del estator, junto con cualquier otro parámetro externo al generador, puede ser expresado de forma gráfica mediante un diagrama de capacidad.

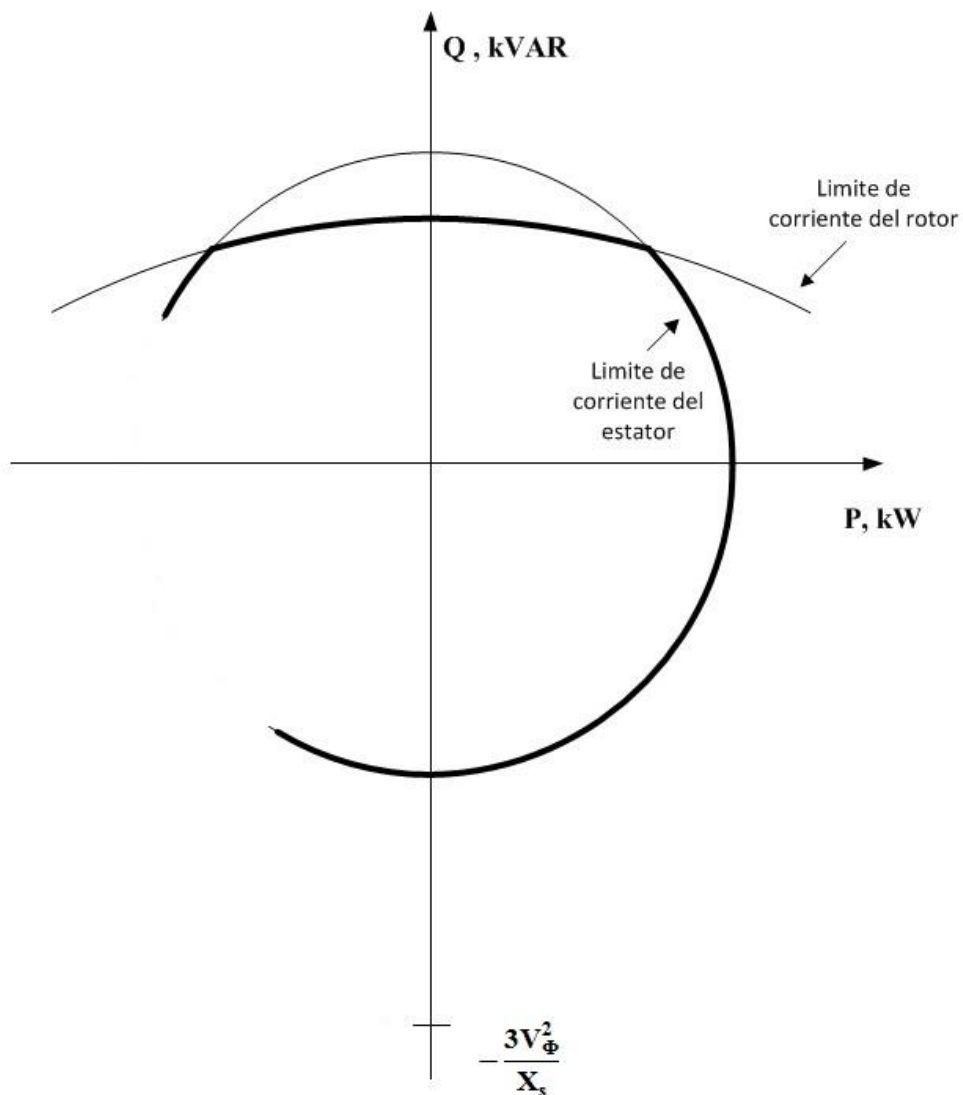


Figura 2.8. Curva de capacidad del generador síncrono

La curva de capacidad se realiza sobre un eje de referencia de P contra Q, en donde la potencia real P esta sobre el eje horizontal y la potencia reactiva Q esta sobre el eje vertical. Las líneas de corriente del inducido I_A constante se muestran como líneas de $S=3V_\Phi I_A$ las cuales son círculos concéntricos alrededor del origen. Las líneas de corriente del inductor constante corresponden a líneas de E_A constante, las cuales se muestran como círculos de magnitud $3E_A V_\Phi / X_s$ centrados en el punto Q

$$Q = -\frac{3V_\Phi^2}{X_s} \quad (2.14)$$

El límite de la corriente de inducido aparece como el círculo correspondiente a la corriente nominal I_A o kVA nominales y el límite de la corriente del inductor aparece como el círculo correspondiente a I_F o E_A nominales.

Cualquier punto situado entre ambos círculos es punto de operación segura para el generador.

2.3.4. Motor síncrono

Los motores síncronos son máquinas utilizadas para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica.

2.3.4.1. Circuito equivalente

Un motor síncrono es igual en todos los aspectos a un generador síncrono, excepto en que la dirección del flujo de potencia en la maquina es invertida. El circuito equivalente es exactamente igual al del generador, aunque la dirección de referencia de I_A esta invertida.

Debido a este cambio de dirección de I_A , la ecuación final que describe la tensión de salida de la maquina es:

$$V_\phi = E_A + jX_S I_A + R_A I_A \quad (2.15)$$

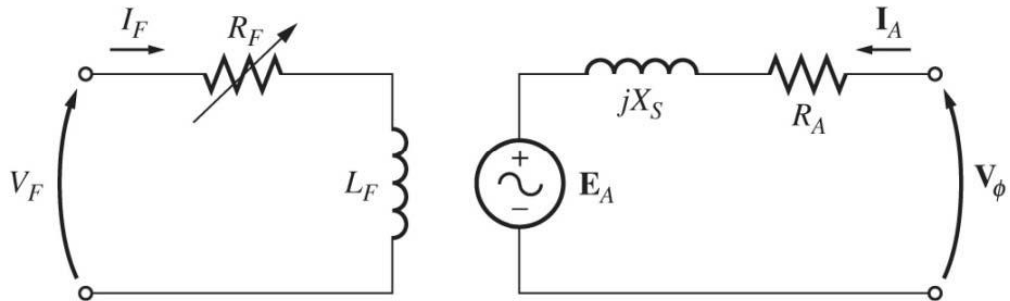


Figura 2.9. Circuito equivalente de un motor síncrono

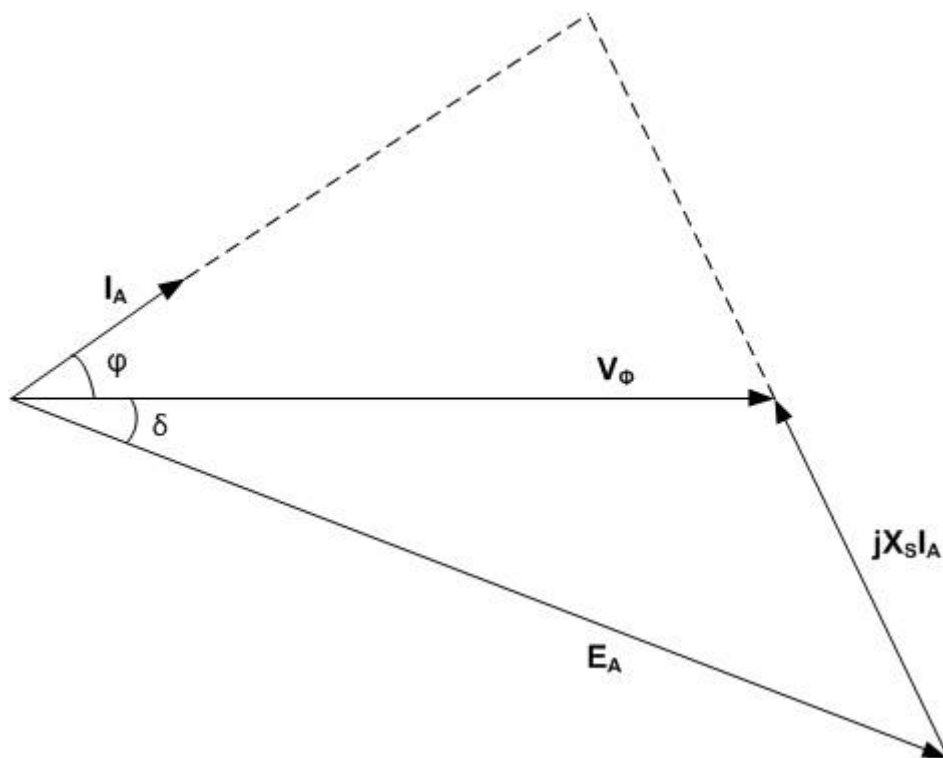


Figura 2.10. Circuito equivalente de un motor síncrono

2.3.4.2. Efecto de los cambios en la corriente de campo

Un incremento en la corriente de campo incrementa la magnitud de E_A , pero no afecta a la potencia real suministrada por el motor. La potencia suministrada cambia solo cuando varía el par de carga aplicado al eje. Por lo tanto un cambio de I_F no afecta a la velocidad del motor. Cuando se incrementa I_F , debe incrementarse E_A , pero esto solo puede hacerse cuando se desliza sobre la línea de potencia constante.

La figura (2.11) muestra un gráfico de I_A frente a I_F para un motor síncrono. Este gráfico toma el nombre de curva en V del motor síncrono, por su forma en V. En cada curva, la mínima corriente del inducido ocurre a factor de potencia unidad, cuando solo se suministra potencia real al motor. En cualquier otro punto de la curva, se está suministrando o consumiendo potencia reactiva.

- Para corrientes menores al valor mínimo dado por I_A , la corriente inducida está en atraso y consume Q. En este caso se dice que el motor está subexcitado. Figura (2.12).
- Para corrientes mayores al valor mínimo dado por I_A , la corriente inducida está en adelanto y suministra Q. En este caso se dice que el motor está sobreexcitado. Figura (2.13).

Por lo tanto, se llega a la siguiente conclusión, controlando la corriente de campo de un motor, puede controlarse la potencia reactiva suministrada o consumida por el sistema de potencia.

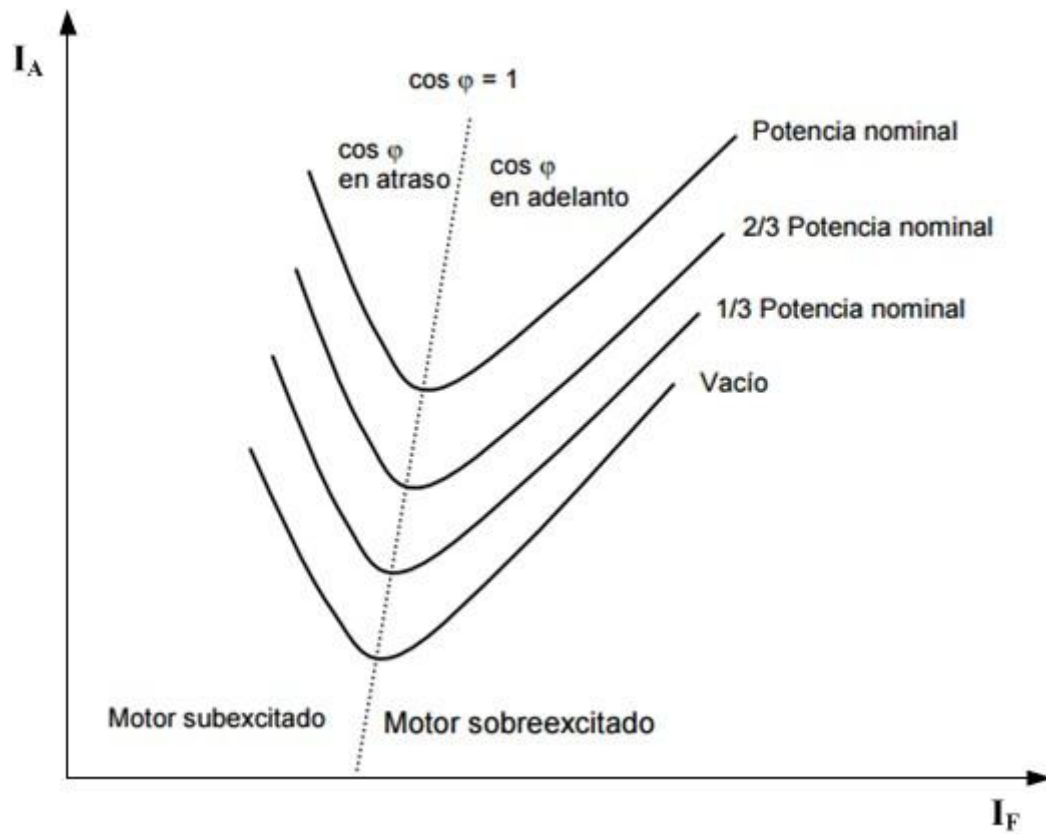


Figura 2.11. – Curva en V del motor síncrono.

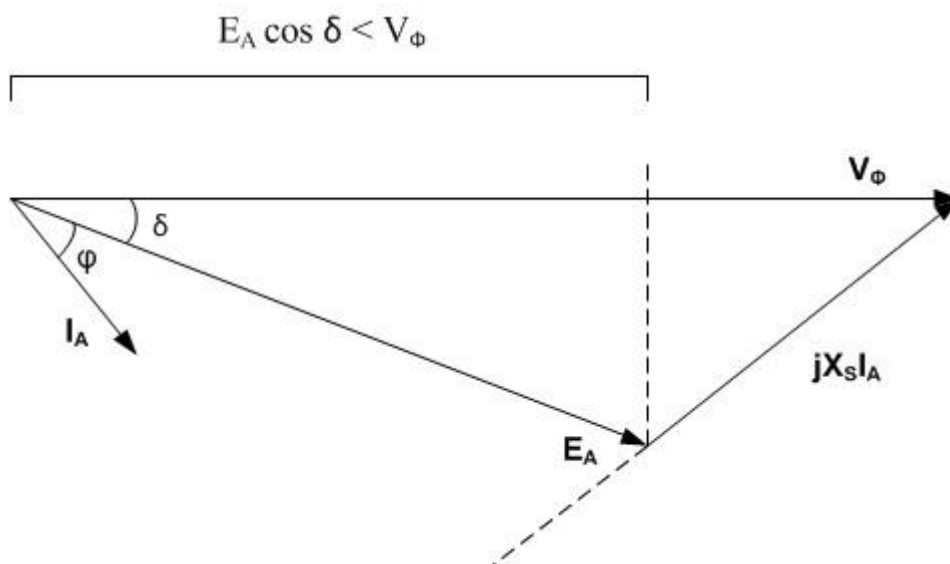


Figura 2.12. Diagrama fasorial de un motor síncrono subexcitado.

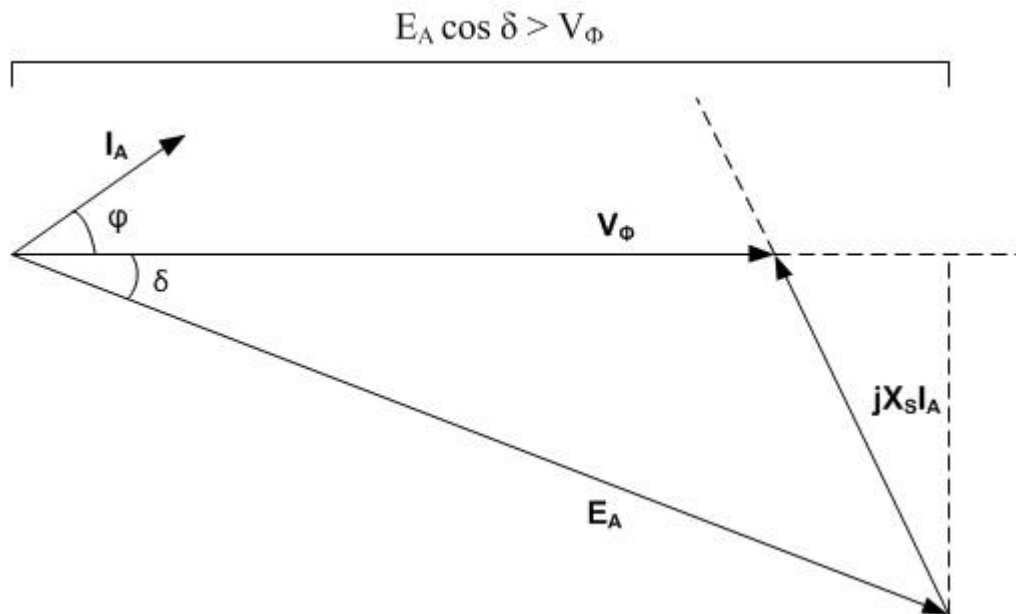


Figura 2.13. Diagrama fasorial de un motor síncrono sobreexcitado.

2.3.5. Generadores y motores síncronos

Un generador síncrono es una máquina que convierte potencia mecánica en potencia eléctrica, mientras que un motor síncrono, realiza la operación contraria. De hecho, son iguales.

Una maquina síncrona puede suministrar potencia real a un sistema o consumirla de este, y puede suministrar potencia reactiva al sistema o consumirla de este. Con lo que es posible obtener cuatro combinaciones de flujo de potencias reales y reactivas. En la figura (2.14) se muestra los diagramas fasoriales de estas cuatro combinaciones.

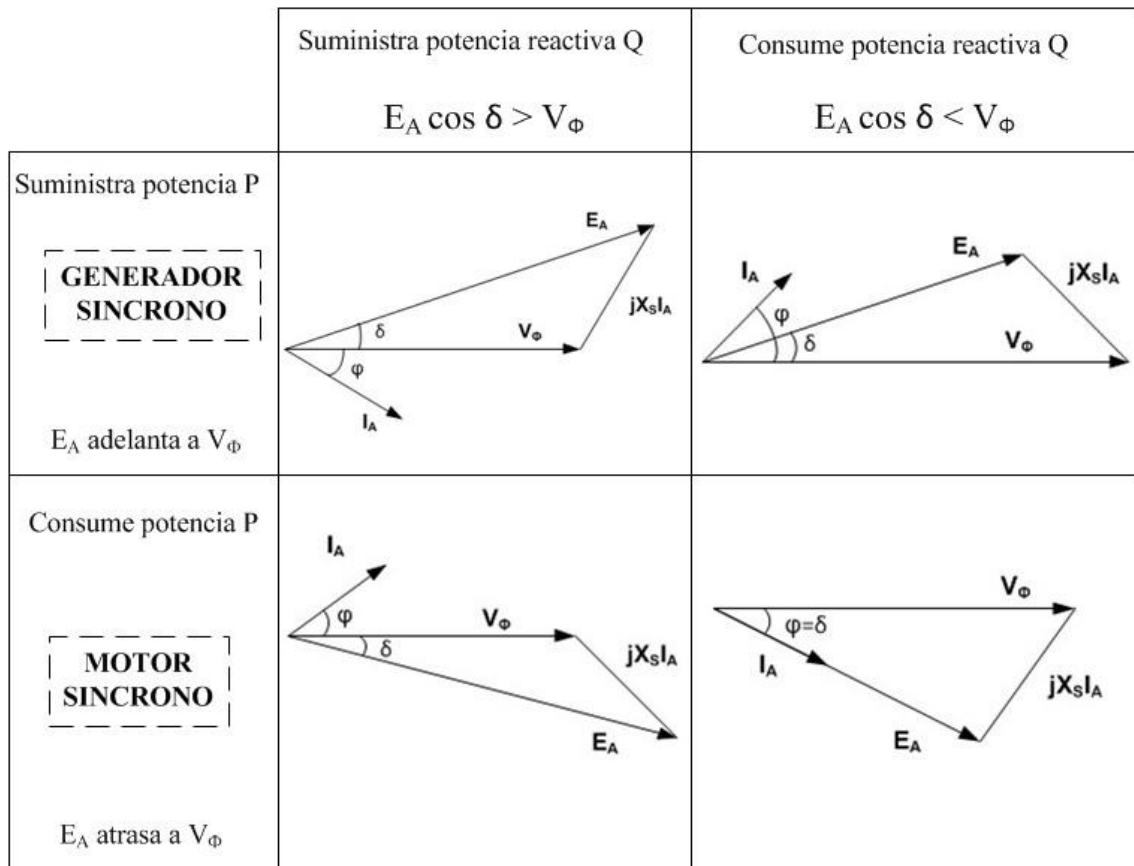


Figura 2.14. Diagramas fasoriales de generación y consumo de potencias por generadores y motores síncronos.

2.4. TRANSFORMADORES

2.4.1. Introducción

El transformador es una maquina estática, la cual funciona con corriente alterna, constituida por dos arrollamientos, primario y secundario, que permiten transformar una señal alterna en otra señal alterna de distinta tensión o intensidad manteniendo su potencia. La única conexión entre los dos arrollamientos es el flujo magnético común que se encuentra en el núcleo.

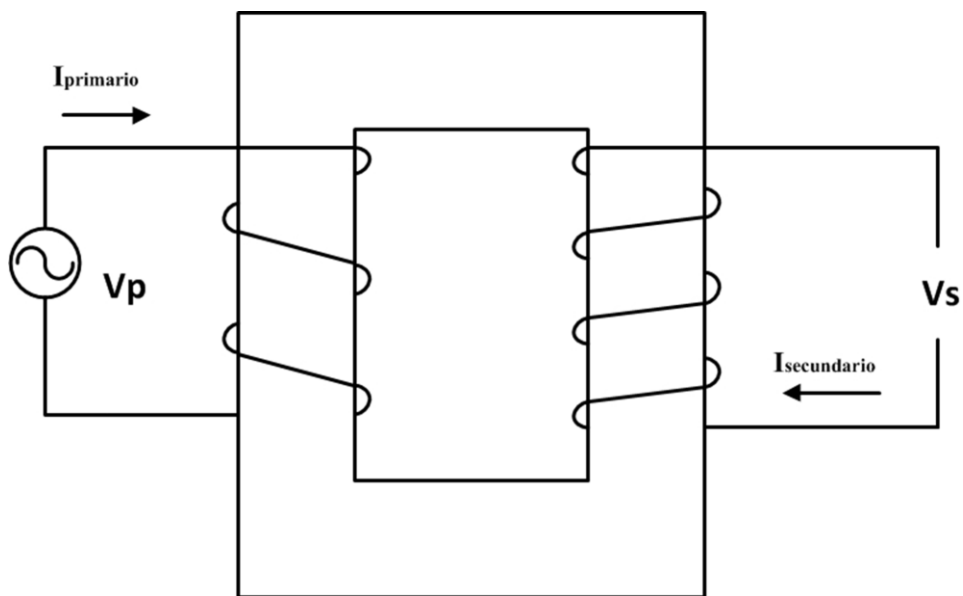


Figura 3.1. Núcleo del transformador

Un transformador es un dispositivo que:

- Transfiere energía eléctrica de un circuito a otro sin cambio de frecuencia.
- Su principio de funcionamiento se basa en los fenómenos de inducción y autoinducción electromagnética.

El transformador no tiene apenas pérdidas de rendimiento, haciendo de esta una máquina de gran utilidad.

El mantenimiento de un transformador es relativamente económico, ya que al no tener partes en movimiento, requiere de poca atención.

2.4.2. Aspectos constructivos

El transformador consta de un núcleo, que está constituido por chapas hechas de una aleación de Hierro y Silicio. Esta aleación reduce las pérdidas por histéresis y aumenta la resistividad del Hierro.

El circuito magnético está compuesto por las columnas, donde se montan los devanados y las culatas, que realizan la unión entre las columnas.

Según la posición relativa entre el núcleo y los devanados, los transformadores tienen dos tipos diferentes de construcción. El primero denominado tipo núcleo, que consta de una pieza de acero rectangular con los devanados enrollados sobre dos de los lados del rectángulo (figura 2.2a). El otro, denominado tipo acorazado, consta de un núcleo laminado de tres columnas, donde las bobinas están enrolladas en la columna central (figura 2.2b.)

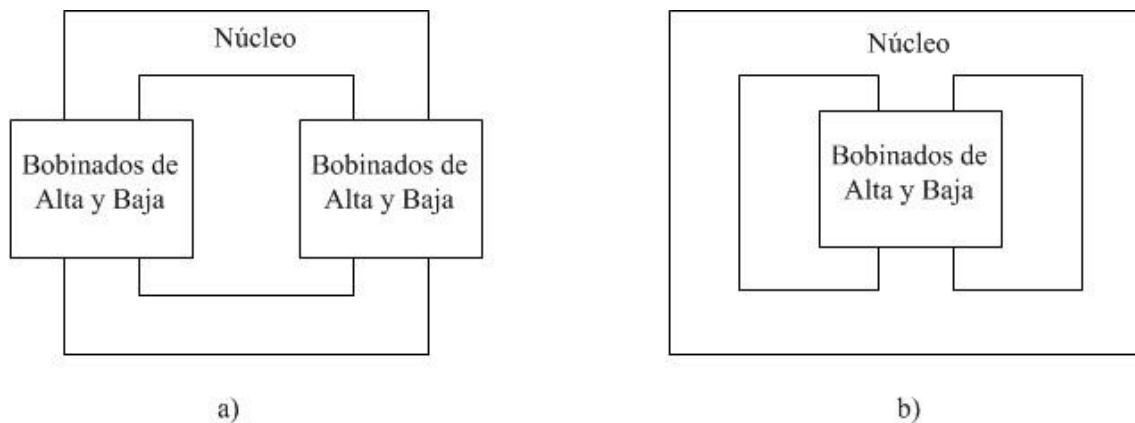


Figura 3.2. –Tipos de transformador en función de su construcción.

- a) tipo núcleo
- b) tipo acorazado

Los devanados se realizan por medio de conductores de cobre recubiertos por una capa de aislante, de sección redonda (para transformadores de pequeña potencia) o de sección rectangular (para transformadores de gran potencia). La relación de vueltas del

hilo de cobre entre el primario y el secundario nos indicara la relación de transformación.

Por definición allá donde apliquemos la tensión de entrada será el primario y donde obtengamos la tensión de salida será el secundario.

En el transformador existen una serie de pérdidas que se transforman en calor y que contribuyen al calentamiento de la máquina. Por lo que se hace necesario dotar de conductos de ventilación a los devanados y al núcleo. La refrigeración se puede conseguir de forma natural o forzada, se usan líquidos para ello, normalmente aceite, el cual además de actuar como refrigerante actúa de aislante.

Otro elemento que suelen llevar los transformadores de gran potencia es el llamado relé de gas o relé Buchholz, que protege a la máquina de sobrecargas peligrosas, fallos de asilamiento, etc.

2.4.3. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un transformador se puede explicar por medio del llamado transformador ideal monofásico, constituido por un núcleo magnético real de permeabilidad finita, que presenta pérdidas en el hierro P_{Fe} y unos arrollamientos primario y secundario con número de espiras N_1 y N_2 , respectivamente.

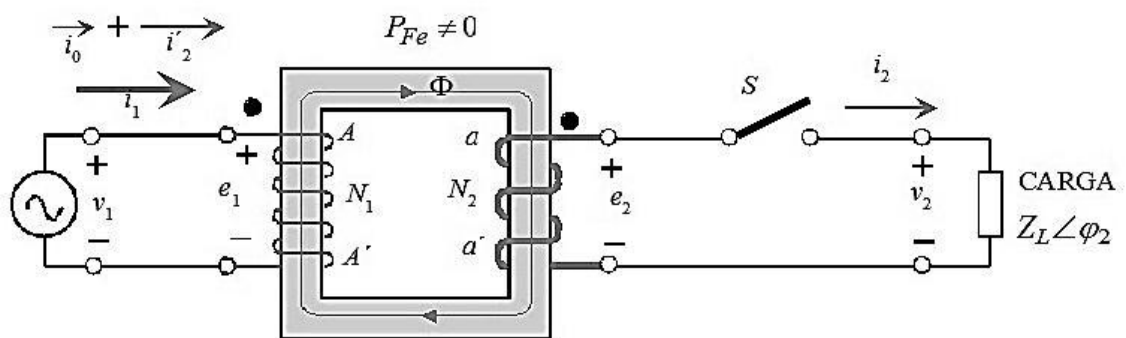


Figura 3.3. –Núcleo del transformador

El primario constituye un receptor respecto a la fuente de alimentación, lo que significa que este devanado absorbe una corriente y una potencia y desarrolla una f.c.e.m. (fuerza contraelectromotriz).

El secundario se comporta como un generador respecto a la carga conectada en sus bornes, suministrando una corriente y una potencia.

En el transformador supondremos unas condiciones ideales, por lo cual se despreciaran las resistencias óhmicas de los devanados, como también los flujos de dispersión.

Aplicando una tensión v_1 al primario, circulara un flujo alterna, que debido a su variación periódica se crearan f.e.m.s. inducidas en los arrollamientos y teniendo en cuenta que los devanados son ideales, mediante la 2º ley de Kirchoff y de acuerdo con la ley de Faraday estos responderán a las ecuaciones:

$$v_1 = e_1 = N_1 * \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \quad v_2 = e_2 = N_2 * \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

Partiendo de un flujo senoidal, Las tensiones y f.e.m.s van adelantadas 90º respecto al flujo, siendo sus valores eficaces:

$$V_1 = E_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \Phi_m \quad (3.2)$$

$$V_2 = E_2 = \frac{N_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_2 \Phi_m \quad (3.3)$$

De este modo, se tiene;

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (3.4)$$

Donde el factor m se denomina relación de transformación. En un transformador ideal la relación de tensiones coincide con la relación de espiras, que es en definitiva la relación de transformación.

La relación entre la corriente que fluye por el primario del transformador y la corriente que sale del transformador por el secundario es:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{m} \quad (3.5)$$

En los transformadores reales hay que tener en cuenta que en los arrollamientos existen flujos de dispersión y resistencias. La aparición de resistencia es inherente a la constitución de los devanados con hilo conductor.

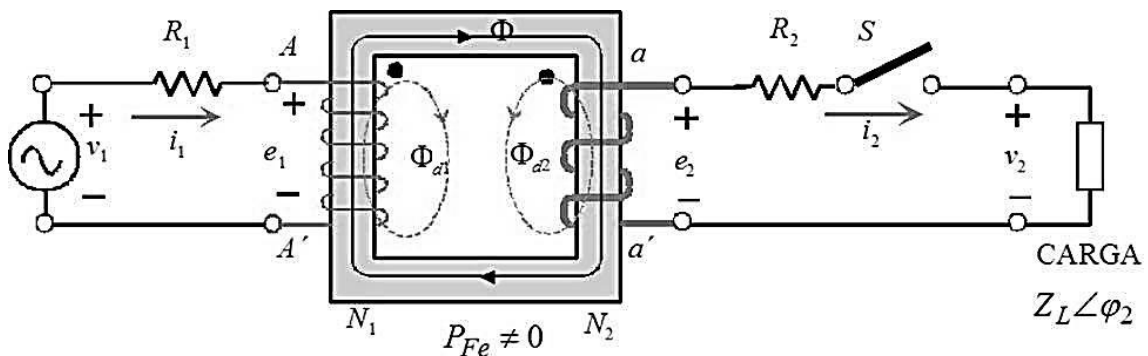


Figura 3.4. Núcleo del transformador

Existe un flujo común a ambos y unos flujos de dispersión propios de cada devanado.

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{a1} \quad ; \quad \Phi_2 = \Phi + \Phi_{a2} \quad (3.6)$$

A primera vista la introducción de los flujos de dispersión complica el estudio de esta máquina. Sin embargo, si se añaden en serie a cada arrollamiento unas bobinas con

el mismo número de espiras que los devanados, dando lugar a los mismo flujos de dispersión que en los bobinados reales.

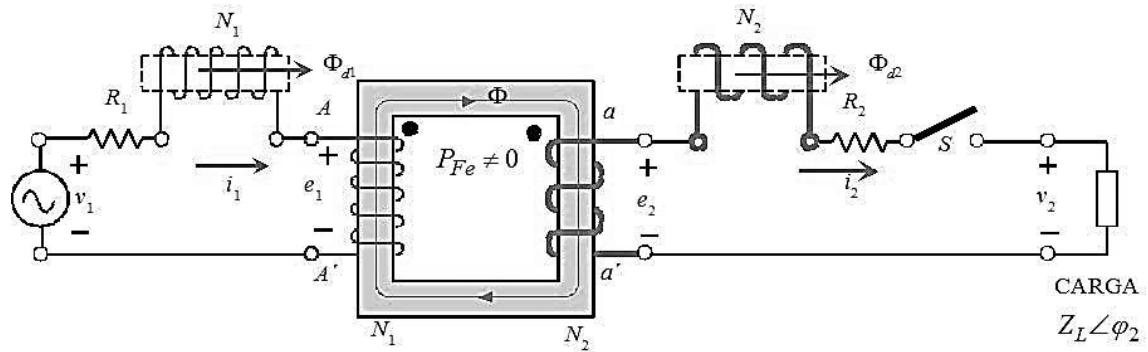


Figura 3.5. Núcleo del transformador

Aplicando la 2ª ley de Kirchhoff a los circuitos primario y secundario, se tiene las siguientes ecuaciones expresadas de forma compleja:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 \quad (3.7)$$

$$V_2 = E_2 + R_2 I_2 + jX_2 I_2 \quad (3.8)$$

Teniendo en cuenta estas ecuaciones, en el transformador real deja de cumplirse la igualdad entre la f.e.m.s. y tensiones que aparecían en el transformador ideal. En los transformadores reales las caídas de tensión a plena carga son del orden de 1 al 10 % de las tensiones asignadas, por lo cual:

$$\begin{aligned} V_1 &\approx E_1 \\ V_2 &\approx E_2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

2.4.4. Circuito equivalente

Con el fin de facilitar los cálculos de los diferentes parámetros del transformador, se suele recurrir a su sustitución por un circuito equivalente que incorpora todos los fenómenos físicos que se producen en un transformador.

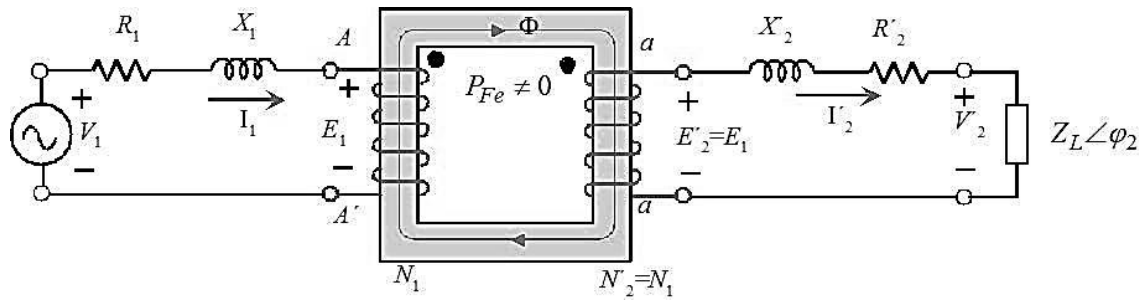


Figura 3.6. Núcleo del transformador

La obtención del circuito equivalente se inicia reduciendo ambos devanados al mismo número de espiras. En el transformador real se tiene:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \rightarrow E_2 = \frac{E_1}{m} \quad (3.10)$$

Y en el transformador equivalente, donde $N'_2 = N_1$, se tiene:

$$\frac{E_1}{E'_2} = \frac{N_1}{N'_2} = 1 \rightarrow [E'_2 = m * E_2] \quad (3.11)$$

Análogamente se obtiene:

$$[V'_2 = m * V_2] \quad (3.12)$$

Las potencias activa y reactiva, y en consecuencia la potencia aparente, deben conservarse, o lo que es lo mismo, a partir de cada potencia se obtienen los siguientes parámetros:

$$\text{De la potencia aparente} \rightarrow \left[I_2' = \frac{I_2}{m} \right] \quad (3.13)$$

$$\text{De la potencia activa} \rightarrow [R_2' = m^2 * R_2] \quad (3.14)$$

$$\text{De la potencia reactiva} \rightarrow [X_2' = m^2 * X_2] \quad (3.15)$$

Por lo que se puede sustituir el circuito anterior por otro donde se sustituyen ambos devanados por uno solo.

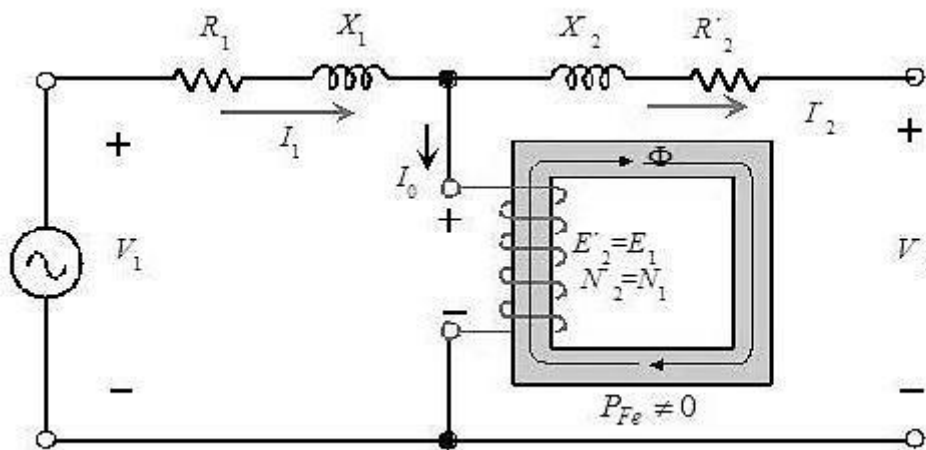


Figura 3.7. Núcleo del transformador

La corriente que circula por el devanado será la diferencia entre I_1 y I_2' que es igual a la corriente de vacío, I_0 . Esta corriente a su vez tiene dos componentes, una activa I_{Fe} y otra reactiva I_{μ} , que representan un circuito paralelo formado por una resistencia R_{Fe} y por una reactancia X_{μ} . De acuerdo con estos razonamientos, el circuito de la figura (3.7) se transforma en el circuito de la figura (3.8) que se conoce como el circuito equivalente exacto del transformador reducido al primario.

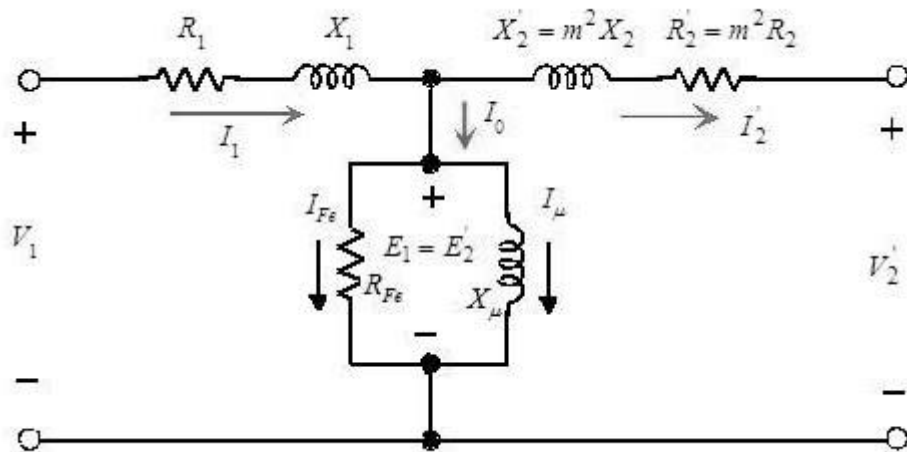


Figura 3.8. Núcleo del transformador

Si se sigue el mismo proceso dejando inalterado el secundario y tomando el número de espiras del primera $N'_1=N_2$ se obtiene el circuito equivalente del transformador exacto reducido al secundario.

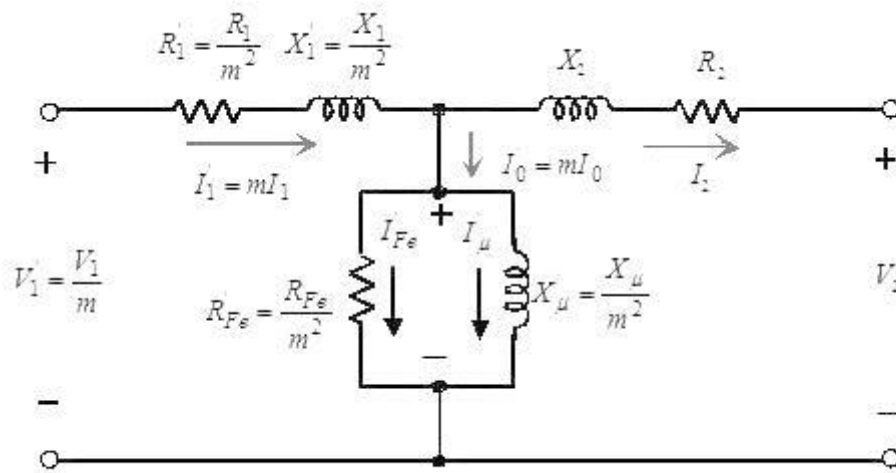


Figura 3.9. Núcleo del transformador

En la práctica, debido al pequeño valor de I_0 frente a las corrientes I_1 y I'_2 , se emplea el circuito equivalente aproximado del transformador. Este circuito se obtiene trasladando la rama en paralelo por la que circula la corriente de vacío a los bornes de entrada del primario.

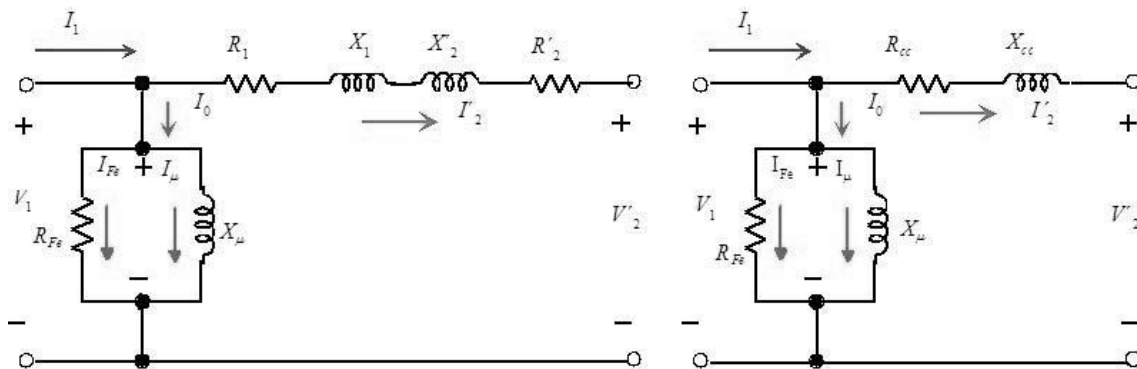


Figura 3.10. Núcleo del transformador

El esquema puede simplificarse aún más, agrupando los elementos en serie, por lo que:

$$\text{Resistencia de cortocircuito} \rightarrow [R_{cc} = R_1 + R_2'] \quad (3.16)$$

$$\text{Reactancia de cortocircuito} \rightarrow [X_{cc} = X_1 + X_2'] \quad (3.17)$$

2.4.5. Ensayos del transformador

Los ensayos de un transformador se realizan para verificar el comportamiento de la máquina. En la práctica resulta difícil realizar ensayos reales directos, debido a la gran cantidad de energía y de cargas que se necesitarían para realizar los ensayos. No obstante, bajo cualquier condición de trabajo, se puede predecir con suficiente exactitud si se conoce los parámetros del circuito equivalente.

Los dos ensayos fundamentales que se utilizan en la práctica para poder determinar los parámetros del circuito equivalente de un transformador son:

- Ensayo de vacío
- Ensayo de cortocircuito

2.4.5.1. Ensayo de vacío

Este ensayo consiste en aplicar al primario del transformador la tensión asignada, estando el secundario en circuito abierto. Se mide la potencia P_0 , la corriente de vacío I_0 y la tensión del secundario.

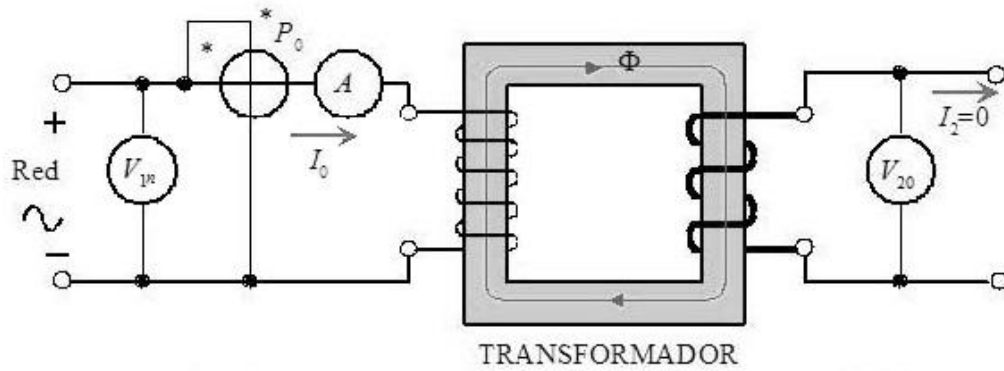


Figura 3.11. Núcleo del transformador

La potencia absorbida en vacío coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro.

$$P_0 = V_{1n} * I_0 * \cos\phi_0 = P_{Fe} \quad (3.18)$$

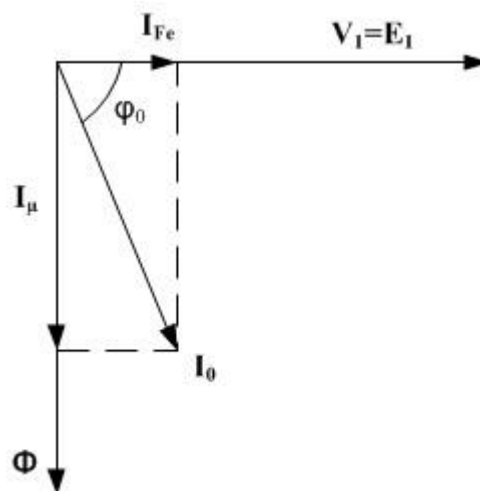


Figura 3.12. Núcleo del transformador

Por otra parte, debido al pequeño valor de la caída de tensión primaria, se puede considerar esta igualdad; $V_{1n} = E_1$, y teniendo en cuenta el diagrama vectorial de vacío de la figura (3.12), se puede obtener los valores de los parámetros R_{Fe} y X_μ :

$$R_{Fe} = \frac{V_1}{I_{Fe}} = \frac{V_1}{I_0 * \cos\varphi_0} \quad (3.19)$$

$$X_\mu = \frac{V_1}{I_\mu} = \frac{V_1}{I_0 * \sen\varphi_0} \quad (3.20)$$

El ensayo de vacío permite determinar las pérdidas en el hierro y los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente del mismo. Además se puede obtener la relación de transformación:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_{1n}}{V_{20}} \quad (3.21)$$

2.4.5.2. Ensayo de cortocircuito

En este ensayo se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al primario una tensión que se eleva hasta que circula la corriente asignada.

La tensión aplicada es pequeña, por lo que el flujo en el núcleo es pequeño y por tanto se desprecian las pérdidas en el hierro.

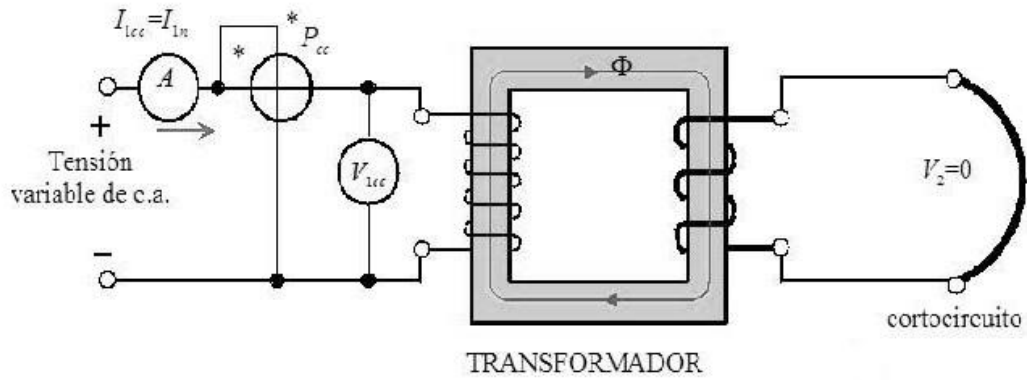


Figura 3.13. Núcleo del transformador

La potencia absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre.

$$P_{cc} = V_{1cc} * I_{1n} * \cos\varphi_{cc} \quad (3.22)$$

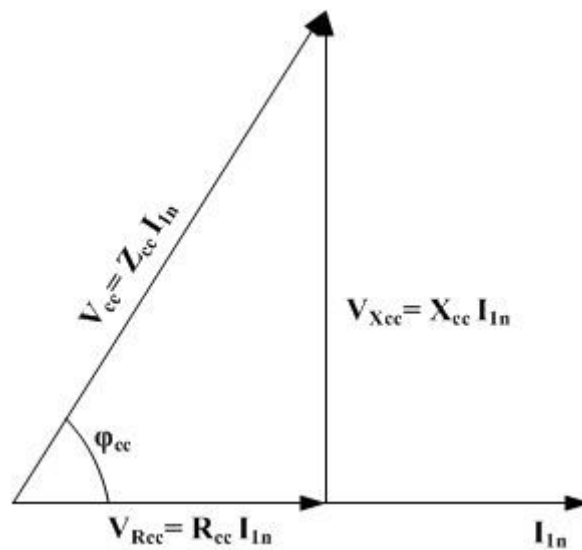


Figura 3.14. Núcleo del transformador

El ensayo de cortocircuito permite obtener los parámetros de la rama serie del circuito equivalente, así como la impedancia total del transformador.

$$R_{cc} = R_1 + R_2' \quad ; \quad X_{cc} = X_1 + X_2' \quad (3.23)$$

Debido a que no se brinda información de cómo están distribuidos estos valores totales entre el primario y el secundario, es preciso aplicar corriente continua a cada uno de los devanados y obtener las resistencias R_1 y R_2 aplicando la ley de Ohm, por el contrario no existe procedimiento para separar X_1 de X_2' , por lo que es frecuente recurrir a una solución aproximada:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{cc}}{2} \quad ; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_{cc}}{2} \quad (3.24)$$

2.4.6. Regulación de tensión

Para determinar la regulación de tensión en un transformador, es necesario entender las caídas de tensión dentro de él. La regulación de tensión a plena carga es una cantidad que compara la tensión del transformador sin carga con la tensión de salida del transformador a plena carga.

Al trabajar con el circuito equivalente reducido al primario, se tiene:

$$\varepsilon = \frac{V_{1n} - V_2'}{V_{1n}} * 100 \quad (3.25)$$

2.4.7. Rendimiento del transformador

En general el rendimiento de una máquina, normalmente indicado con la letra griega η , está dado por el cociente entre las potencias de salida y las potencias de entrada:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.26)$$

Como en el caso del transformador el circuito equivalente es un modelo que se aproxima mucho a la realidad y sus parámetros se pueden determinar con facilidad y exactitud, aún en unidades de gran potencia, es preferible determinar el rendimiento a partir del mismo, que es la forma indicada en las normas y por lo tanto se denomina “convencional”.

El rendimiento se puede expresar como:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{perdidas}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_{Fe}} \quad (3.27)$$

Donde;

P_2 = Potencia útil del transformador

P_1 = Potencia absorbida por el transformador

P_{cu} = Perdidas variables, que cambian según sea el régimen de carga, debidas a las perdidas en el cobre

P_{Fe} = Perdidas fijas, se componen de las perdidas mecánicas y las perdidas en el hierro

2.4.8. Perdidas en el transformador

1.- Perdidas en el cobre. Son perdidas por calentamiento resistivo en los devanados primario y secundario del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la corriente de los devanados.

2.- Perdidas por corrientes parasitas. Perdidas por calentamiento resistivo en el núcleo del transformador. Son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador.

3.- Perdidas por histéresis. Están relacionadas con los reordenamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada semiciclo. Son una función compleja no lineal del voltaje aplicado al transformador.

4.- Flujo disperso. Los flujos LP Y LS que escapan del núcleo que pasan únicamente a través de uno de los devanados del transformador son flujos dispersos. Esta fuga de flujos produce una autoinductancia en las bobinas primaria y secundaria, y sus efectos deben tenerse en cuenta.

2.4.9. Transformador trifásico

La mayoría de los sistemas de distribución y de potencia en el mundo actual, son sistemas trifásicos de corriente alterna. En condiciones de construcción se pueden realizar dos tipos de transformadores trifásicos. El primero es emplear tres transformadores monofásicos en cada una de las tres fases; o bien, construir uno con tres devanados enrollados sobre un núcleo común. Cabe mencionar que esta última es más eficiente.

Hay cuatro maneras de conectar un transformador trifásico:

- 1.- conexión triángulo-triángulo (Δ - Δ)
- 2.- conexión estrella-estrella (Y-Y)
- 3.- conexión triángulo-estrella (Δ -Y)
- 4.-conexión estrella-triángulo (Y- Δ)

La forma de analizar un conjunto trifásico es mirar cada transformador por separado, cada transformador se comporta exactamente como un transformador monofásico.

Condiciones de conexión en un conjunto de transformadores monofásicos:

- a) que los transformadores tengan la misma capacidad de kVA (que sean semejantes).
- b) que las tensiones primarias y secundarias sean iguales.
- c) que sus marcas de polaridad sean idénticas.

También podemos considerar que los transformadores usados sean del mismo fabricante.

2.4.10. Índice horario

Dependiendo del tipo de conexión, entre las tensiones simples del primario y del secundario, pueden aparecer entre las tensiones simples respectivas unas determinadas diferencias de fase. Para indicar el desfase existente entre las tensiones simples, se suele utilizar el llamado índice horario (ángulo formado por la aguja grande y la pequeña de un reloj cuando marca una hora exacta), expresado en múltiplos de 30° (ángulo entre dos horas consecutivas, $360^\circ/12=30^\circ$).

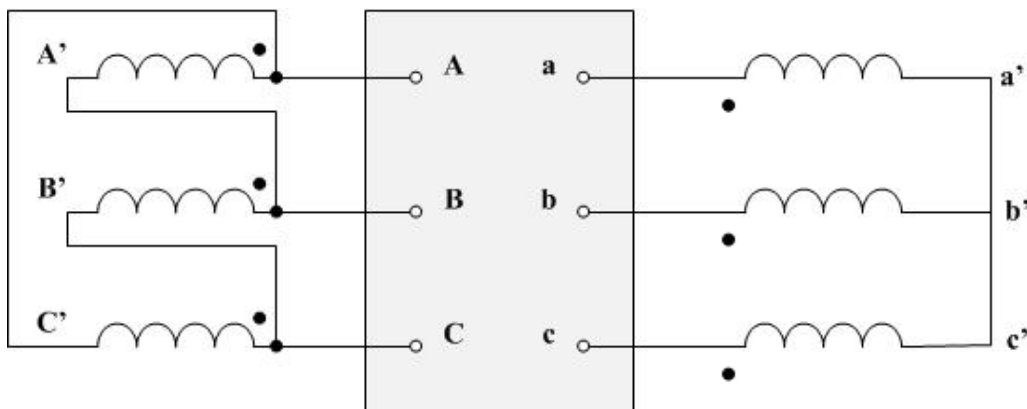


Figura 3.15. –Núcleo del transformador

El proceso a seguir para determinar el índice horario es el siguiente:

1. Se representan las f.e.m.s. simples del devanado primario, de tal forma que el terminal A se sitúa en la parte superior.

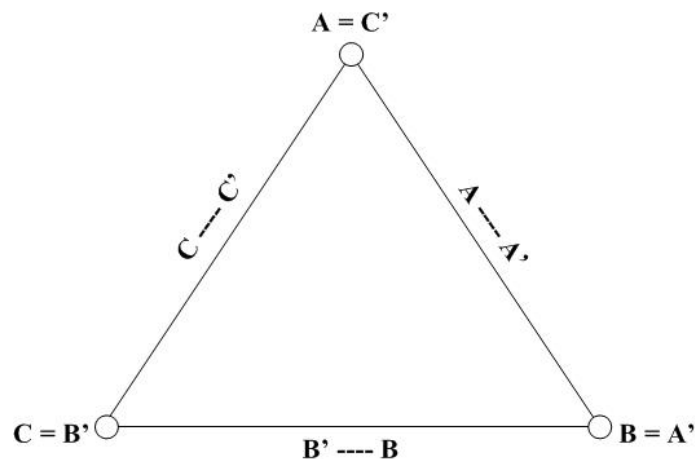


Figura 3.16. –Núcleo del transformador

2. Se representan las f.e.m.s. simples secundarias, hay que tener en cuenta que los devanados primario y secundario situados en la misma columna producen f.e.m.s. en fase (para los bornes homólogos).

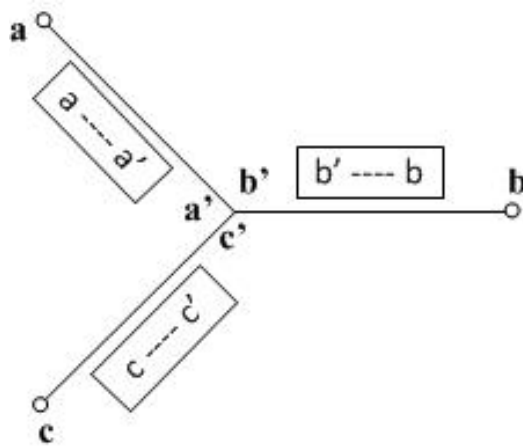


Figura 3.17. –Núcleo del transformador

3. Se superponen ambos diagramas. El ángulo horario es el que forman dos vectores, uno que pasa por el punto A y el centro del diagrama y otro el que pasa por a y ese mismo centro.

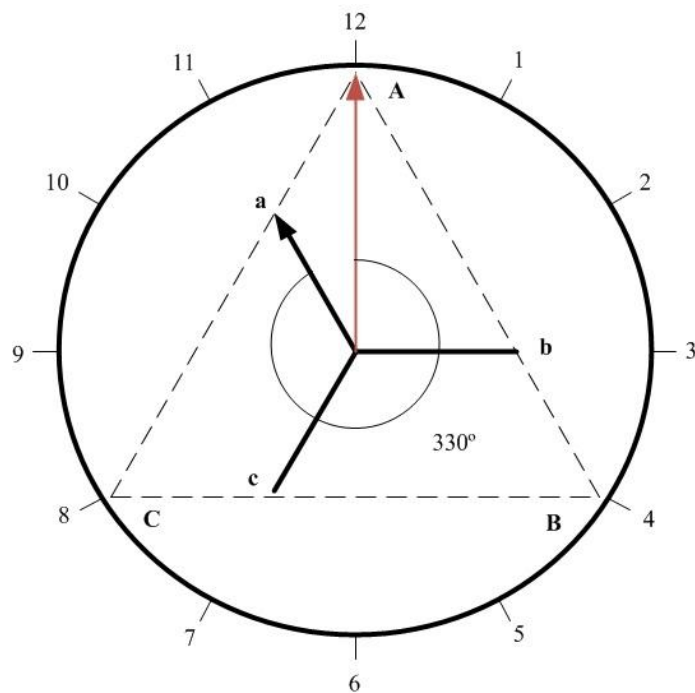


Figura 3.18. –Núcleo del transformador

El conocimiento del desfase (índice horario) es muy importante cuando se han de conectar transformadores en paralelo, dado que entonces, todos los transformadores deben tener el mismo índice horario, para evitar que puedan producirse corrientes de circulación entre los transformadores cuando se realice la conexión.

2.5. MAQUINAS ASINCRONAS

2.5.1. Introducción

Las maquinas asíncronas deben su nombre a que la velocidad de giro del rotor de estas máquinas no es la velocidad de sincronismo impuesta por la frecuencia de la red.

El principio de funcionamiento de las maquinas asíncronas se basa en el concepto de campo magnético giratorio. La principal diferencia entre la maquina asíncrona y los demás tipos de máquinas se debe a que no existen corrientes conducida a uno de los arrollamientos. La corriente que circula por uno de los devanados se debe a la f.e.m. inducida por la acción del flujo del otro devanado, por este motivo se denominan “máquinas de inducción”.

La característica distintiva de este tipo de motores es que no necesita corriente de campo continua para que esta funcione.

Aunque las maquinas asíncronas pueden trabajar tanto como motor o generador, tienen muchas desventajas como generadores y no se suelen utilizar como tal. Por esta razón, las máquinas asíncronas se refieren a los motores de inducción.

El motor asíncrono trifásico es hoy el motor usual de accionamiento en todas las redes de distribución.

2.5.2. Aspectos constructivos

La máquina asíncrona o de inducción está compuesta por un rotor y un estator. En el estator se coloca el inductor, alimentado por una red monofásica o trifásica. El rotor es el inducido, las corrientes que circulan por el rotor aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estator.

Existen dos tipos de rotores que pueden disponerse dentro del estator del motor de inducción.

- Rotor de jaula de ardilla; el bobinado esta constituidos por barras que se vacían sobre el rotor destinado para este fin; por lo general, las barras son de aluminio y al fundirse en el rotor, debido a la forma que se les da, quedan unidas entre sí en cortocircuito.

- Rotor devanado o con anillos; Está formado por paquetes de láminas troqueladas, montadas sobre el eje. Las bobinas se devanada sobre las ranuras y su arreglo depende del números de polos (el mismo que el estator) y de fases.

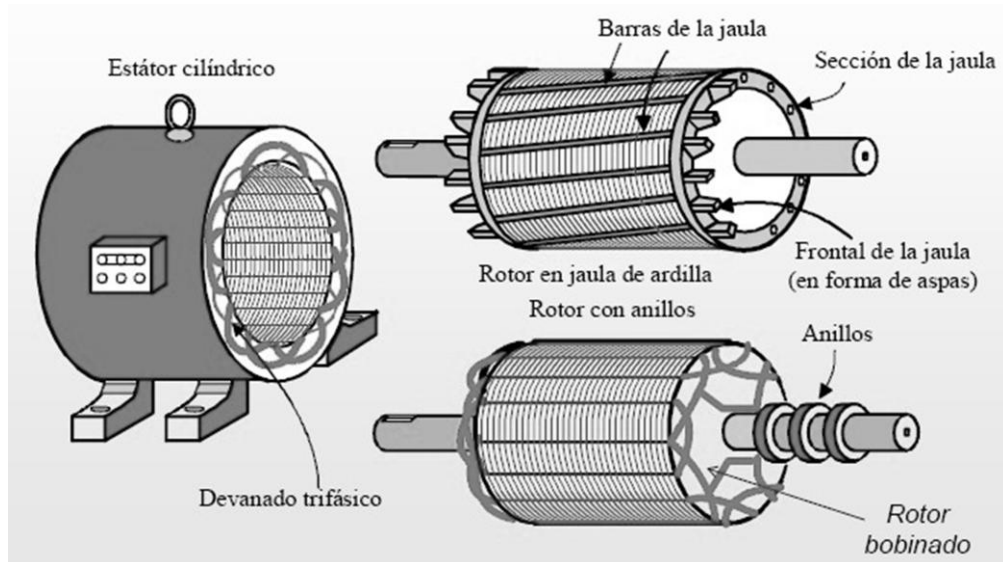


Figura 4.1. Tipos de rotor

Debido al desgaste de sus escobillas y a sus anillos rozantes, los motores de rotor devanado son poco utilizados.

2.5.3. Principio de funcionamiento

El devanado del estator está constituido por tres arrollamientos desfasados 120° en el espacio y 2 pares de polos, al introducir por ellos corrientes de una red trifásica de frecuencia f_e que produce un campo magnético el cual produce un flujo giratorio cuya velocidad se denomina velocidad de sincronismo y viene expresada por:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P} \quad (4.1)$$

2.5.3.1. Concepto de deslizamiento del rotor

La tensión en una barra del rotor depende de la velocidad de este con respecto a los campos magnéticos. Visto que el comportamiento de un motor de inducción depende de la tensión y la intensidad del rotor, es más acertado hablar de su velocidad relativa. Este concepto se puede definir mediante dos términos, uno de ellos es la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor, conocido como velocidad de deslizamiento:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad (4.2)$$

El otro término utilizado para describir el movimiento relativo entre el rotor y los campos magnéticos es el deslizamiento. El deslizamiento está definido como:

$$s = \frac{n_{des}}{n_{sinc}} \times 100 = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \times 100 \quad (4.3)$$

Esta ecuación de deslizamiento es posible expresarla también en términos de velocidad angular ω .

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} \times 100 \quad (4.4)$$

Es posible expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en términos de la velocidad síncrona y el deslizamiento. Resolviendo las ecuaciones (4.3) y (4.4) para la velocidad mecánica se obtiene:

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad (4.5)$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc} \quad (4.6)$$

2.5.3.2. Frecuencia eléctrica en el rotor

La frecuencia del rotor es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad del campo magnético n_{sinc} y la velocidad del rotor n_m . La frecuencia del rotor puede ser expresada como

$$f_r = s f_e \quad (4.7)$$

Una forma alternativa bastante común para expresar la frecuencia del rotor viene dada de la sustitución de la ecuación (4.3) del deslizamiento en la ecuación (4.7) y sustituyendo el termino del denominador por la ecuación (4.1). Es decir, la ecuación resultante sería

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{sinc} - n_m) \quad (4.8)$$

2.5.3.3. Fuerza electromotriz inducida por fase

El flujo en la maquina está relacionado con la integral de la tensión aplicada E_1 , que hace referencia a la tensión primaria interna del estator. Esta tensión esta acoplada al secundario E_2 , producida por el rotor que ocasiona a su vez un flujo de corriente en el circuito del rotor.

La expresión de valor eficaz de la f.e.m. inducida por fase tanto en el estator como en el rotor viene definida por la siguiente expresión:

$$E = 4.44 K f N \Phi_m \quad (4.9)$$

Donde;

K =factor de devanado

f = frecuencia

N = número de espiras por fase

Φ_m = Flujo máximo

Por lo que el valor eficaz de la f.e.m. inducida por fase para el estator y para el rotor, estando este parado, sería:

$$E_1 = 4.44K_1f_eN_1\Phi_m \text{ (estator)} \quad (4.10)$$

$$E_{R0} = 4.44K_Rf_eN_R\Phi_m \text{ (rotor)} \quad (4.11)$$

Cuando el rotor gira el deslizamiento ya no es la unidad, por lo que la frecuencia del estator es diferente a la del rotor, y se genera una f.e.m. diferente en el rotor:

$$E_R = 4.44K_Rf_rN_R\Phi_m \quad (4.12)$$

$$E_R = sE_{R0} \quad (4.13)$$

2.5.4. Circuito equivalente

Un motor de inducción depende de la inducción de tensiones y corrientes en su circuito del rotor desde el circuito del estator, esta transferencia de energía que se produce en el motor de inducción por inducción electromagnética es similar al que se obtiene entre el primario y el secundario de un transformador, el estator correspondería al primario y el rotor al secundario.

Es posible deducir un circuito equivalente de un motor de inducción a partir del conocimiento de los transformadores y la variación de frecuencia del rotor con la velocidad en los motores de inducción. En la figura (4.2) se muestra el modelo de un transformador de inducción con el rotor y el estator conectado por un transformador ideal de relación de vueltas a_{eff} .

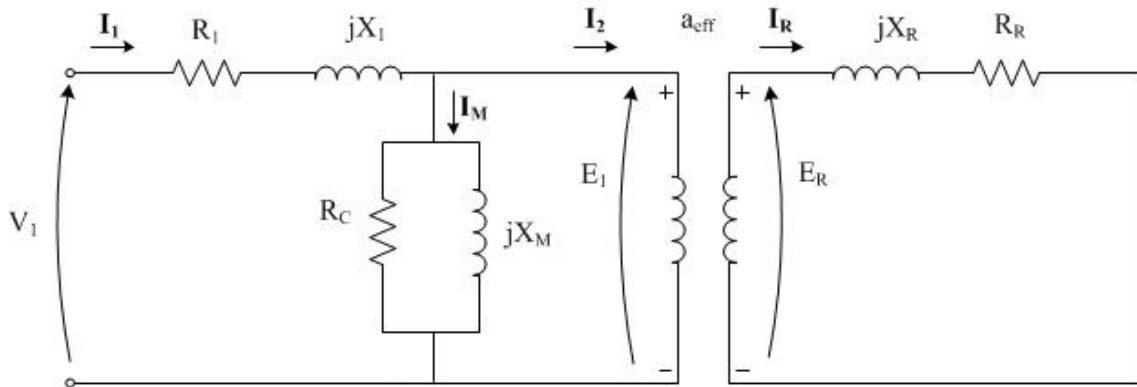


Figura 4.2. Modelo transformador de un motor de inducción.

Para establecer las ecuaciones de comportamiento eléctrico del estator y del rotor, se tendrá en cuenta que los arrollamientos poseen unas resistencias por fase (R_1 y R_R) y que existen flujos dispersos en los devanados del estator y del rotor que dan unas autoinducciones (L_1 y L_R). En consecuencia las reactancias de los arrollamientos en reposo ($f_e = f_r$) serán:

$$X_1 = L_1 2\pi f_e \quad (4.14)$$

$$X_{R0} = L_R 2\pi f_e \quad (4.15)$$

Sin embargo, al girar el rotor este posee una frecuencia distinta y su reactancia vienen definida como;

$$X_R = L_R 2\pi f_r \quad (4.16)$$

Sustituyendo la ecuación (4.7) en la ecuación (4.16), se obtendrá:

$$X_R = s(L_R 2\pi f_e) = sX_{R0} \quad (4.17)$$

Donde X_{R0} es la reactancia del rotor en estado bloqueado.

En el circuito de la figura (4.2), la corriente que circula por el rotor, será:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \quad (4.18)$$

Y teniendo en cuenta las igualdades expresadas en las ecuaciones (4.13) y (4.17), esta ecuación se convierte en:

$$I_2 = \frac{sE_{R0}}{R_R + jsX_{R0}} = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (4.19)$$

En un transformador normal las tensiones, intensidades e impedancias del lado secundario pueden ser referidas al lado primario mediante la relación de vueltas del transformador, se puede hacer la misma clase de transformación para el circuito del rotor del motor de inducción, siendo la relación efectiva de vueltas de un motor de inducción a_{eff} , la tensión transformada del rotor es:

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0} \quad (4.20)$$

La corriente rotórica es:

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (4.21)$$

Y la impedancia rotórica es:

$$Z_2 = a_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (4.22)$$

Se puede definir también la resistencia y la reactancia:

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R \quad (4.23)$$

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0} \quad (4.24)$$

Por lo tanto el circuito equivalente final por fase del motor de inducción corresponde al de la figura (4.3).

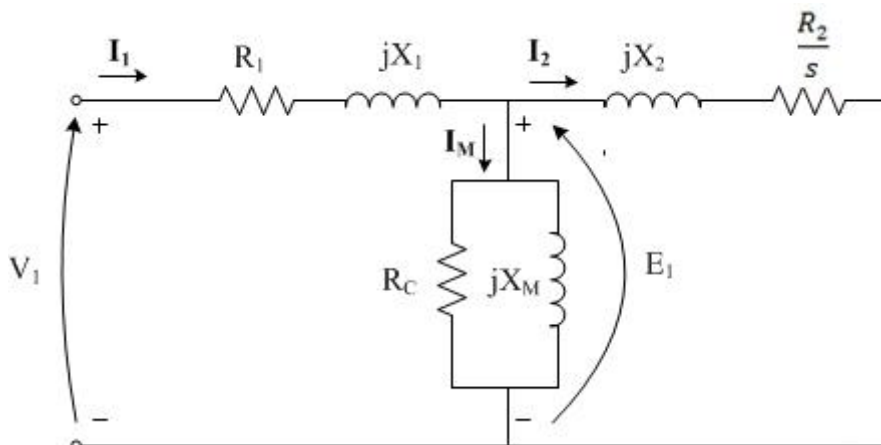


Figura 4.3. – Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.

La resistencia rotórica R_R y la reactancia del rotor en estado bloqueado X_{R0} son muy difíciles de determinar de manera directa, así mismo, también es difícil determinar las vueltas efectivas a_{eff} en el rotor. Sin embargo es posible hacer mediciones que darán directamente los valores referidos de resistencia R_2 y de reactancia X_2 , a pesar de no conocer R_R , X_{R0} y a_{eff} .

2.5.5. Potencia y par en motores de inducción

2.5.5.1. Pérdidas y diagrama de flujo de potencia

Se puede ver el motor de inducción como un transformador rotante, donde su entrada es un sistema trifásico de tensiones y corrientes, y en donde los devanados secundarios están cortocircuitados de tal forma que no existe salida eléctrica sino mecánica.

La relación entre potencia eléctrica de entrada y potencia mecánica de salida de este motor se representa en el diagrama de flujo de potencia de la figura (4.4).

Las primeras pérdidas encontradas se refieren a las pérdidas en el cobre del estator, o lo que es lo mismo, I^2R en los devanados del estator. A continuación, alguna cantidad de potencia se pierde por histéresis y por corrientes parasitas en el estator ($P_{núcleo}$). La potencia restante en este punto, también llamada potencia en el entrehierro, se cede al rotor de la maquina a través del entrehierro situado entre el rotor y el estator. Después de ser cedida esta potencia, una parte de ella se disipa como pérdidas I^2R en los devanados del rotor y la restante se convierte en potencia mecánica (P_{conv}). Para terminar, se producen pérdidas por rozamiento propio y con el aire y pérdidas misceláneas (pérdidas por dispersión). La potencia resultante es la de la salida del motor P_{out} .

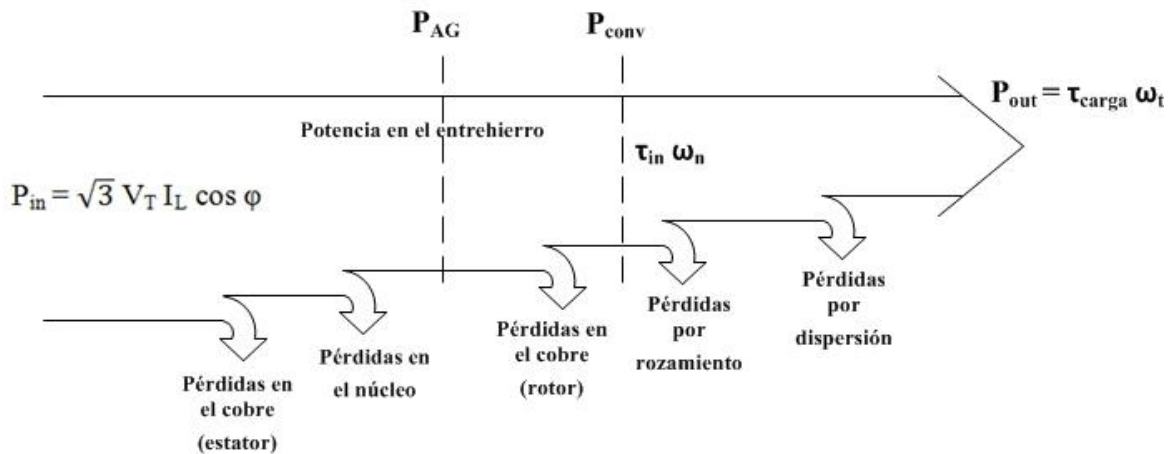


Figura 4.4. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción.

2.5.5.2. Potencia y par

La corriente de entrada a la fase del motor se puede obtener de la tensión de entrada entre la impedancia total equivalente:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{eq}} \quad (4.25)$$

Donde;

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_c - jX_M} + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}} \quad (4.26)$$

Conocida la corriente de entrada pueden hallarse las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en el cobre del rotor.

Las pérdidas en el cobre del estator están dadas por:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (4.27)$$

Las pérdidas en el núcleo están dadas por:

$$P_{núcleo} = 3E_1^2 \frac{1}{R_C} \quad (4.28)$$

De modo que la potencia en el entrehierro está dada por:

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{núcleo} \quad (4.29)$$

O bien, observando el circuito equivalente de la figura (4.3), la potencia en el entrehierro también puede estar dada por:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{S} \quad (4.30)$$

Las pérdidas en el cobre del rotor están dadas por:

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \quad (4.31)$$

Se puede relacionar las ecuaciones (4.30) y (4.31):

$$P_{RCL} = sP_{AG} \quad (4.32)$$

La potencia restante entre la potencia del entrehierro y las pérdidas en el cobre del rotor se convierte en potencia mecánica, esta potencia se denomina potencia mecánica desarrollada y está dada por:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (4.33)$$

$$P_{conv} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \quad (4.34)$$

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (4.35)$$

Usando la relación de la ecuación (4.32) y sustituyendo en la ecuación (4.33), se puede obtener la potencia mecánica desarrollada:

$$P_{conv} = (1-s)P_{AG} \quad (4.36)$$

Por último si se conocen las pérdidas por rozamiento propio y con el aire y las pérdidas misceláneas se puede hallar la potencia de salida como

$$P_{out} = P_{conv} - P_{roz} - P_{misc} \quad (4.37)$$

El par inducido τ_{ind} en una maquina se define por la conversión de potencia interna eléctrica en mecánica. El par desarrollado está dado por la ecuación:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (4.38)$$

El par inducido se puede expresar directamente en términos de potencia en el entrehierro y de la velocidad síncrona. Sustituyendo las ecuaciones (4.36) y (4.6) en la ecuación (4.38), se obtiene:

$$\tau_{ind} = \frac{(1-s)P_{AG}}{(1-s)\omega_{sinc}} \quad (4.39)$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} \quad (4.40)$$

En un motor de inducción, una parte de la potencia que llega al entrehierro se consume como perdidas en el cobre del rotor y otra parte se convierte en potencia mecánica la cual acciona el eje del rotor. Es posible separarlos e indicarlo por separado en el circuito equivalente del motor. La potencia mecánica desarrollada viene definida por la ecuación (4.33), que debe ser la potencia consumida en una resistencia de valor:

$$R_{conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (4.41)$$

En la figura 4.5 se muestra el circuito equivalente por fase con las perdidas en el cobre y la potencia eléctrica convertida en mecánica, separadas en distintos elementos.

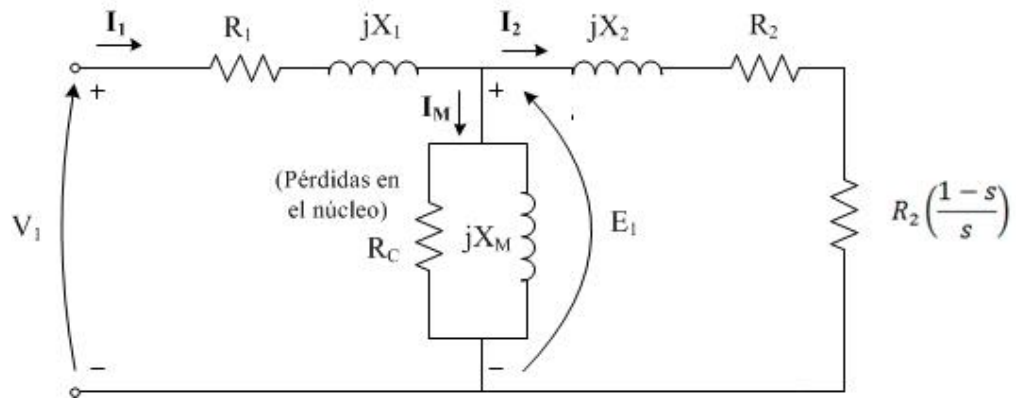


Figura 4.5. Circuito equivalente por fase

3. METODOLOGÍA

3.1. ¿QUÉ ES UNA “GUI”?

MATLAB (MATrix LABoratory) es un entorno de programación basado en matrices, ampliamente utilizado en el ámbito de la ingeniería por su versatilidad en la resolución de cálculos numéricos sin importar su complejidad. Se caracteriza también por permitir visualizar los resultados fácilmente y de distintas formas.

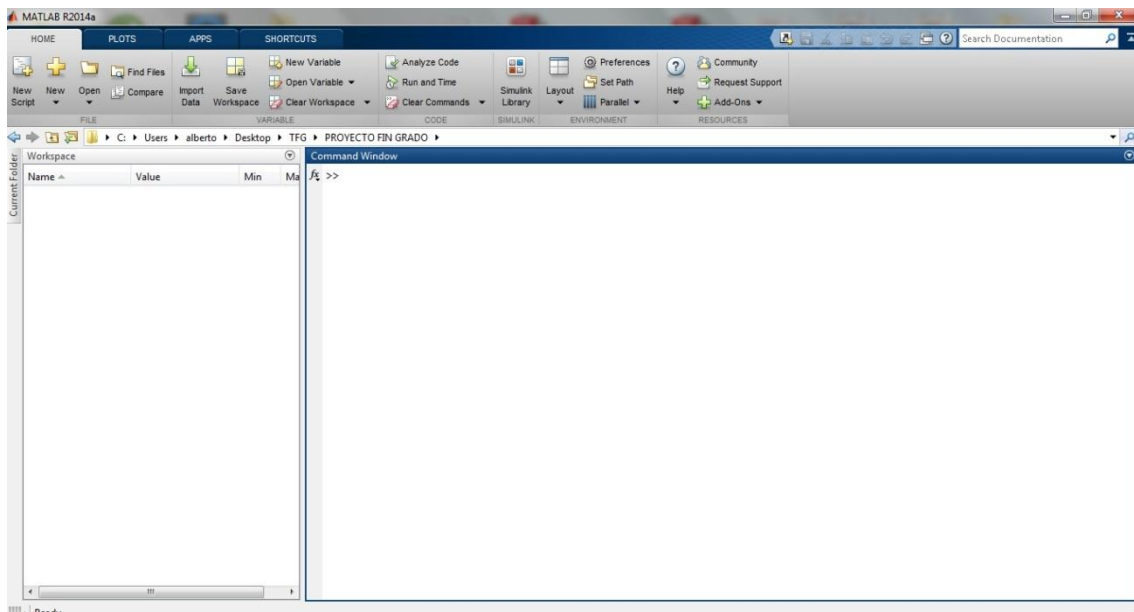


Figura 5.1. Pantalla principal de MATLAB.

Una de las tantas herramientas con las que cuenta MATLAB, es la creación de interfaces gráficas de usuario, más conocidas como GUIs, de una manera muy sencilla usando GUIDE (Graphical User Interface Development Environment).

GUIDE es un ambiente de desarrollo que permite crear interfaces gráficas con el usuario, que contengan elementos tales como botones y ventanas de selección, ventanas gráficas, menús, ejes para hacer gráficas, etc.

GUI (también conocida como interfaz gráfica de usuario), es un entorno de trabajo para la programación visual que proporciona MATLAB, consiguiendo elaborar y

ejecutar programas que permiten un control sencillo por parte del usuario automatizando las tareas o los cálculos.

Para construir una GUI se genera desde GUIDE una distribución de los elementos que la componen (botones, textos, paneles, desplegables...), GUIDE compilará estos elementos en un fichero con extensión .fig y creará un fichero .m que se deberá programar para obtener las funcionalidades deseadas.

La forma de implementar las GUI con Matlab es crear los objetos y definir las acciones que cada uno va a realizar.

Cada vez que se adicione un nuevo elemento en la interfaz gráfica, se genera automáticamente código en el archivo (*.m).

En el archivo (*.m), nos encontramos con un procesador de texto donde mencionamos todas las funciones que hacen referencia a todos los objetos presentados en el archivo (*.fig). Las funciones creadas por el comando “function”, hacen referencia al objeto mencionado por la denominación del nombre. Los comandos y funciones, componen el nuevo archivo de texto llamado (M-file) ó (*.m).

(M-file) pueden ser de scripts o funciones. Los scripts son simplemente los archivos que contienen una secuencia de sentencias de Matlab.

El archivo (*.fig), es el archivo que se va a visualizar como la interfaz gráfica. Aquí se pondrán los diversos objetos, botones, editores de texto, panel de control, gráficas, etc...

Todos los valores de las propiedades de los elementos (color, valor, posición, string...) y los valores de las variables transitorias del programa se almacenan en una estructura, los cuales son accedidos mediante un único y mismo identificador para todos éstos.

3.2. CREACIÓN DE UNA GUI

3.2.1. Conceptos previos

En una GUI el flujo de trabajo está controlado por las acciones en la interfaz. Los comandos para crear una interfaz de usuario se escriben en un guión. Cuando se interactúa con un control, el programa registra el valor de esa opción y ejecuta los comandos pertinentes en la cadena de ejecución. Al completar la ejecución de las instrucciones de la cadena de ejecución, el control vuelve a la interfaz para que el usuario pueda elegir otra opción. Este ciclo se repite hasta que se cierra la interfaz.

El control guarda un string que describe la acción a realizar cuando se ejecuta, ya sea un solo comando de MATLAB o una secuencia de comandos, o una llamada a una función.

Todos los valores de las variables del programa se almacenan en una estructura, los cuales se obtienen a través de un único y mismo identificador. El identificador se asigna en:

```
handles.output = hObject;
```

Esta definición de identificador es salvada con la siguiente instrucción:

```
guidata(hObject, handles);
```

Handles, es el identificador que crea las variables y para guardar estas variables se hace uso de la sentencia *guidata*.

La asignación y obtención de valores de los componentes se realiza mediante las sentencias *get* y *set*, el primero devuelve el valor de una o varias propiedades del objeto y el segundo las modifica.

Es posible crear la conexión entre dos GUI distintas, mediante un push button y simplemente hay que escribir el nombre de la nueva GUI que se quiere conectar con la primera, así, al pulsar el botón se abrirá la nueva GUI.

3.2.2. Crear una GUI

Para realizar este proyecto debemos ejecutar la función GUIDE, ejecutando esta instrucción en la ventana de comandos.

```
>> guide
```

(Téngase en cuenta que MATLAB discrimina entre mayúsculas y minúsculas).

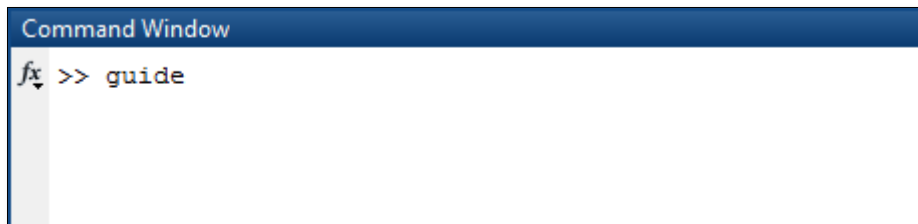


Figura 5.2. Ventana de comandos.

Se presenta el siguiente cuadro de dialogo:

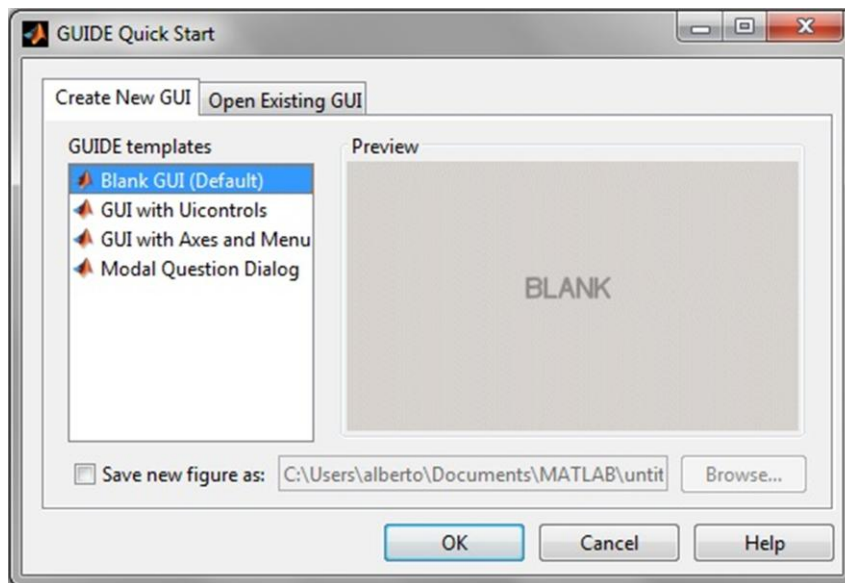


Figura 5.3. Cuadro de dialogo GUIDE

Donde se encuentran las siguientes opciones:

a) Blank GUI (Default)

La opción de interfaz gráfica de usuario en blanco (viene predeterminada), se presenta un formulario nuevo, en el cual se puede diseñar un programa desde cero.

b) GUI with Uicontrols

Esta opción presenta un ejemplo en el cual se calcula la masa, dada la densidad y el volumen, en alguno de los dos sistemas de unidades. Se puede ejecutar este ejemplo y obtener resultados.

c) GUI with Axes and Menu

Esta opción es otro ejemplo el cual contiene el menú File con las opciones Open, Print y Close. En el formulario tiene un Popup menu, un push button y un objeto Axes, se puede ejecutar el programa eligiendo alguna de las seis opciones que se encuentran en el menú despegable y haciendo click en el botón de comando.

d) Modal Question Dialog

Con esta opción se muestra en la pantalla un cuadro de diálogo común, el cual consta de una pequeña imagen, una etiqueta y dos botones Yes y No, dependiendo del botón que se presione, el GUI retorna el texto seleccionado (la cadena de caracteres “Yes” o “No”).

e) Open Existing GUI

Esta opción permite abrir un GUI ya existente.

Para crear este programa, la opción que se elige es Blank GUI (Default), esta opción es una interfaz en blanco y nos da más libertad a la hora de crear este programa, la ventana siguiente es la que aparece cuando se marca esta opción:

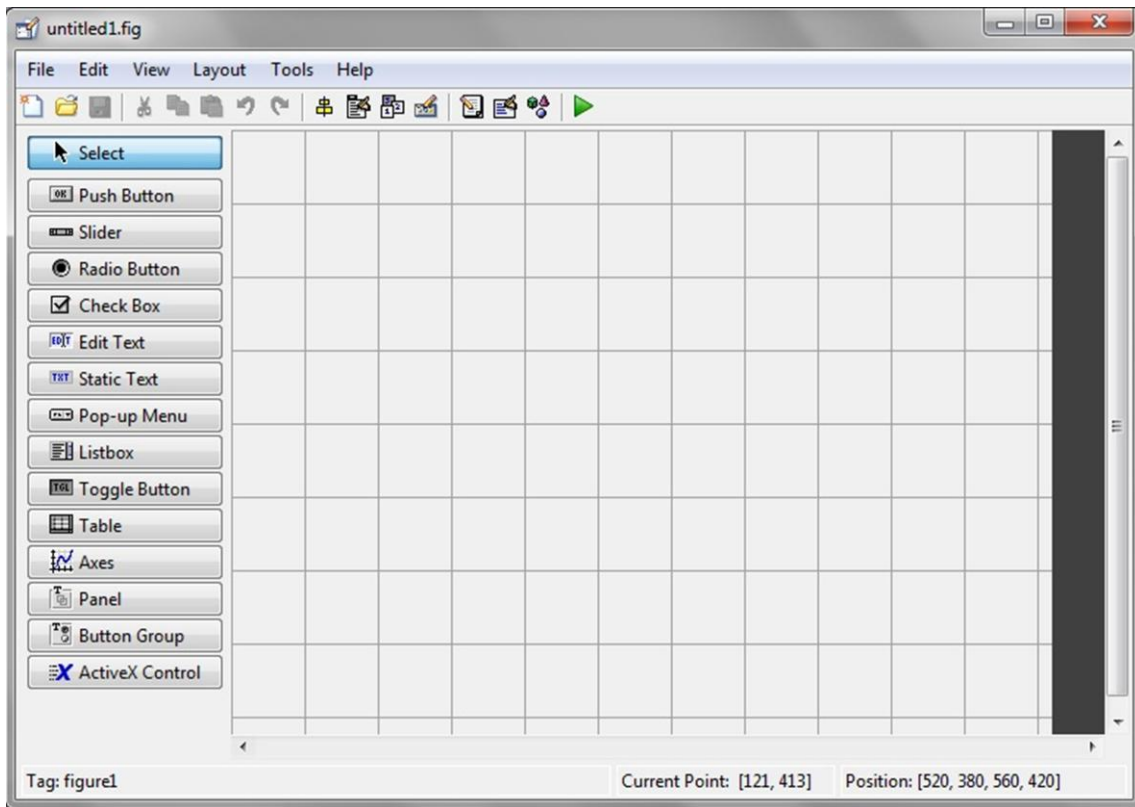


Figura 5.4. Ventana en blanco para empezar a diseñar el programa.

Además de mostrar la interfaz en blanco la figura (5.4) muestra una serie de herramientas y componentes los cuales ayudan a crear la interfaz, a continuación se muestra una breve descripción de cada una de ellas:

<i>CONTROL</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
Push button	Crea un botón que su cometido es realizar una acción
Slider	Crea un botón deslizante para representar un rango de valores
Radio button	Indica una opción que puede ser seleccionada
Check box	Indica el estado de una opción
Edit text	Permite la introducción y modificación de texto
Static text	Muestra un texto estático
Pop-up Menu	Muestra una lista de opciones
Listbox	Muestra una lista de elementos deslizable
Toggle button	Produce una acción y nos indica si esta activada o desactivada
Table	Genera una tabla
Axes	Permite mostrar gráficos e imagenes
Panel	Permite organizar los componentes de la GUI en grupos
Button group	Agrupar varios radio button y solo deja seleccionar uno de ellos
ActiveX control	Muestra controles ActiveX en la GUI

Tabla 5.1. – Descripción de los tipos de controles.









	Alinear objetos
	Editor de menú
	Editor de orden de etiqueta
	Editor de herramientas
	Editor de M-file
	Propiedades de objetos
	Navegador de objetos
	Grabar y ejecutar (ctrl.+T)

Tabla 5.2. Barra de herramienta

Para modificar las características de los objetos deberemos hacer uso del inspector de propiedades al que se accede con el menú contextual del botón derecho (figura 5.5).

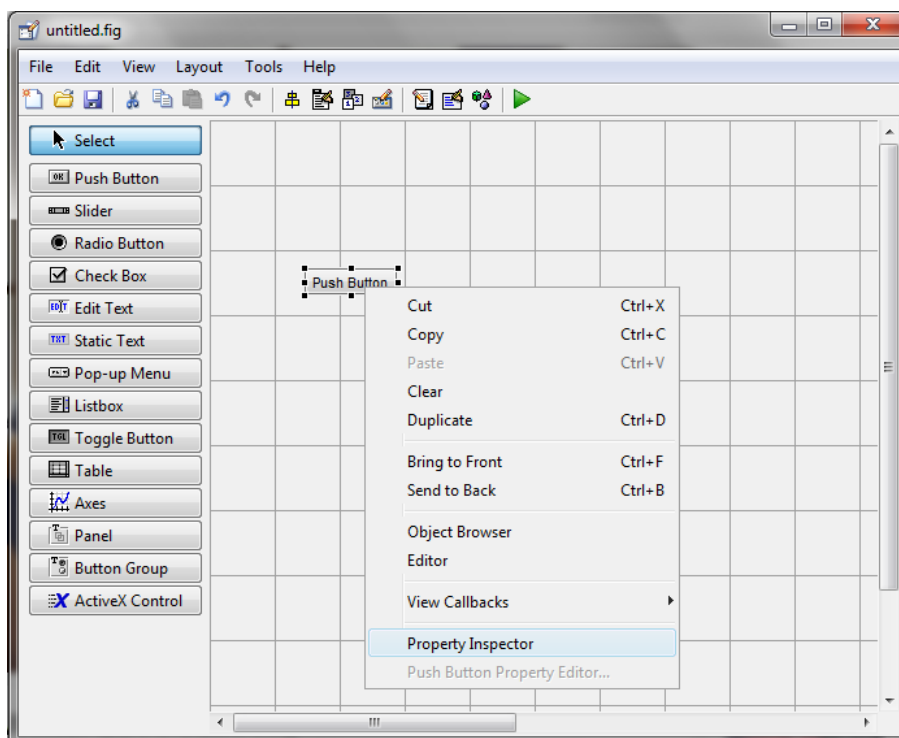


Figura 5.5. Menú contextual de un push button.

El inspector de propiedades para este botón tiene el aspecto de la Figura 5.6. Como atributos más obvios, resaltado en rojo, tenemos el ‘String’ que es el texto del botón (Push Button) o el ‘BackgroundColor’ (gris medio). No obstante los atributos más interesantes de la cara a la programación son ‘Tag’ y ‘UserData’. El primero nos permite darle un nombre concreto y nos ayudará a encontrar el objeto suministrándonos su handle. El segundo es un campo que nos permite almacenar datos del tipo que queramos (números, textos...).

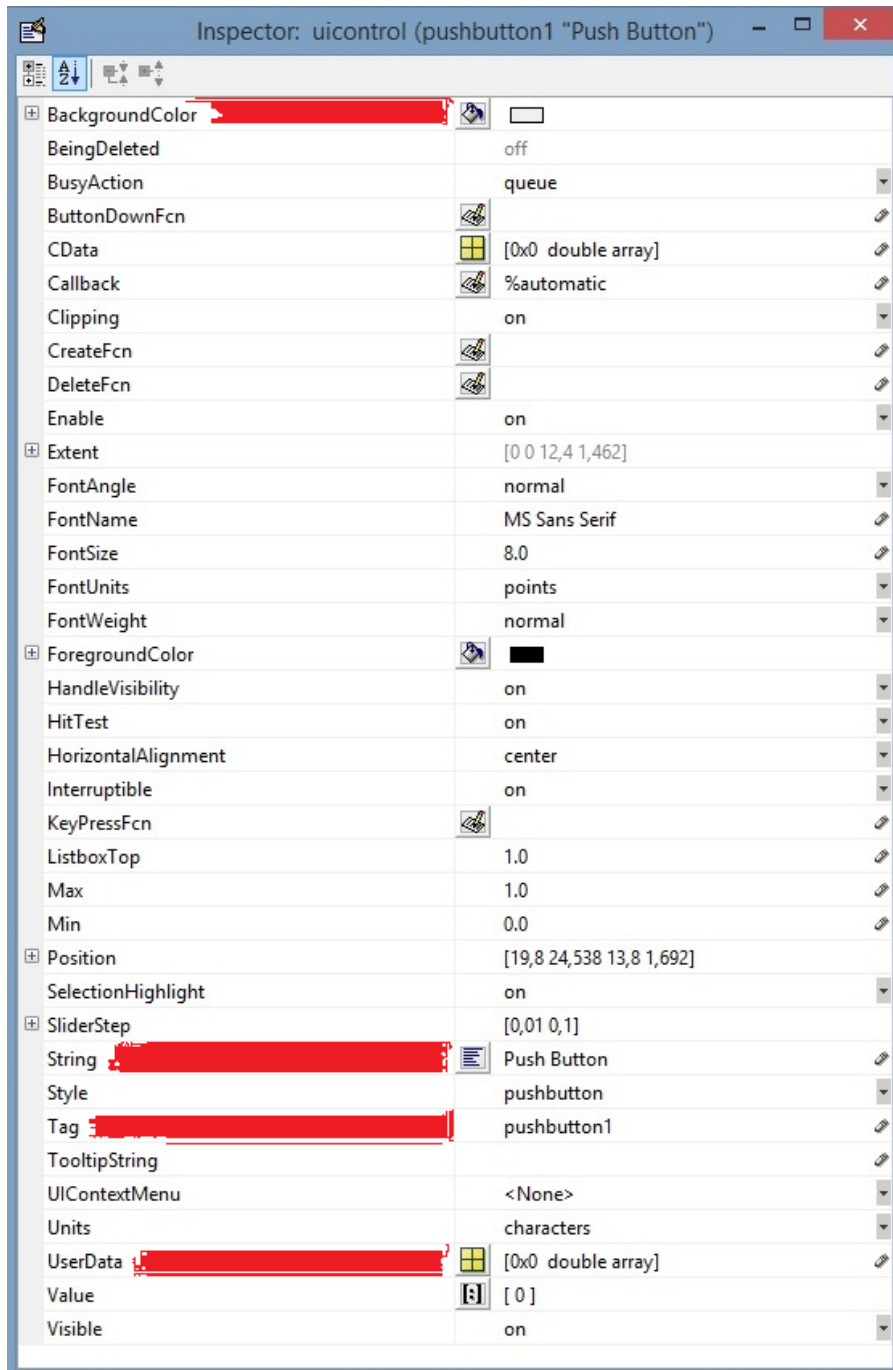


Figura 5.6. Menú inspector de propiedades de un push button.

Además una de las opciones más importantes es *Callback*, la cual al ejecutarla, abre el archivo .m asociado a nuestra interfaz y nos posiciona en la parte del programa que corresponde a la subrutina que se ejecutara cuando se realice una determinada acción sobre el elemento que estamos editando.

Por ejemplo, al ejecutar el Callback en el Push button, nos ubicara en la parte del programa:

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

A continuación, se empieza a dar forma al programa.

Cabe destacar que el programa realizado para este proyecto, cuenta con infinidad de variables y de GUIs, sería tedioso explicar paso a paso cada una de las GUI creadas, por lo tanto, se explicara la realización de un solo programa sin entrar en el cálculo teórico del mismo.

El programa elegido será el realizado con el generador asíncrono, debido a que recoge la mayoría de los elementos de programación utilizados para la realización de este proyecto.

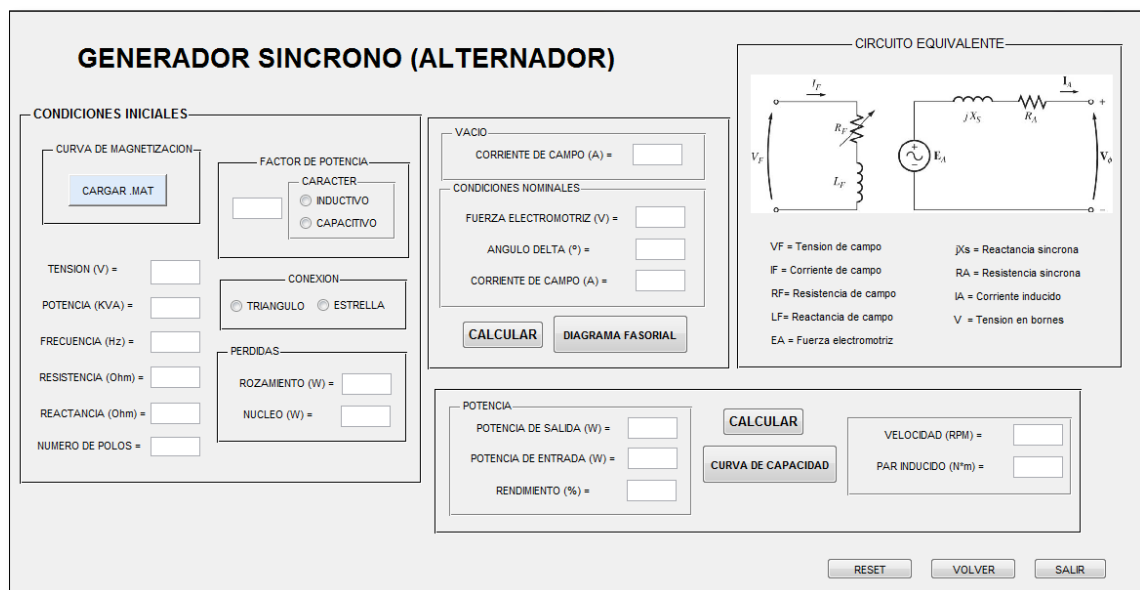


Figura 5.7. Menú del programa para el motor asíncrono.

En primer lugar, se creara un título con un static text, y a continuación se creara el panel de condiciones iniciales, en el cual se incluirán todas las variables iniciales necesarias para el análisis de la máquina (figura 5.8), cada variable cuenta con un static text y un edit text, este último sirve para introducir los datos de las variables.

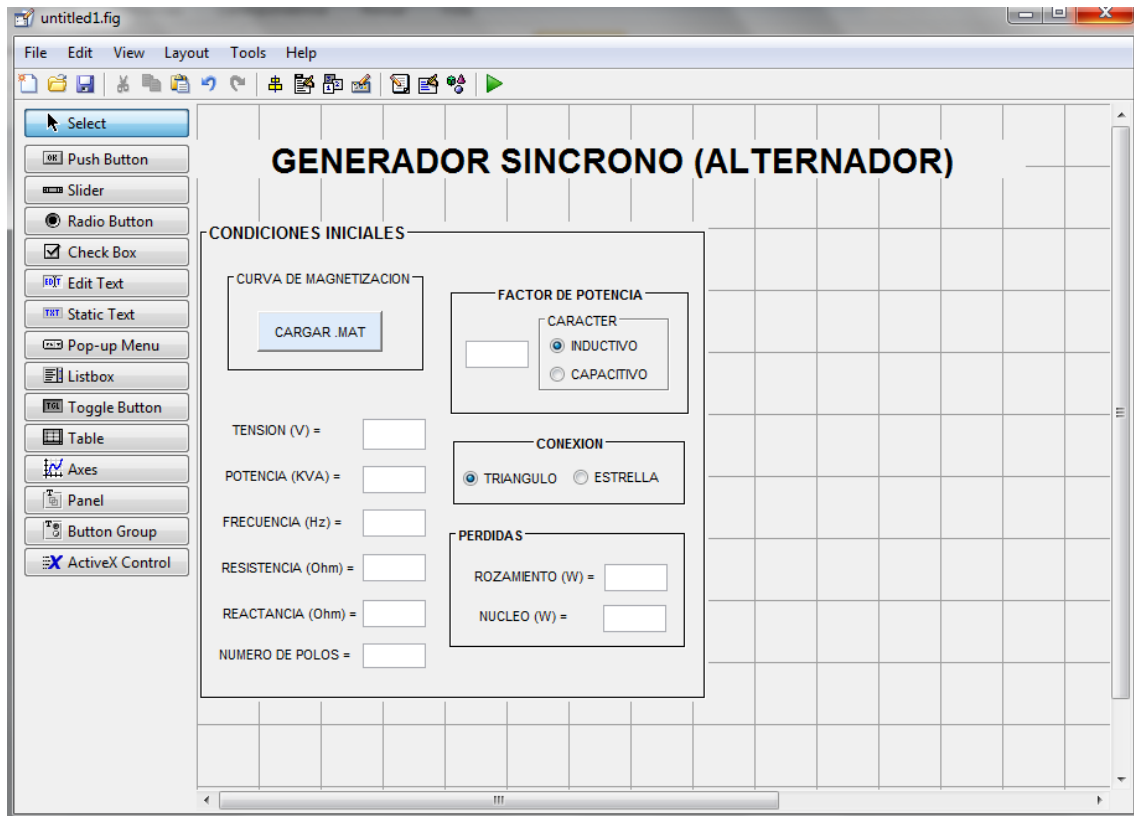


Figura 5.8. Menú del programa para el motor asíncrono.

Para este tipo de análisis es necesario cargar una curva de magnetización, la cual se definirá como un archivo .mat., se crea un push button (figura 5.9) y en su Callback se hará uso de la función `uigetfile` para cargar el archivo. Este archivo se cargara con las variables necesarias para poder realizar los cálculos, E_a para la tensión interna generada por la máquina y I_e para la corriente de campo.

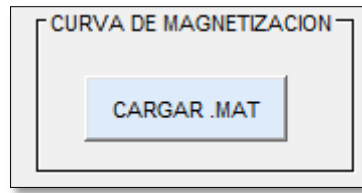


Figura 5.9. Push button de la curva de magnetización.

Cabe destacar que algunas variables son restrictivas, es decir, un motor no puede tener carácter inductivo y capacitivo al mismo tiempo, por lo que se crearan estas variables como radios button y se incluirán dentro de un button group, para poder seleccionar solo una de ellas. (Figura 5.10).

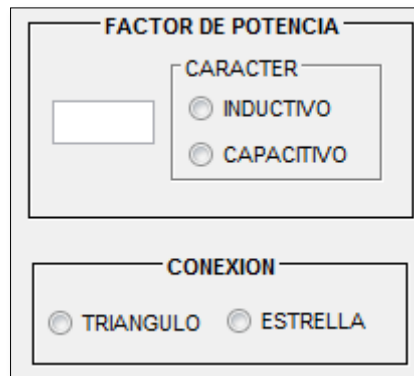


Figura 5.10. Button Group para las variables de carácter y tipo conexión.

En el panel de circuito equivalente se ha cargado una imagen a partir de un axes, esta acción al comenzar directamente al ejecutar el programa, se incluirá al principio en la función *OpeningFcn* y se usaran los comandos *imread* para cargar la imagen e *imshow* para mostrarla.

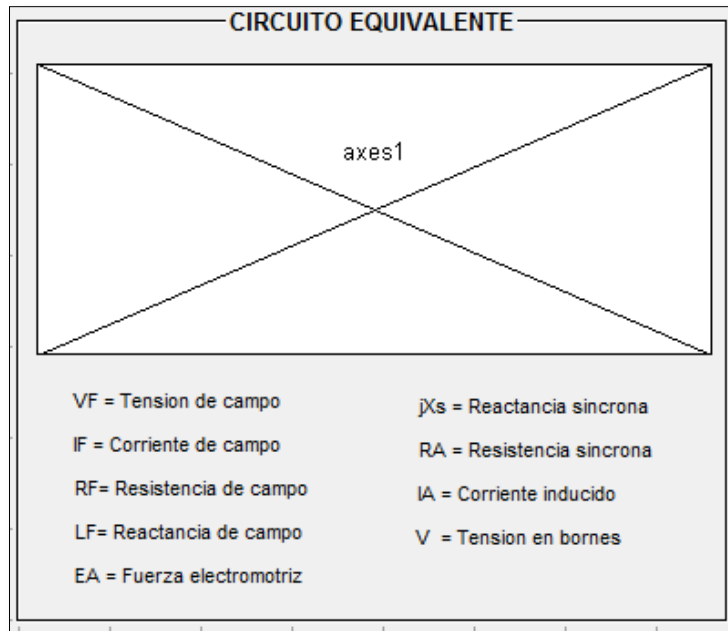


Figura 5.11. Panel de circuito equivalente.

Llegados a este punto, es necesario conocer cada una de las variables y cómo interactúan entre ellas para poder realizar bien los cálculos analíticos de la máquina.

Cualquier error por mínimo que sea, nos creara un conflicto en la interfaz y nos proporcionara datos erróneos.

A continuación, se crearan los paneles de resultados en los cuales se incluirán varios push button para dar las órdenes de realizar los cálculos pertinentes.

VACIO

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

CONDICIONES NOMINALES

FUERZA ELECTROMOTRIZ (V) =

ANGULO DELTA (°) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

CALCULAR

Figura 5.12. Panel de resultados

Es imprescindible en el Callback de los push button hacer llamadas a las distintas variables que interactúan para realizar los cálculos, si prescindimos de estas llamadas el programa no encontrara dichas variables y nos generara un error. Por ejemplo, para la corriente de campo, esta sería la estructura de programación:

```
function CALCULAR_Callback(hObject, eventdata, handles)

Ie=handles.Ie;
Ea=handles.Ea;
TENSION=str2double(get(handles.TENSION,'string'));

%CORRIENTE CAMPO,VACIO
IVACIO = interp1(Ea,Ie,TENSION,'spline');
set(handles.IVACIO,'string',IVACIO);
```

Las variables Ie y Ea son las variables cargadas de la curva de magnetización y la variable TENSION es la introducida en las condiciones iniciales, se usa str2double para convertir el string a formato numérico, es recomendable usar esta notación por seguridad y precisión en el programa.

La línea donde se encuentra el comando interp1, es simplemente una interpolación dentro de la curva de magnetización.

Y para terminar se usa el comando set para verter el resultado en el edit text de la corriente de campo.

Los demás cálculos tendrían la misma estructura, por lo que se va a prescindir de explicarlos uno por uno, como se dijo al comienzo de este apartado.

Para generar los resultados gráficos de este programa, puesto que el espacio de la interfaz es reducido, conectaremos dos GUI mediante un push button, por lo que es necesario crear otra GUI (figura 5.14), en la que se incluirá un axes.

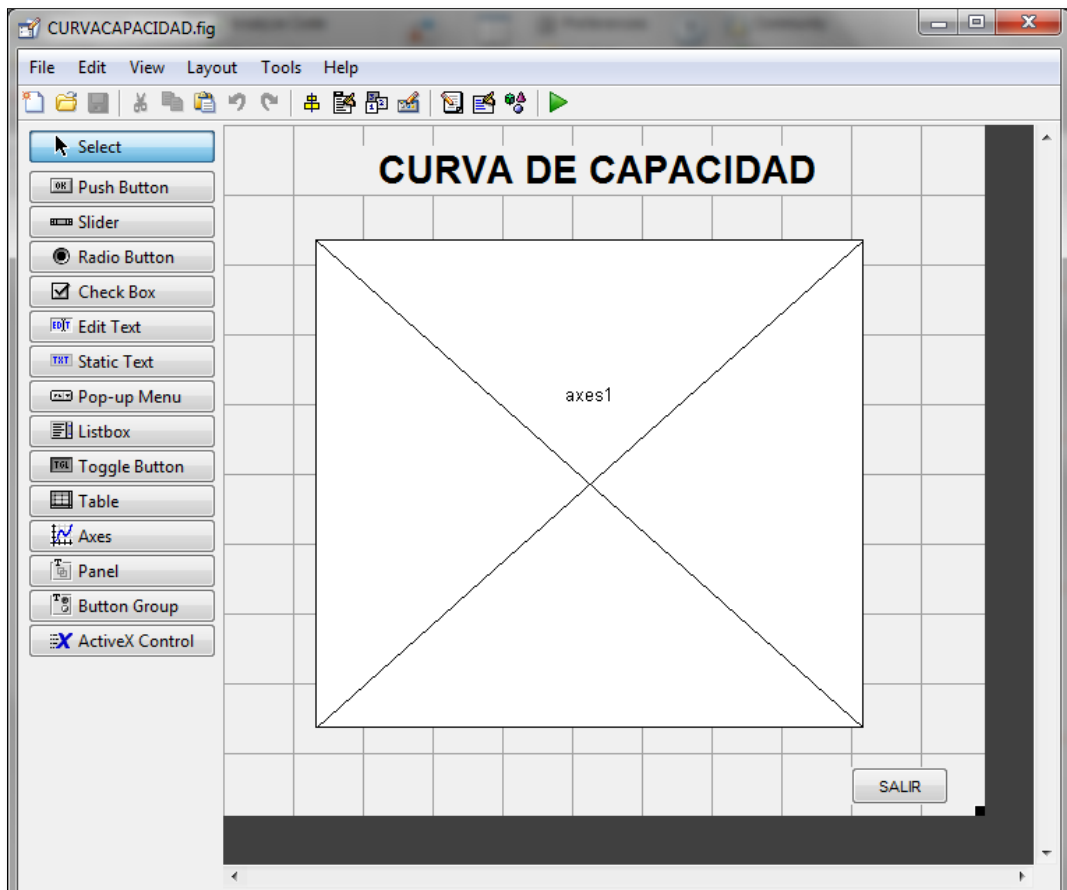


Figura 5.14. GUI para la curva de capacidad.

Para poder usar las variables de la GUI principal en la GUI de la curva de capacidad, es necesario hacer globales a estas variables con el comando *global*. Tanto en el callback del push button y en la GUI de la curva de capacidad, se debe hacer referencia a estas variables globales.

Se incluyen tres push button para interactuar mejor con las distintas GUIs que tiene este proyecto; SALIR, para poder salir del programa, VOLVER, para volver a un punto anterior Y RESET, para reiniciar todas las variables.



Figura 5.15. Botones de interacción entre las GUI

4. RESULTADOS Y EJEMPLOS

4.1. MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

4.1.1. MOTOR

4.1.1.1. EXCITACIÓN SHUNT

Un motor de cc con excitación en derivación tiene los siguientes valores nominales:

- $P = 15 \text{ hp}$
- $V = 240 \text{ V}$
- $n = 1200 \text{ r.p.m.}$
- $I = 55 \text{ A}$
- $R_A = 0.4 \Omega$
- $R_F = 100 \Omega$
- $R_{\text{adj}} = 175 \Omega$
- $N_F = 2700 \text{ vueltas por polo}$
- Reacción de inducido = $1200 \text{ A} \cdot \text{vuelta}$

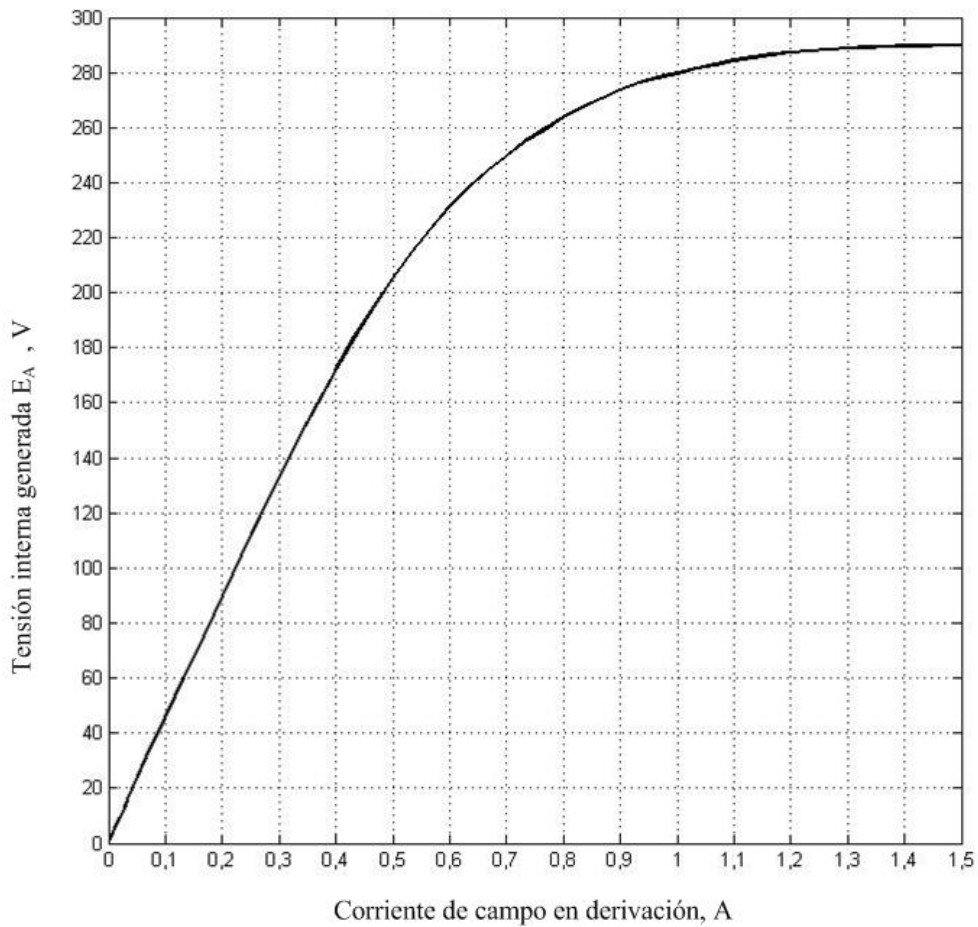


Figura 6.1. Curva de magnetización para el motor a velocidad constante de 1200 r.p.m.

MOTOR DE C.C. SHUNT

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

CARGAR .MAT

POTENCIA NOMINAL (KW) =

TENSION LINEA (V) =

INTESIDAD (A) =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

VELOCIDAD (RPM) = CALCULAR

PLENA CARGA

VELOCIDAD (RPM) =

REGULACION DE VELOCIDAD (%) =

CORRIENTE DE ARRANQUE (A) =

PAR (N*m) = RENDIMIENTO (%) =

BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) =

PERDIDAS ROTACIONALES (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

CIRCUITO EQUIVALENTE

IF = Intensidad de campo
 RF = Resistencia inductor
 Radj = Resistencia ajustable
 EA = Fuerza electromotriz
 RA = Resistencia inducido
 IA = Intensidad inducido
 IL = Intensidad de linea
 VT = Tension de linea

REACCION DE INDUCIDO

VELOCIDAD (RPM) = CALCULAR

PAR (N*m) =

RENDIMIENTO (%) =

BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) =

PERDIDAS ROTACIONALES (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

CARACTERISTICA PAR-VELOCIDAD

VER GRAFICA

RESET VOLVER SALIR

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

CARGAR .MAT

POTENCIA NOMINAL (KW) =

TENSION LINEA (V) =

INTESIDAD (A) =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO
 VELOCIDAD (RPM) = 1061.56 **CALCULAR**

PLENA CARGA
 VELOCIDAD (RPM) = 965.794

REGULACIÓN DE VELOCIDAD (%) = 9.91573

CORRIENTE DE ARRANQUE (A) = 600

PAR (N*m) = 116.857 RENDIMIENTO (%) = 84.7727

BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) = 1381.36

PERDIDAS ROTACIONALES (W) = 628.641

POTENCIA DE ENTRADA (W) = 13200

REACCION DE INDUCIDO

VELOCIDAD (RPM) = 1436.18 **CALCULAR**

PAR (N*m) = 79.1641

RENDIMIENTO (%) = 84.7727

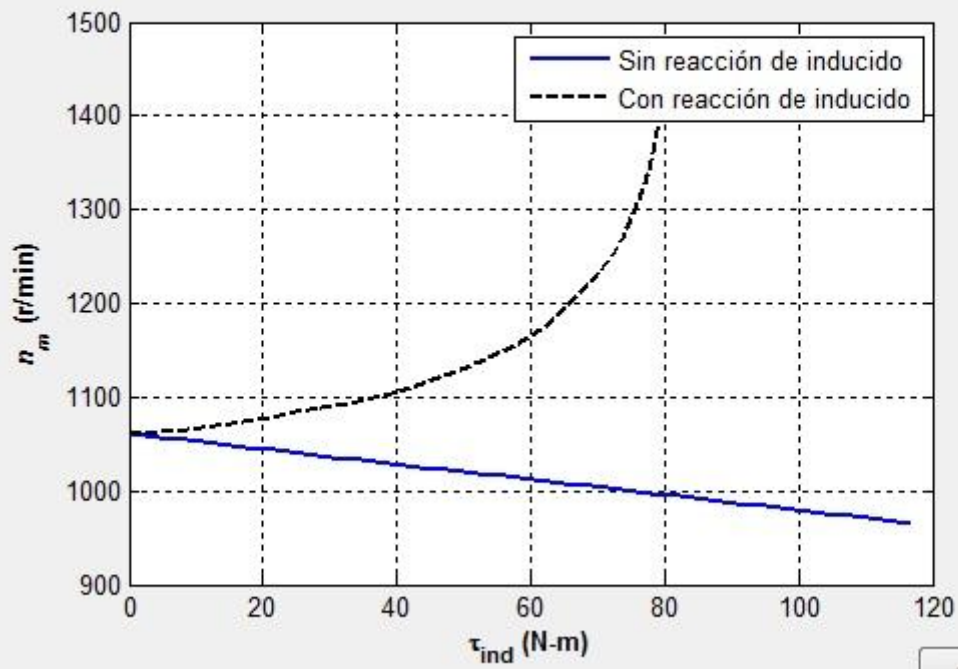
BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) = 1294.02

PERDIDAS ROTACIONALES (W) = 715.983

POTENCIA DE ENTRADA (W) = 13200

CARACTERISTICA PAR - VELOCIDAD MOTOR SHUNT



SALIR

4.1.1.2. EXCITACIÓN SERIE

Un motor con excitación serie, 15 hp, 250 V y 50 A tiene una resistencia de campo 0.04Ω y una resistencia de inducido 0.04Ω . El campo serie consta de 25 vueltas por polo.

La curva de magnetización se representa en la figura (6.2).

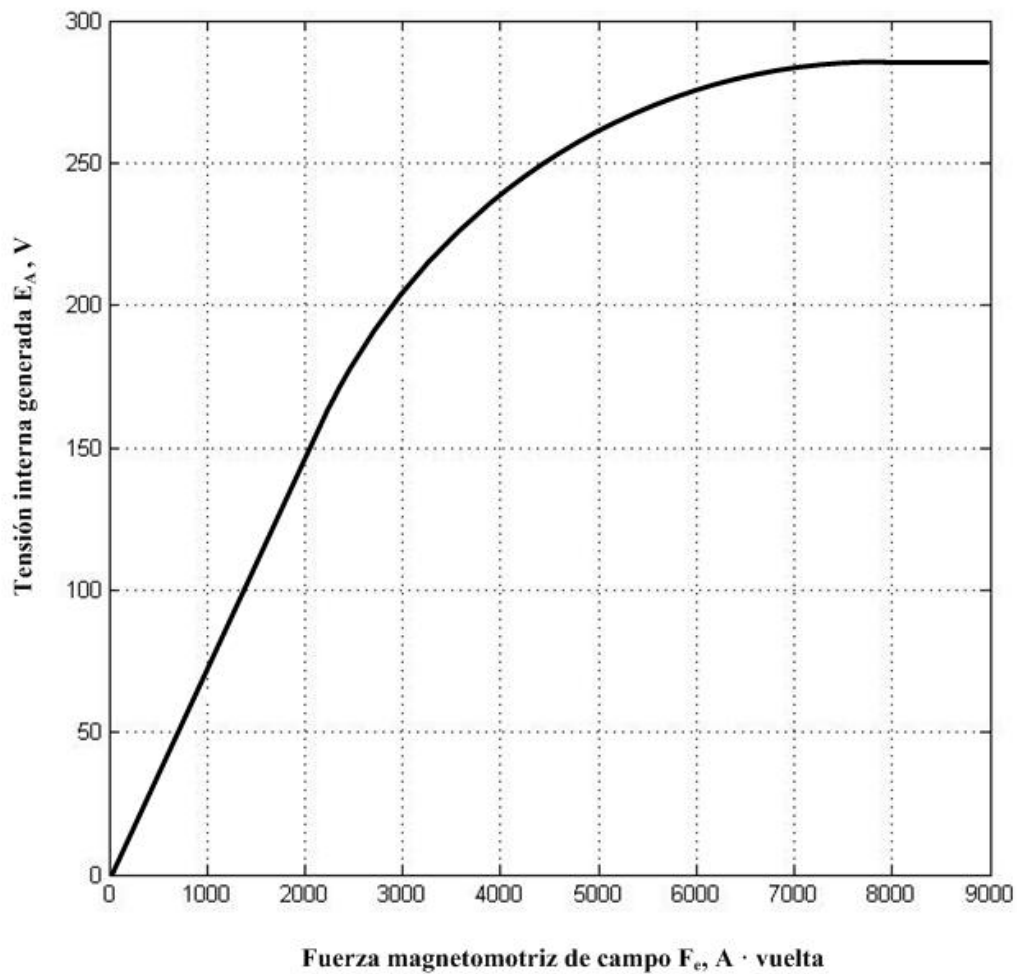


Figura 6.2. Curva de magnetización para el motor a velocidad constante de 1200 r.p.m.

MOTOR DE C.C. SERIE

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACIÓN

Fe - fmm de campo
Ea - tensión interna generada
n0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA (W) =

TENSION (V) =

INTESIDAD (A) =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

VELOCIDAD (RPM) =

PAR INDUCIDO (N*m) =

CORRENTE DE ARRANQUE (A) =

CIRCUITO EQUIVALENTE

EA = Fuerza electromotriz
RA = Resistencia inducido
RS = Resistencia de campo
IA = Intensidad inducido
IS = Intensidad de campo
IL = Intensidad de linea
VT = Tension de linea

BALANCE DE POTENCIAS

PERDIDAS COBRE (W) =

PERDIDAS ROTACIONALES (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

RENDIMIENTO (%) =

GRAFICA

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACIÓN

Fe - fmm de campo
Ea - tensión interna generada
n0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA (W) =

TENSION (V) =

INTESIDAD (A) =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

VELOCIDAD (RPM) =

PAR INDUCIDO (N*m) =

CORRIENTE DE ARRANQUE (A) =

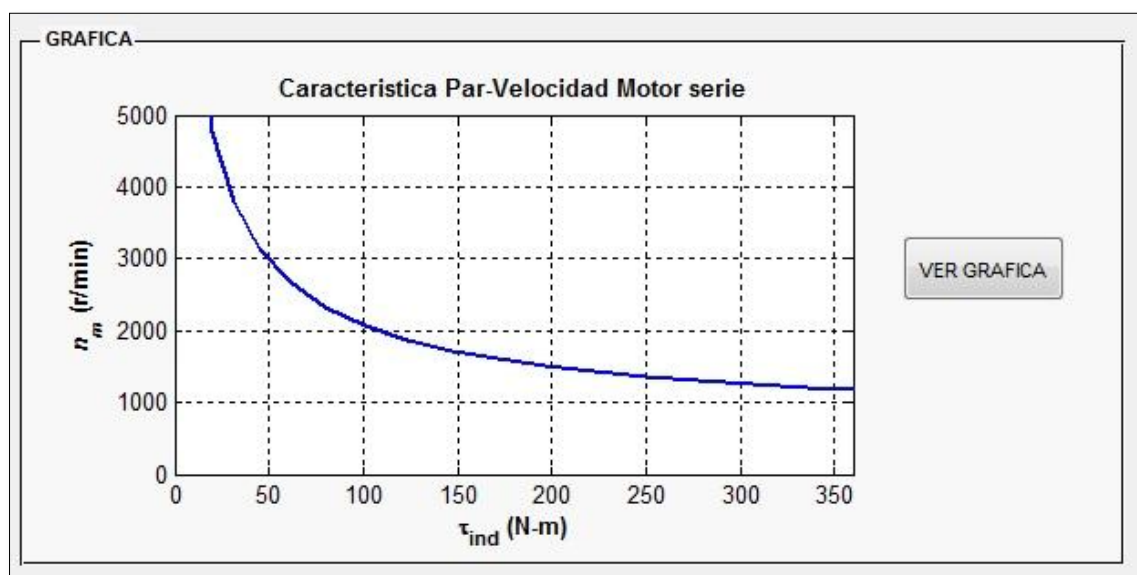
BALANCE DE POTENCIAS

PERDIDAS COBRE (W) =

PERDIDAS ROTACIONALES (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

RENDIMIENTO (%) =



4.1.1.3. EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Un motor de cc con excitación independiente tiene los siguientes valores nominales:

- $P = 15 \text{ hp}$
- $V = 240 \text{ V}$
- $n = 1200 \text{ r.p.m.}$
- $I = 55 \text{ A}$
- $R_A = 0.4 \Omega$
- $R_F = 100 \Omega$
- $R_{\text{adj}} = 175 \Omega$
- $N_F = 2700 \text{ vueltas por polo}$
- Reacción de inducido = $1200 \text{ A} \cdot \text{vuelta}$

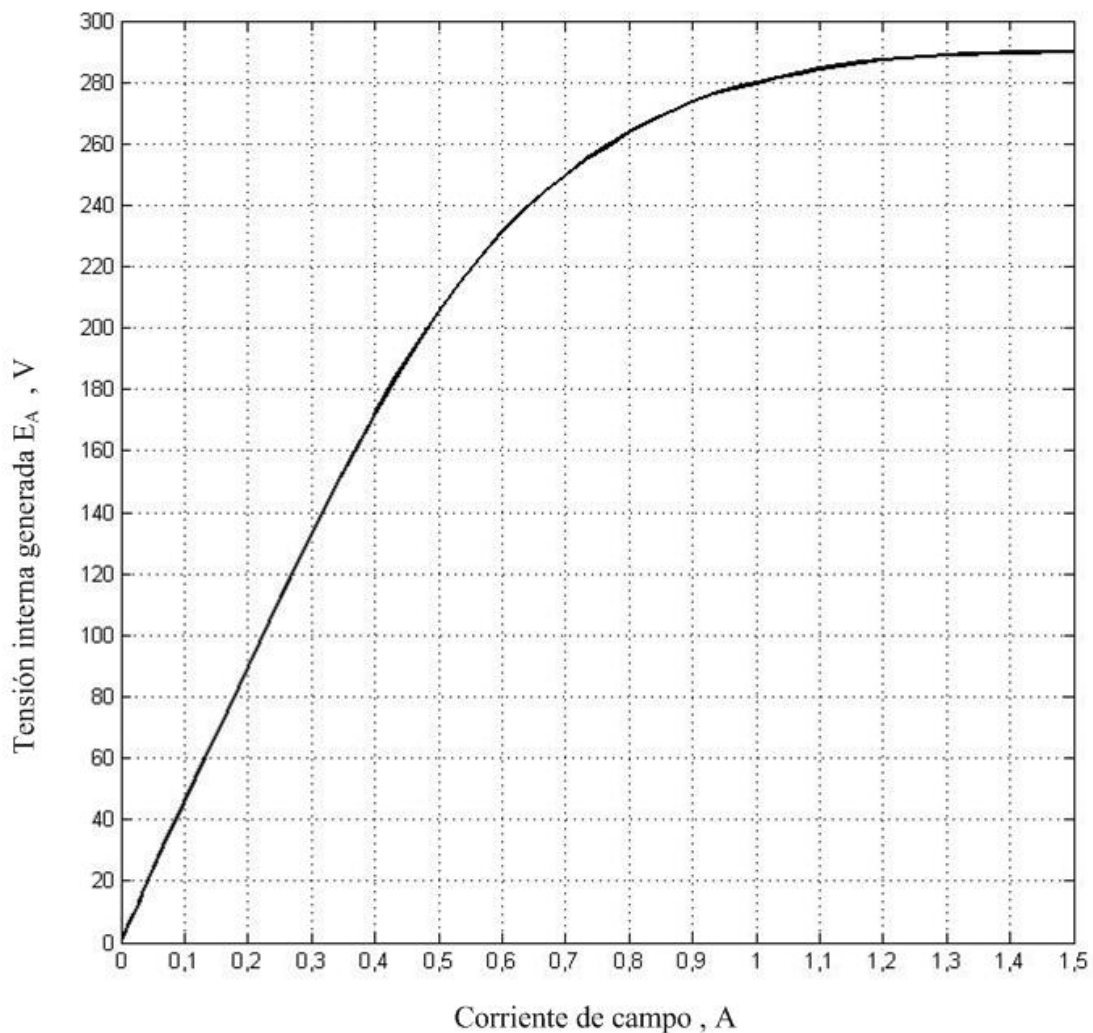


Figura 6.3. Curva de magnetización para el motor a velocidad constante de 1200 r.p.m.

MOTOR DE C.C. INDEPENDIENTE

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

le - corriente de campo
Ea - tension interna generada
n0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA NOMINAL (KW) =

TENSION DE CAMPO (V) =

TENSION LINEA (V) =

INTESIDAD (A) =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

VELOCIDAD (RPM) =

PLENA CARGA

VELOCIDAD (RPM) =

REGULACIÓN DE VELOCIDAD (%) =

CORRIENTE DE ARRANQUE (A) =

PAR (N*m) =

RENDIMIENTO (%) =

BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) =

PERDIDAS ROTACIONALES (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

CIRCUITO EQUIVALENTE

VF = Tension de campo
IF = Intensidad de campo
RF = Resistencia inductor
Radj = Resistencia ajustable
EA = Fuerza electromotriz
RA = Resistencia inducido
IA = Intensidad inducido
IL = Intensidad de linea
VT = Tension de linea

REACCION DE INDUCIDO

VELOCIDAD (RPM) =

PAR (N*m) =

RENDIMIENTO (%) =

BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) =

PERDIDAS ROTACIONALES (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

CARACTERISTICA PAR-VELOCIDAD

MOTOR DE C.C. INDEPENDIENTE

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

le - corriente de campo
Ea - tension interna generada
n0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA NOMINAL (KW) =

TENSION DE CAMPO (V) =

TENSION LINEA (V) =

INTESIDAD (A) =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

VELOCIDAD (RPM) =

PLENA CARGA

VELOCIDAD (RPM) =

REGULACIÓN DE VELOCIDAD (%) =

CORRIENTE DE ARRANQUE (A) =

PAR (N*m) =

RENDIMIENTO (%) =

BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) =

PERDIDAS ROTACIONALES (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

CIRCUITO EQUIVALENTE

VF = Tension de campo
IF = Intensidad de campo
RF = Resistencia inductor
Radj = Resistencia ajustable
EA = Fuerza electromotriz
RA = Resistencia inducido
IA = Intensidad inducido
IL = Intensidad de linea
VT = Tension de linea

REACCION DE INDUCIDO

VELOCIDAD (RPM) =

PAR (N*m) =

RENDIMIENTO (%) =

BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) =

PERDIDAS ROTACIONALES (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

CARACTERISTICA PAR-VELOCIDAD

Como ya se ha visto, la configuración del motor independiente y el shunt son bastante similares, por lo que si se utilizan los mismos valores nominales que en el motor shunt, a la hora de analizar la maquina con excitación independiente, esta mostrara los mismos resultados. Por lo que para ver la potenciabilidad de este software, se analizara el motor con excitación independiente modificando la tensión de campo a 200 V.

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

CARGAR .MAT

POTENCIA NOMINAL (KW) = 11.19

TENSION DE CAMPO (V) = 200

TENSION LINEA (V) = 240

INTESIDAD (A) = 55

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) = 0.4

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) = 100

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) = 175

NUMERO DE VUELTAS POR POLO = 2700

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) = 1200

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

VELOCIDAD (RPM) = 1132.73

CALCULAR

PLENA CARGA

VELOCIDAD (RPM) = 1028.9

REGULACIÓN DE VELOCIDAD (%) = 10.0917

CORRIENTE DE ARRANQUE (A) = 600

PAR (N^m) = 111.28

RENDIMIENTO (%) = 84.7727

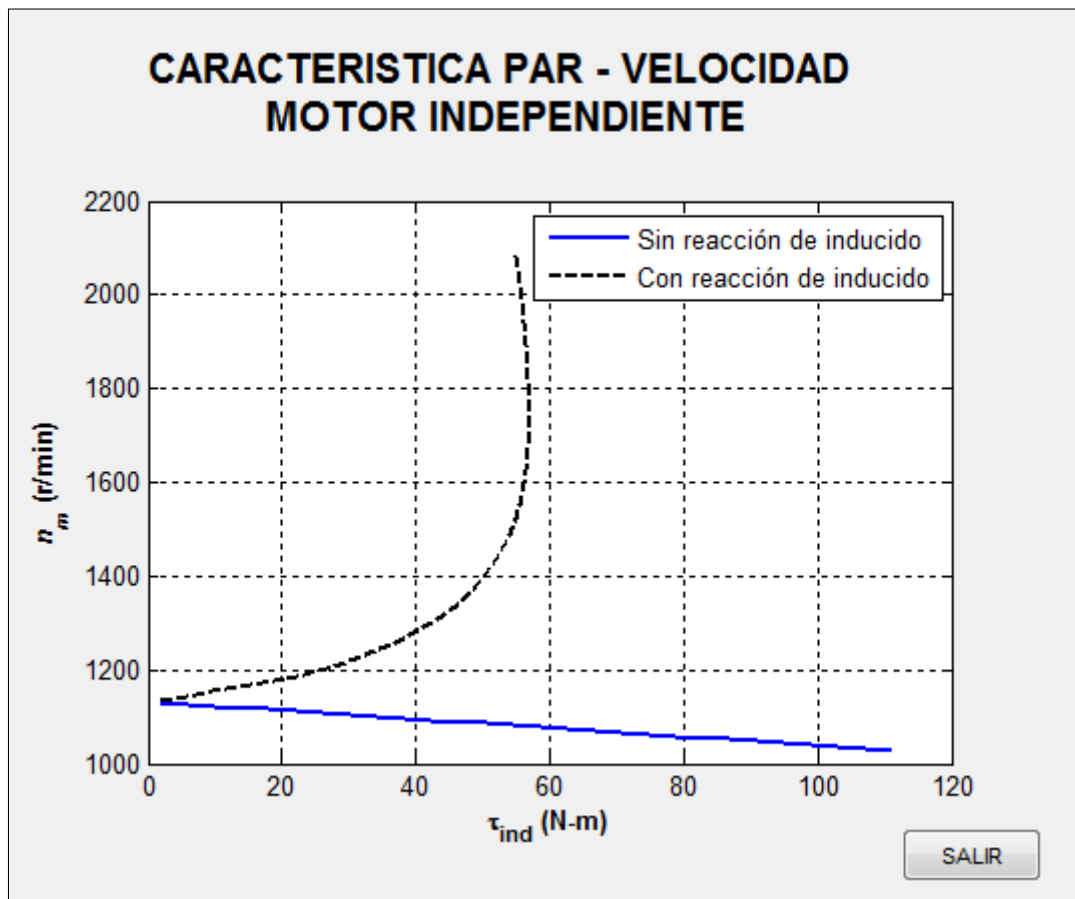
BALANCE DE POTENCIA

PERDIDAS COBRE (W) = 1355.45

PERDIDAS ROTACIONALES (W) = 800

POTENCIA DE ENTRADA (W) = 13200

REACCION DE INDUCIDO		BALANCE DE POTENCIA	
VELOCIDAD (RPM) =	<input type="text" value="2083.22"/>	PERDIDAS COBRE (W) =	<input type="text" value="1277.88"/>
PAR (N*m) =	<input type="text" value="54.9612"/>	PERDIDAS ROTACIONALES (W) =	<input type="text" value="800"/>
RENDIMIENTO (%) =	<input type="text" value="84.7727"/>	POTENCIA DE ENTRADA (W) =	<input type="text" value="13200"/>
<input type="button" value="CALCULAR"/>			



4.1.2. GENERADOR (DINAMO)

4.1.2.1. EXCITACIÓN SHUNT

Un generador cc con excitación shunt tiene las siguientes características:

- $P = 6 \text{ kW}$
- $V = 120 \text{ V}$
- $n = 1800 \text{ r.p.m.}$
- $I = 50 \text{ A}$
- $R_A = 0.18 \Omega$
- $R_F = 24 \Omega$
- $R_{adj} = 10 \Omega$
- $N_F = 1000 \text{ vueltas por polo}$
- Reacción de inducido = $200 \text{ A} \cdot \text{vuelta}$

Su curva de magnetización se muestra en la figura (6.4).

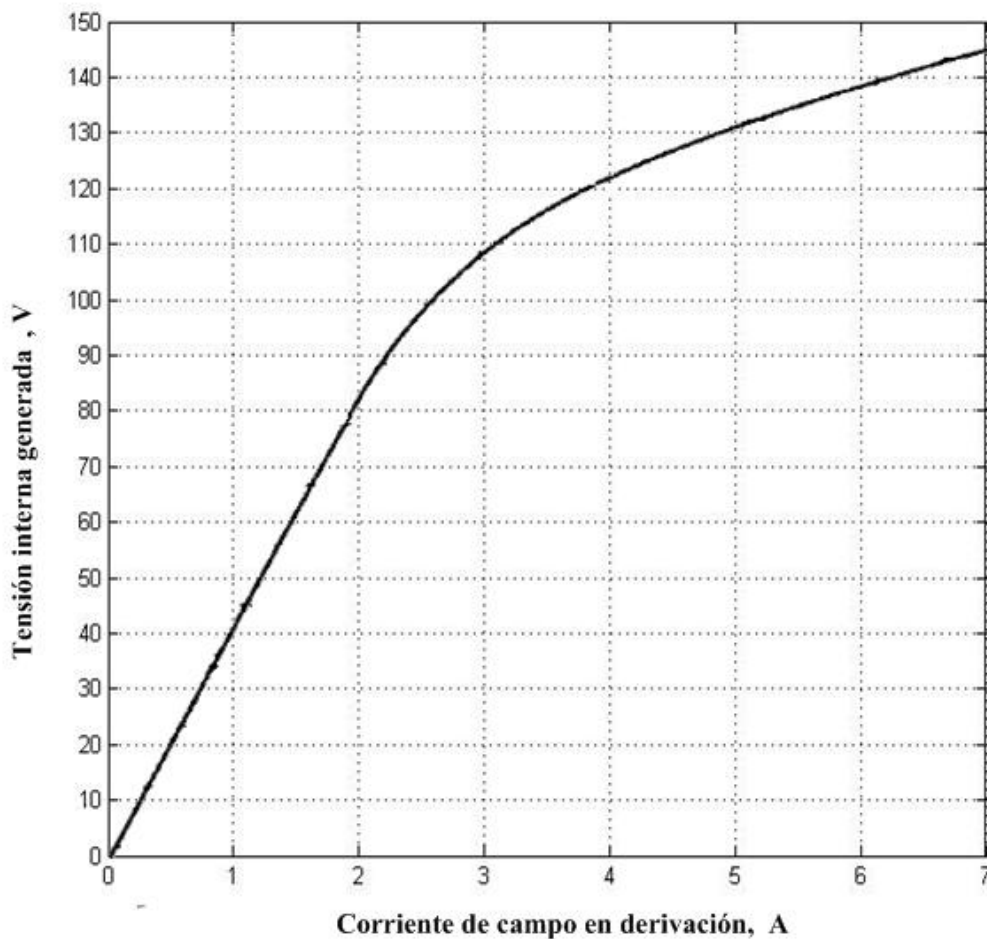


Figura 6.4. Curva de magnetización trazada para una velocidad de 1800rpm.

GENERADOR DE C.C. SHUNT

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

CARGAR .MAT

le - corriente de campo
Ea - tension interna generada
n0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA (KW) =

INTESIDAD (A) =

% DE LA CORRIENTE NOMINAL =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

TENSION (V) =

CALCULAR

CARGA

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

TENSION (V) =

CALCULAR

CIRCUITO EQUIVALENTE

IF = intensidad de campo
RF = Resistencia inductor
Radj = Resistencia ajustable
EA = Fuerza electromotriz
RA = Resistencia inducido
IA = Intensidad inducido
IL = Intensidad de linea
VT = Tension de linea

REACCION DE INDUCIDO

CARGA

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

TENSION (V) =

CALCULAR

CARACTERISTICA EN LOS TERMINALES

GRAFICA

Para una corriente de inducido de 20 A, es decir al 40% de la corriente nominal, los resultados obtenidos son:

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

CARGAR .MAT

le - corriente de campo
Ea - tension interna generada
n0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA (KW) =

INTESIDAD (A) =

% DE LA CORRIENTE NOMINAL =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) = 111.22

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 3.28

TENSION (V) = 111.52

CALCULAR

CARGA

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) = 109.38

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 3.12

TENSION (V) = 106.08

REACCION DE INDUCIDO

CARGA

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) = 107.485

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 3.06

TENSION (V)= 104.04

CALCULAR

Y para una corriente de inducido de 40 A, es decir al 80% de su corriente nominal, los resultados obtenidos son:

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

CARGAR .MAT

i_c - corriente de campo
 E_a - tension interna generada
 n_0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA (KW) =

INTESIDAD (A) =

% DE LA CORRIENTE NOMINAL =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

TENSION (V) =

CALCULAR

CARGA

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

TENSION (V) =

REACCION DE INDUCIDO

CARGA

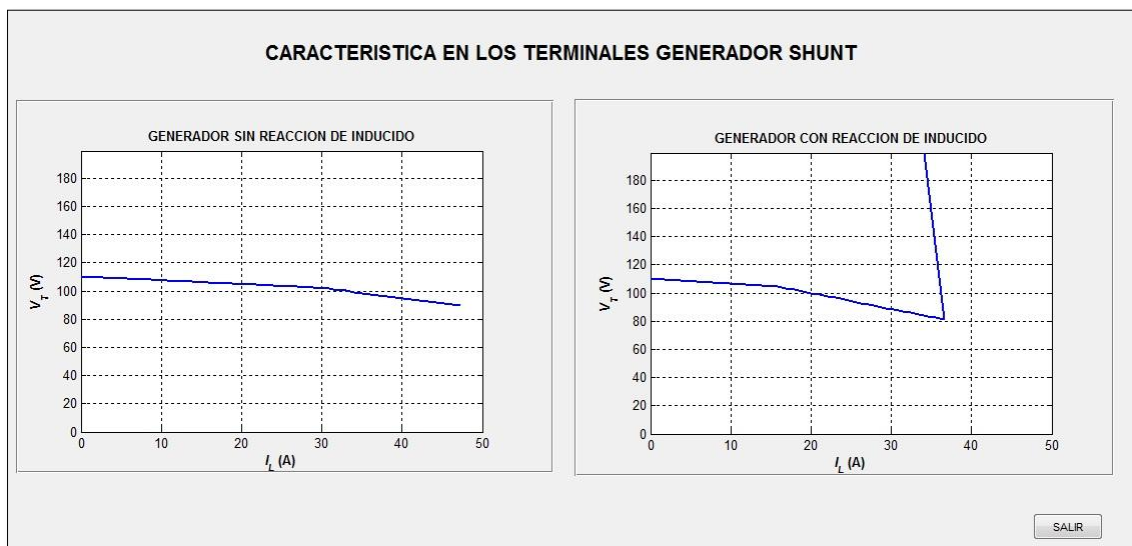
FUERZAELECTROMOTRIZ (V) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

TENSION (V)=

Se puede apreciar como para una corriente de 40 A, el generador con reacción de inducido muestra una fuerza electromotriz por encima de lo normal, esto quiere decir que la maquina en estas condiciones no funciona de forma estable.

Para entender mejor esta situación, a continuación se muestra los resultados de las características de los terminales de forma gráfica. Se puede observar como el funcionamiento del generador cuando presenta reacción de inducido, llega a un punto en el cual este se dispara y no es estable.



4.1.2.2. EXCITACIÓN INDEPENDIENTE

Un generador cc con excitación derivación tiene las siguientes características:

- $P = 6 \text{ kW}$
- $V = 120 \text{ V}$
- $V_F = 120 \text{ V}$
- $n = 1800 \text{ r.p.m.}$
- $I = 50 \text{ A}$
- $R_A = 0.18 \ \Omega$
- $R_F = 24 \ \Omega$
- $R_{\text{adj}} = 10 \ \Omega$
- $N_F = 1000 \text{ vueltas por polo}$
- Reacción de inducido = $400 \text{ A} \cdot \text{vuelta}$

Su curva de magnetización se muestra en la figura (6.5).

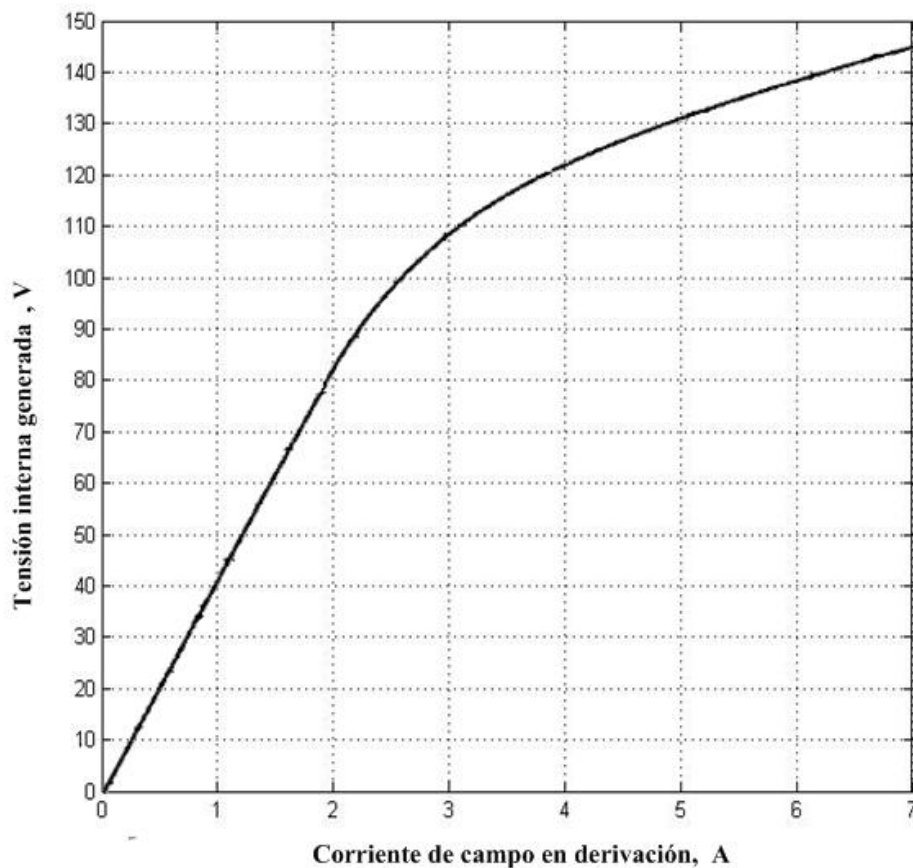


Figura 6.5. Curva de magnetización trazada para una velocidad de 1800rpm.

Se puede apreciar como esta máquina tiene prácticamente las mismas características de funcionamiento, exceptuando la reacción de inducido, que la máquina analizada en el apartado del generador shunt. A pesar de ello, este análisis cuenta

además con un apartado donde se analiza la máquina para una tensión fija en los terminales.

GENERADOR DE C.C. INDEPENDIENTE

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

le - corriente de campo
Ea - tensión interna generada
n0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA (KW) =

TENSION DE CAMPO (A) =

INTESIDAD (A) =

% DE LA CORRIENTE NOMINAL =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

TENSION (V) =

CARGA

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

TENSION (V) =

CIRCUITO EQUIVALENTE

VF = Tension de campo
IF = Intensidad de campo
RF = Resistencia inductor
Radj = Resistencia ajustable
EA = Fuerza electromotriz
RA = Resistencia inducido
IA = Intensidad inducido
IL = Intensidad de linea
VT = Tension de linea

PARA UNA TENSION FUA EN LOS TERMINALES

VARIACION DE

TENSION DE CAMPO

RESISTENCIA AJUSTABLE

TENSION (V) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

CON REACCION DE INDUCIDO

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

le - corriente de campo
Ea - tensión interna generada
n0 - velocidad a la que se ha obtenido la curva

POTENCIA (KW) =

TENSION DE CAMPO (A) =

INTESIDAD (A) =

% DE LA CORRIENTE NOMINAL =

RESISTENCIA INDUCIDO (Ohm) =

RESISTENCIA INDUCTOR (Ohm) =

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohm) =

NUMERO DE VUELTAS POR POLO =

REACCION DE INDUCIDO (A/Vueltas) =

SIN REACCION DE INDUCIDO

VACIO

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) = 114.088

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 3.52941

TENSION (V) = 114.088

CALCULAR

CARGA

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) = 114.088

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 3.52941

TENSION (V) = 105.088

REACCION DE INDUCIDO

CARGA

FUERZAELECTROMOTRIZ (V) = 109.488

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 3.12941

TENSION (V)= 100.488

CALCULAR

PARA UNA TENSION FIJA EN LOS TERMINALES

VARIACION DE

TENSION DE CAMPO

RESISTENCIA AJUSTABLE

TENSION (V) =

CALCULAR

SIN REACCION DE INDUCIDO

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

CON REACCION DE INDUCIDO

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

Para una tensión fija en los terminales de 120 V, se obtienen los siguientes resultados:

PARA UNA TENSION FIJA EN LOS TERMINALES

VARIACION DE

TENSION DE CAMPO

RESISTENCIA AJUSTABLE

TENSION MAXIMA POSIBLE = 133

TENSION (V) = 120

CALCULAR

SIN REACCION DE INDUCIDO

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 5

TENSION DE CAMPO (V) = 170

CON REACCION DE INDUCIDO

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 5.4

TENSION DE CAMPO (V) = 183.6

PARA UNA TENSION FIJA EN LOS TERMINALES

VARIACION DE

TENSION DE CAMPO

RESISTENCIA AJUSTABLE

TENSION MAXIMA POSIBLE = 133

TENSION (V) = 120

CALCULAR

SIN REACCION DE INDUCIDO

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 5

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohms) = 10

CON REACCION DE INDUCIDO

CORRIENTE DE CAMPO (A) = 5.4

RESISTENCIA AJUSTABLE (Ohms) = 7.48148

4.2. MAQUINAS SINCRONAS

4.2.1. GENERADOR SINCRONO (ALTERNADOR)

Un generador síncrono de 2300V, 1000kVA, factor de potencia 0,8 en atraso, 60Hz, dos polos, conectado en Y, tiene una reactancia síncrona de 1.1Ω y una resistencia de inducido de 0.15Ω . A 60Hz, sus pérdidas por fricción propia y con el aire son de 24kW y sus pérdidas en el núcleo son de 18kW. El circuito de campo tiene una tensión de 200V y la corriente de campo máxima es 10A. La OCC se muestra en la figura (6.6).

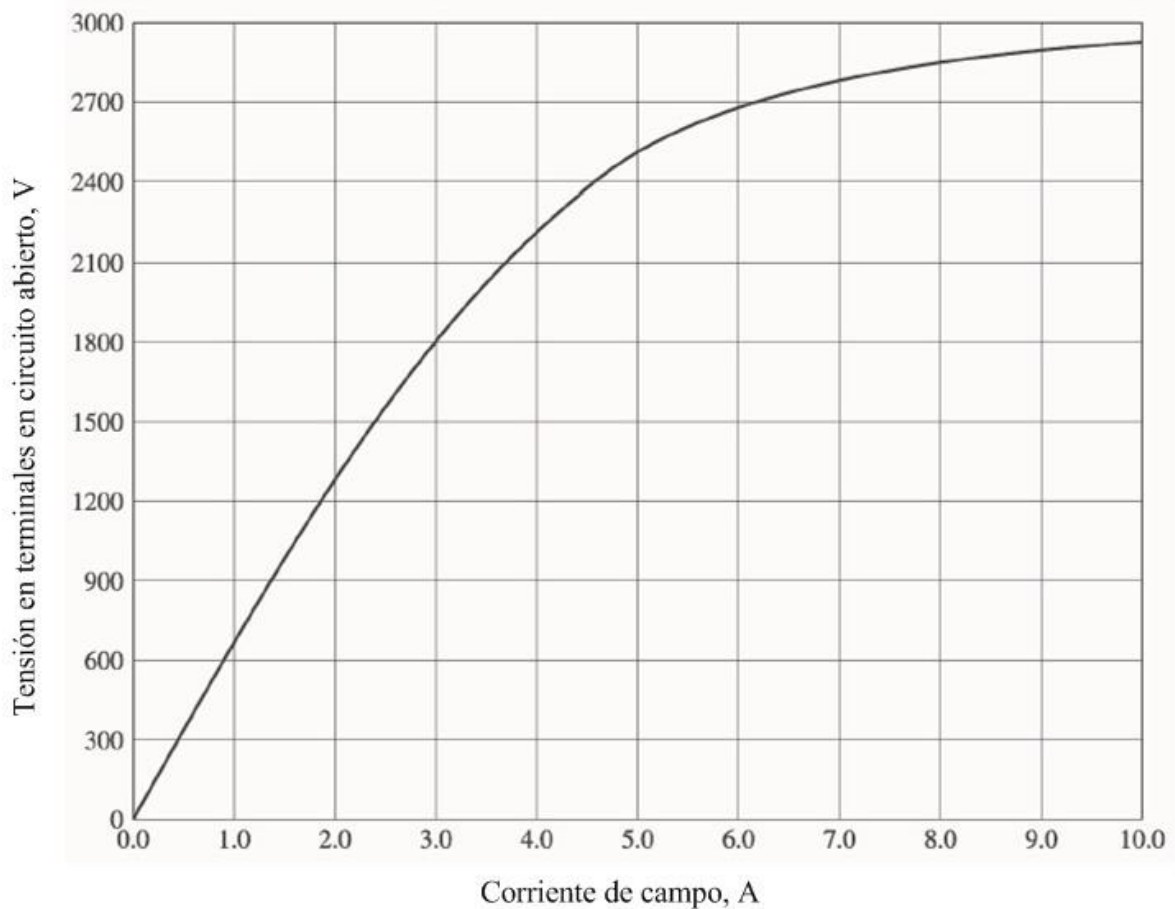


Figura 6.6. Característica de circuito abierto del generador.

GENERADOR SINCRONO (ALTERNADOR)

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

CARGAR .MAT

le - corriente de campo
Ea - tension interna generada

TENSION (V) =

POTENCIA (KVA) =

FRECUENCIA (Hz) =

RESISTENCIA (Ohm) =

REACTANCIA (Ohm) =

NUMERO DE POLOS =

FACTOR DE POTENCIA

CARACTER

INDUCTIVO
 CAPACITIVO

CONEXION

TRIANGULO ESTRELLA

PERDIDAS

ROZAMIENTO (W) =

NUCLEO (W) =

VACIO

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

CONDICIONES NOMINALES

FUERZA ELECTROMOTRIZ (V) =

ANGULO DELTA (°) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

CALCULAR

POTENCIA

POTENCIA DE SALIDA (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

RENDIMIENTO (%) =

CALCULAR

CURVA DE CAPACIDAD

VELOCIDAD (RPM) =

PAR INDUCIDO (N*m) =

CIRCUITO EQUIVALENTE

VF = Tension de campo
IF = Corriente de campo
RF = Resistencia de campo
LF = Reactancia de campo
EA = Fuerza electromotriz

jXs = Reactancia sincrona
RA = Resistencia sincrona
IA = Corriente inducido
V = Tension en bornes

RESET
VOLVER
SALIR

CONDICIONES INICIALES

CURVA DE MAGNETIZACION

CARGAR .MAT

le - corriente de campo
Ea - tension interna generada

FACTOR DE POTENCIA

CARACTER

INDUCTIVO
 CAPACITIVO

TENSION (V) =

POTENCIA (KVA) =

FRECUENCIA (Hz) =

RESISTENCIA (Ohm) =

REACTANCIA (Ohm) =

NUMERO DE POLOS =

CONEXION

TRIANGULO ESTRELLA

PERDIDAS

ROZAMIENTO (W) =

NUCLEO (W) =

VACIO

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

CONDICIONES NOMINALES

FUERZA ELECTROMOTRIZ (V) =

ANGULO DELTA (°) =

CORRIENTE DE CAMPO (A) =

POTENCIA

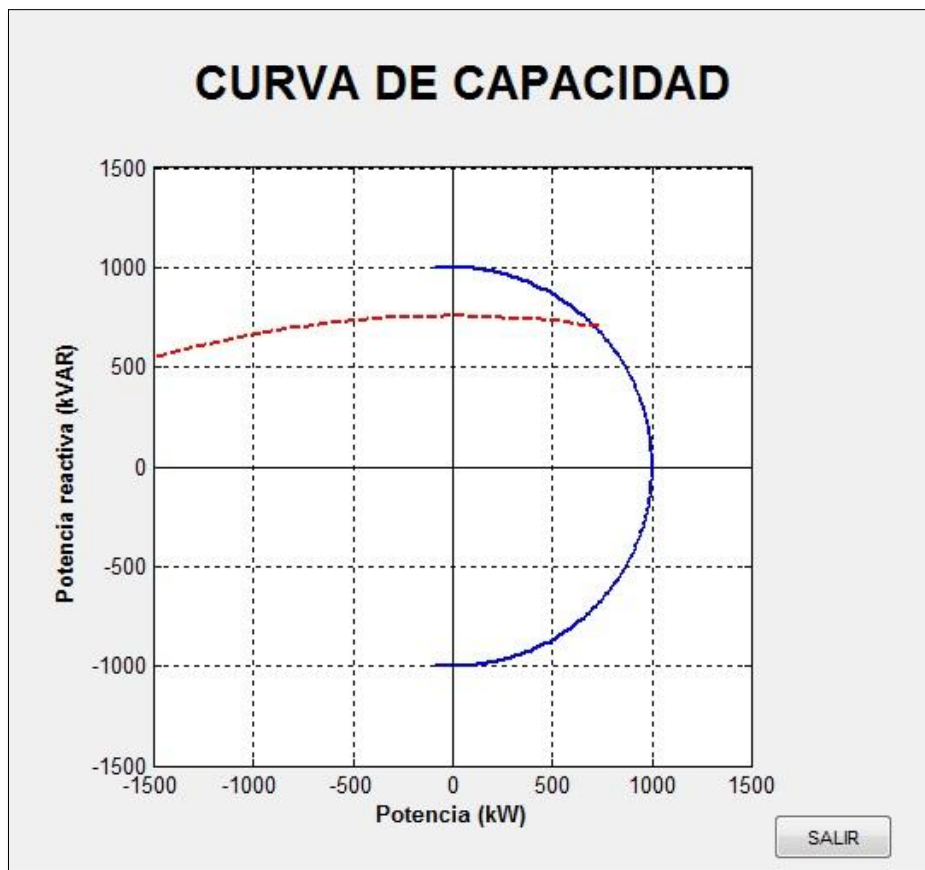
POTENCIA DE SALIDA (W) =

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

RENDIMIENTO (%) =

VELOCIDAD (RPM) =

PAR INDUCIDO (N*m) =



4.2.2. MOTOR SINCRONO

Un motor síncrono de 480V, 60Hz, 400hp, factor de potencia 0.8 en atraso, seis polos, conectado en Δ , tiene una reactancia síncrona de 1.1Ω . La resistencia del inducido es despreciable. No se tiene en cuenta el rozamiento ni el rozamiento con el aire, así como las pérdidas en el núcleo.

MOTOR SINCRONO

CONDICIONES INICIALES

TENSION (V) =

POTENCIA (KW) =

FRECUENCIA (Hz) =

RESISTENCIA (Ohm) =

REACTANCIA (Ohm) =

NUMERO DE POLOS =

FACTOR DE POTENCIA

CARACTER

INDUCTIVO

CAPACITIVO

CONEXION

TRIANGULO ESTRELLA

PERDIDAS

ROZAMIENTO (W) =

NUCLEO (W) =

INTENSIDAD INDUCIDO (A) =

FUERZA ELECTROMOTRIZ (V) =

ANGULO DELTA (°) =

PAR MOTOR (N*m) =

POTENCIA REACTIVA (VA) =

CALCULAR **CURVA V DEL MOTOR**

POTENCIA

POTENCIA DE SALIDA (W) =

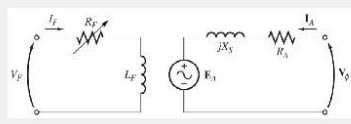
POTENCIA DE ENTRADA (W) =

RENDIMIENTO (%) =

VELOCIDAD (RPM) =

PAR INDUCIDO (Nm) =

CIRCUITO EQUIVALENTE



VF = Tension de campo jXs = Reactancia sincrona
 IF = Corriente de campo RA = Resistencia sincrona
 RF= Resistencia de campo IA = Corriente inducido
 LF= Reactancia de campo V = Tension en bornes
 EA = Fuerza electromotriz

¿ Y SI SE INCREMENTA O DISMINUYE LA FEM?

% DE FEM = INCREMENTA DISMINUYE

CALCULAR

INTENSIDAD INDUCIDO (A) =

FUERZA ELECTROMOTRIZ (V) =

ANGULO DELTA (°) =

ANGULO PHI = FP =

PAR MOTOR (N*m) =

POTENCIA REACTIVA (VA) =

CONDICIONES INICIALES

TENSION (V) =

POTENCIA (KW) =

FRECUENCIA (Hz) =

RESISTENCIA (Ohm) =

REACTANCIA (Ohm) =

NUMERO DE POLOS =

FACTOR DE POTENCIA

CARACTER

INDUCTIVO

CAPACITIVO

CONEXION

TRIANGULO ESTRELLA

PERDIDAS

ROZAMIENTO (W) =

NUCLEO (W) =

INTESIDAD INDUCIDO (A) =
 FUERZA ELECTROMOTRIZ (V) =
 ANGULO DELTA (°) =

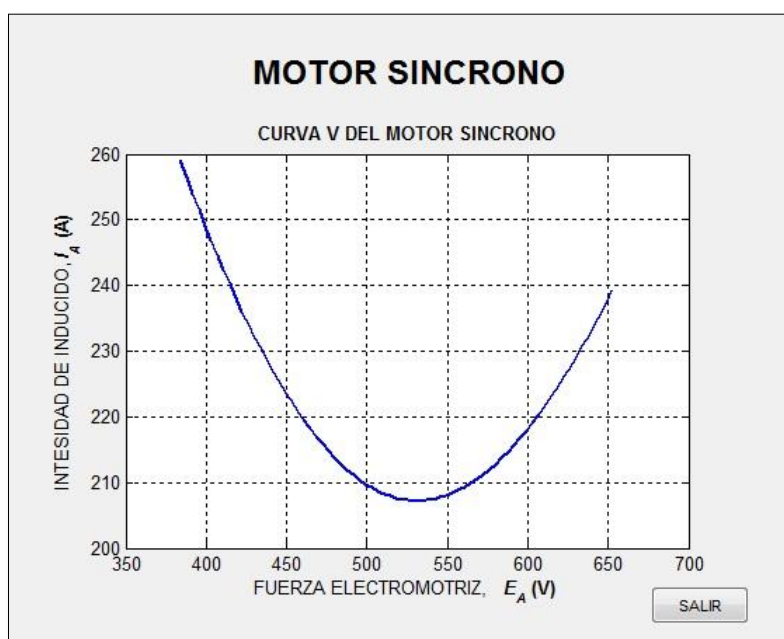
EL MOTOR CONSUME POTENCIA REACTIVA

PAR MOTOR (N*m) =
 POTENCIA REACTIVA (VA) =

POTENCIA

POTENCIA DE SALIDA (W) =
 POTENCIA DE ENTRADA (W) =
 RENDIMIENTO (%) =

VELOCIDAD (RPM) =
 PAR INDUCIDO (Nm) =



¿ Y SI SE INCREMENTA O DISMINUYE LA FEM?

% DE FEM =

INCREMENTA
 DISMINUYE

CALCULAR

INTESIDAD INDUCIDO (A) =
 FUERZA ELECTROMOTRIZ (V) =
 ANGULO DELTA (°) =
 ANGULO PHI = FP =
 EL MOTOR CONSUME POTENCIA REACTIVA
 PAR MOTOR (N*m) =
 POTENCIA REACTIVA (VA) =

¿ Y SI SE INCREMENTA O DISMINUYE LA FEM?

% DE FEM =

INCREMENTA
 DISMINUYE

CALCULAR

INTESIDAD INDUCIDO (A) =
 FUERZA ELECTROMOTRIZ (V) =
 ANGULO DELTA (°) =
 ANGULO PHI = FP =
 EL MOTOR CONSUME POTENCIA REACTIVA
 PAR MOTOR (N*m) =
 POTENCIA REACTIVA (VA) =

4.3. TRANSFORMADORES

4.3.1. CIRCUITO EQUIVALENTE

Un transformador monofásico de 15kVA, 2300/230V, 60Hz ha dado los siguientes resultados obtenidos de las pruebas en el lado primario del transformador:

Ensayo de circuito abierto	Ensayo de cortocircuito
$V_{0C} = 2300V$	$V_{CC} = 47V$
$I_{0C} = 0.21A$	$I_{CC} = 6A$
$P_{0C} = 50W$	$P_{CC} = 160W$

Factor de potencia 0.8 inductivo.

TRANSFORMADOR

DATOS INICIALES

DATOS DEL TRANSFORMADOR

POTENCIA (VA) =

TENSION PRIMARIO (V) =

TENSION SECUNDARIO (V) =

FRECUENCIA (Hz) =

FACTOR DE POTENCIA

CARACTER
 INDUCTIVO CAPACITIVO

ENSAYO EN VACIO (en el primario)

TENSION (V) =

CORRIENTE (I) =

POTENCIA VACIO (W) =

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO (en el primario)

TENSION (V) =

CORRIENTE (I) =

POTENCIA CC (W) =

CIRCUITO EQUIVALENTE

Rfe (Ohms) =

X (Ohms) =

Rcc (Ohms) =

Xcc (Ohms) =

CALCULAR

REGULACION DE TENSION

TENSION DE SALIDA (V) =

REGULACION DE TENSION (%) =

CALCULAR

GRAFICA REGULACION DE TENSION

PERDIDAS Y RENDIMIENTO

PERDIDAS EN EL COBRE (W) =

PERDIDAS EN EL NUCLEO (W) =

POTENCIA DE SALIDA (W) =

RENDIMIENTO (%) =

CALCULAR

DATOS INICIALES

DATOS DEL TRANSFORMADOR

POTENCIA (VA) =

TENSION PRIMARIO (V) =

TENSION SECUNDARIO (V) =

FRECUENCIA (Hz) =

FACTOR DE POTENCIA

CARACTER

INDUCTIVO CAPACITIVO

ENSAYO EN VACIO (en el primario)

TENSION (V) =

CORRIENTE (I) =

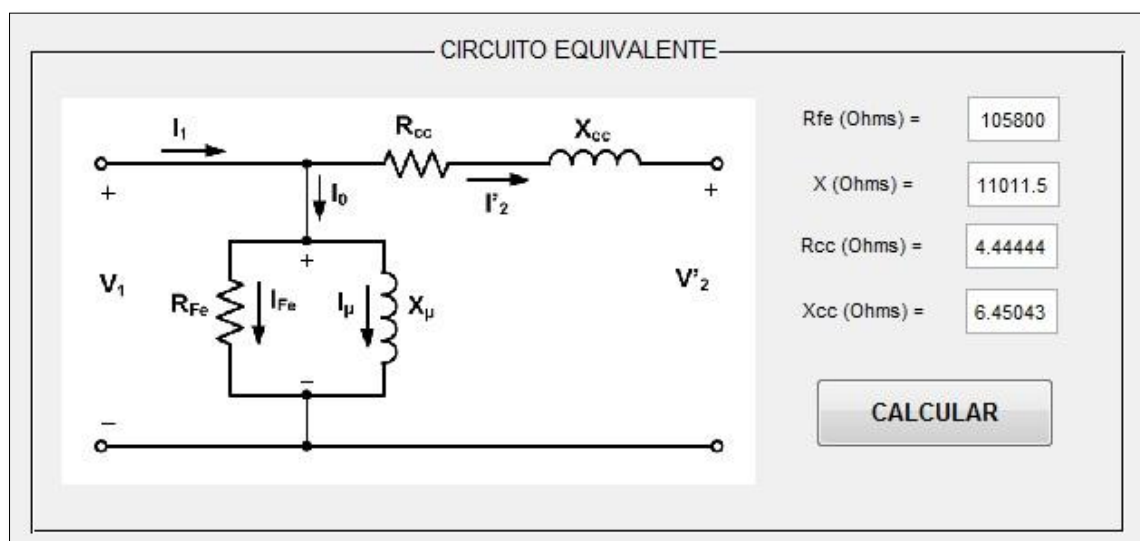
POTENCIA VACIO (W) =

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO (en el primario)

TENSION (V) =

CORRIENTE (I) =

POTENCIA CC (W) =



PERDIDAS Y RENDIMIENTO

PERDIDAS EN EL COBRE (W) =

PERDIDAS EN EL NUCLEO (W) =

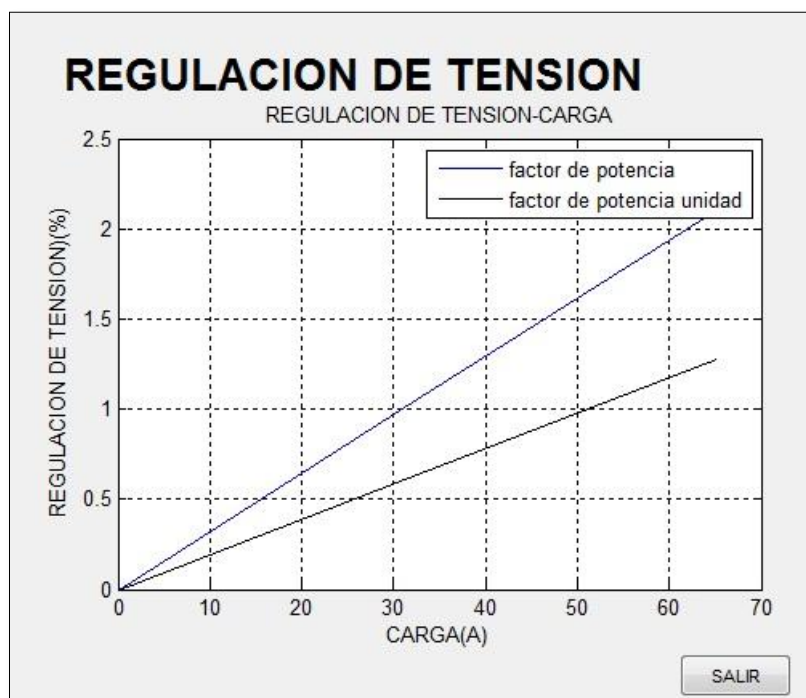
POTENCIA DE SALIDA (W) =

RENDIMIENTO (%) =

REGULACION DE TENSION

TENSION DE SALIDA (V) =

REGULACION DE TENSION (%) =



4.3.2. ACOPLAMIENTO EN PARALELO

Se disponen dos transformadores trifásicos con las siguientes características de construcción:

	POTENCIA NOMINAL (KVA)	TENSION NOMINAL PRIMARIO (V)	TENSION NOMINAL SECUNDARIO (V)	POTENCIA DE CORTOCIRCUITO (W)	TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO (%)
TRAFO 1	1500	30	6.3	13065	5.36
TRAFO 2	2000	30	6.3	15814	5.11

La relación de transformación tanto para el transformador 1 como para el transformador 2 es la misma.

ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES

TRANSFORMADOR 1

POTENCIA (KVA) =

TENSION NOMINAL PRIMARIO (KV) =

TENSION NOMINAL SECUNDARIO (KV) =

POTENCIA DE CORTOCIRCUITO (W) =

TENSION DE CORTOCIRCUITO (%) =

TRANSFORMADOR 2

POTENCIA (KVA) =

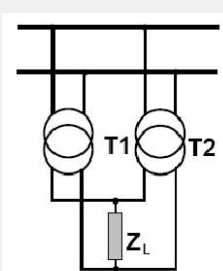
TENSION NOMINAL PRIMARIO (KV) =

TENSION NOMINAL SECUNDARIO (KV) =

POTENCIA DE CORTOCIRCUITO (W) =

TENSION DE CORTOCIRCUITO (%) =

CIRCUITO EQUIVALENTE



POTENCIA MAXIMA

POTENCIA TRANSFORMADOR 1 (KVA) =

POTENCIA TRANSFORMADOR 2 (KVA) =

CORRIENTE

DEFASE ENTRE CORRIENTES SECUNDARIAS (%) =

CORRIENTE TOTAL SUMINISTRADA A LA RED SECUNDARIA (A) =

TRANSFORMADOR 1

POTENCIA (KVA) =

TENSION NOMINAL PRIMARIO (KV) =

TENSION NOMINAL SECUNDARIO (KV) =

POTENCIA DE CORTOCIRCUITO (W) =

TENSION DE CORTOCIRCUITO (%) =

TRANSFORMADOR 2

POTENCIA (KVA) =

TENSION NOMINAL PRIMARIO (KV) =

TENSION NOMINAL SECUNDARIO (KV) =

POTENCIA DE CORTOCIRCUITO (W) =

TENSION DE CORTOCIRCUITO (%) =

POTENCIA MAXIMA

POTENCIA TRANSFORMADOR 1 (KVA) =

POTENCIA TRANSFORMADOR 2 (KVA) =

CORRIENTE

DESFASE ENTRE CORRIENTES SECUNDARIAS (%) =

LA INTESIDAD DEL TRAF01 ESTA ADELANTADA RESPECTO A LA DEL TRAF02

CORRIENTE TOTAL SUMINISTRADA A LA RED SECUNDARIA (A) =

CALCULAR

4.4. MAQUINAS ASINCRONAS

Un motor de inducción de rotor devanado de 208 V, dos polos, 60 Hz, está conectado en Y, tiene un deslizamiento de 0.05. Las componentes de su circuito equivalente son:

- $R_1 = 0.2 \Omega$
- $X_1 = 0.41 \Omega$
- $R_2 = 0.12 \Omega$
- $X_2 = 0.41 \Omega$
- $X_M = 15 \Omega$
- $P_{\text{núcleo}} = 180 \text{ W}$
- $P_{\text{rozamiento}} = 250 \text{ W}$
- $P_{\text{miscelaneas}} = 0 \text{ W}$

MOTOR DE INDUCCIÓN

DATOS INICIALES

DATOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

TENSIÓN (V) =

NÚMERO DE POLOS =

DESPLAZAMIENTO =

FRECUENCIA (Hz) =

CONEXION:

TRIANGULO ESTRELLA

DATOS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

R1 (Ohm) =

X1 (Ohm) =

XM (Ohm) =

R2 (Ohm) =

X2 (Ohm) =

PERDIDAS:

NÚCLEO (W) =

ROZAMIENTO (W) =

MISCELÁNEAS (W) =

INTENSIDAD DE LINEA (A) =

ÁNGULO DE DESFASE (°) =

VELOCIDAD SINCRONA (rpm) =

VELOCIDAD MECÁNICA (rpm) =

CALCULAR

BALANCE DE POTENCIAS

POTENCIA DE ENTRADA (W) =

PÉRDIDAS EN EL COBRE (ESTATOR) (W) =

POTENCIA EN EL ENTREHERRO (W) =

PÉRDIDAS EN EL COBRE (ROTOR) (W) =

POTENCIA MECÁNICA (W) =

POTENCIA DE SALIDA (W) =

PAR INDUCIDO (Nm) =

PAR DE CARGA (Nm) =

RENDIMIENTO (%) =

CALCULAR

DESPLAZAMIENTO MÁXIMO =

PAR DE ARRANQUE (Nm) =

PAR INDUCIDO MÁXIMO (Nm) =

CALCULAR

CARACTERÍSTICA PAR - VELOCIDAD

DATOS INICIALES

DATOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

TENSIÓN (V) =

NÚMERO DE POLOS =

DESPLAZAMIENTO =

FRECUENCIA (Hz) =

CONEXION:

TRIANGULO ESTRELLA

DATOS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

R1 (Ohm) =

X1 (Ohm) =

XM (Ohm) =

R2 (Ohm) =

X2 (Ohm) =

PERDIDAS:

NÚCLEO (W) =

ROZAMIENTO (W) =

MISCELÁNEAS (W) =

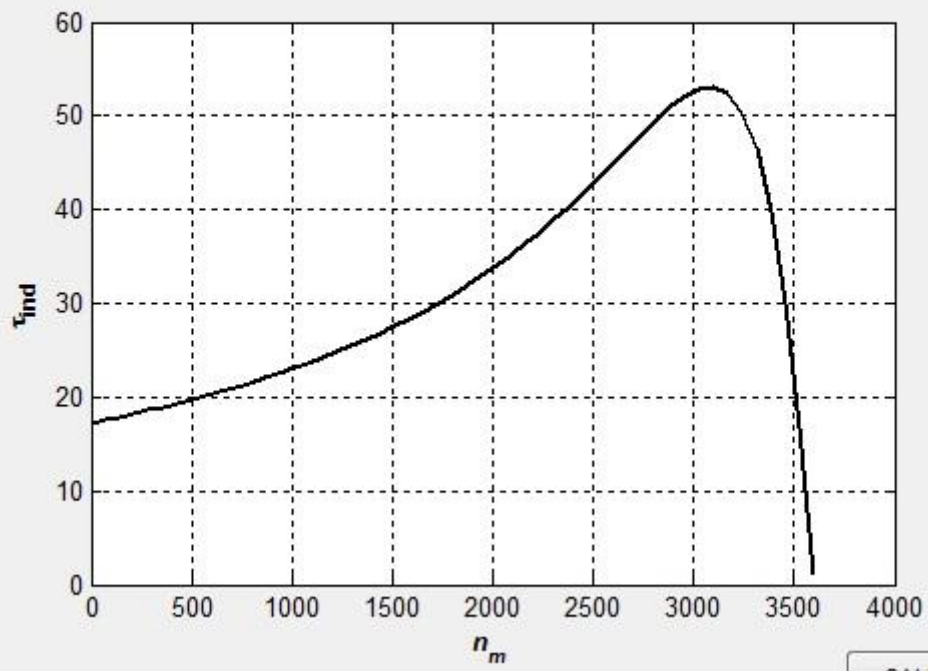
INTENSIDAD DE LINEA (A) =
 ÁNGULO DE DESFASE (°) =
 VELOCIDAD SINCRONA (rpm) =
 VELOCIDAD MECÁNICA (rpm) =

BALANCE DE POTENCIAS

POTENCIA DE ENTRADA (W) = PAR INDUCIDO (Nm) =
 PÉRDIDAS EN EL COBRE (ESTATOR) (W) = PAR DE CARGA (Nm) =
 POTENCIA EN EL ENTREHIERRO (W) = RENDIMIENTO (%) =
 PÉRDIDAS EN EL COBRE (ROTOR) (W) =
 POTENCIA MECÁNICA (W) =
 POTENCIA DE SALIDA (W) =

DESLIZAMIENTO MÁXIMO =
 PAR DE ARRANQUE (Nm) =
 PAR INDUCIDO MÁXIMO (Nm) =

CARACTERISTICA PAR - VELOCIDAD MOTOR DE INDUCCIÓN



SALIR

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es crear una interfaz gráfica para el cálculo y análisis de las distintas maquinas eléctricas.

Después de realizar este proyecto y durante el desarrollo del mismo consigue de manera satisfactoria los objetivos planteados objeto de este proyecto fin de grado.

No ha sido fácil aglutinar toda la información y conseguir un aspecto limpio y claro a la hora de presentar el programa y los resultados obtenidos en él.

Todas las prestaciones que presenta el programa facilitan la labor de análisis de las distintas máquinas eléctricas, y ayuda a comprender de forma gráfica e interactiva como actúan cada una de ellas en distintas situaciones.

Respecto a la funcionabilidad del programa, aun presenta algunas limitaciones, pero la intención de este proyecto es continuar con la labor de análisis y crear un programa más potente, que satisfaga las limitaciones, tanto educativas como profesionales, que hoy en día se presentan a la hora de analizar máquinas y funcionamientos de estas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- 1- **Chapman, S. J.** “ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS”, (Fifth edition). Editorial McGraw-Hill. 2012
- 2- **Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. y Umans, S.** “ELECTRIC MACHINERY”, (Sixth edition). Editorial McGraw-Hill. 2003
- 3- **Fraile Mora, J.** “MAQUINAS ELÉCTRICAS”, (Quinta edición). Editorial McGraw-Hill. 2003.
- 4- **MATLAB**, “CREATING GRAPHICAL USER INTERFACES”, R2014a. Mathworks. 2014.
- 5- www.mathworks.com
- 6- www.mathworks.com/matlabcentral/